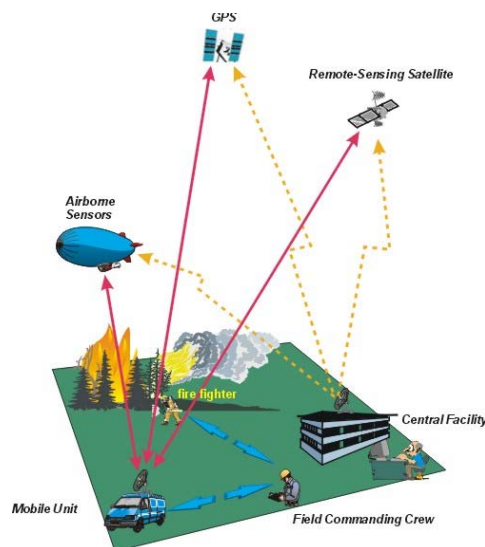




**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**  
**Τομέας Ανίχνευσης & Εντοπισμού**  
**ΜΔΕ: “ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ”**

**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**



**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Καθηγητής Σ. Μερτίκας (επιβλέπων)

Καθηγητής Ζ. Αγιουτάντης

Καθηγητής Μ. Ζερβάκης

**ΑΧΙΛΛΕΑΣ Η. ΤΡΙΠΟΛΙΤΣΙΩΤΗΣ**

**ΧΑΝΙΑ ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2003**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη συμβολή ορισμένων ανθρώπων.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Στέλιο Μερτίκα, Καθηγητή, που ως επιβλέπων της διατριβής μου έδωσε το ερέθισμα να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα. Η επιστημονική αλλά και ηθική στήριξή του καθόλη την διάρκεια εκπόνησης της διατριβής ήταν ουσιαστική και ανώτερη από τα στενά πλαίσια συνεργασίας καθηγητή – φοιτητή.

Ο Καθηγητής Ζαχαρίας Αγιουτάντης με βοήθησε να αντιληφθώ τις απαιτήσεις που έχουν οι τεχνικοοικονομικές μελέτες και ως τέτοια να δομηθεί η διατριβή μου. Οι συμβουλές του ήταν καθοριστικές και για άλλα στάδια της επαγγελματικής μου εξέλιξης και οφείλω να τον ευχαριστήσω για αυτές. Ο Καθηγητής Μιχάλης Ζερβάκης με βοήθησε στο να επιλέξω μεταξύ διαφόρων τεχνικών αντίχνευσης και τελικά να επιλέξω εκείνη που ικανοποιεί τόσο τις τεχνικές απαιτήσεις αλλά είναι και οικονομικά συμφέρουσα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Άκη Φραντζή, μόνιμο συνεργάτη του Εργαστηρίου Γεωδαισίας, για την βοήθειά του και τις συμβουλές του σε διάφορα τεχνικά θέματα που ανέκυψαν. Ο κύριος Βασίλης Δικαιουλάκος, Δημοτικός Σύμβουλος στο Δήμο Καλαμάτας, διαδραμάτισε ουσιαστικότερο ρόλο στην ολοκλήρωση της διατριβής αυτής. Με βοήθησε στην συλλογή πληροφοριών, στην επικοινωνία με τους αρμόδιους φορείς ώστε να κατανοήσω τις απαιτήσεις τους και γενικά ήταν ο άνθρωπος που η αγάπη του για το δάσος του Ταυγέτου με οδήγησε στο να το θεωρήσω ως την περιοχή μελέτης της διατριβής.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω δύο ανθρώπους που με στηρίζουν σε όλα τα βήματα της επιστημονικής, επαγγελματικής και κυρίως προσωπικής βελτίωσής μου: Την γυναίκα μου Μαρία που έχει αποτελέσει το στήριγμά μου σε όλες τις δύσκολες στιγμές της κοινής μας ζωής αλλά και τον συνάδελφο και φίλο Χρυσάνθο Στειακάκη που οι συζητήσεις μαζί του αποτελούν οδηγό για τους επαγγελματικούς μου προσανατολισμούς.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εποχή μας γίνεται ολοένα και περισσότερο λόγος για τις επιπτώσεις που έχει η τεχνολογική ανάπτυξη στην πρόκληση διαφόρων φυσικών καταστροφών (πλημμύρες, πυρκαγιές κ.ά.). Τι αποκαλούμε όμως φυσική καταστροφή; Τι πρέπει να κάνουμε ώστε να τις αντιμετωπίσουμε;

Η διατριβή αυτή ασχολείται με τις πυρκαγιές καθώς οι επιπτώσεις της στην οικονομική και κοινωνική ζωή του τόπου που πλήττεται είναι σημαντικές. Για την αντιμετώπισή τους προτείνεται ένα ολοκληρωμένο, επιχειρησιακό σύστημα διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών με το οποίο θα είναι δυνατή: η εκτίμηση της επικινδυνότητας για πρόκληση πυρκαγιάς, η άμεση ανίχνευση και μεθοδολογία διαχείρισης της κρίσης καθώς επίσης και η χαρτογράφηση της καμένης έκτασης και αποτίμηση του μεγέθους της καταστροφής.

Παρατίθενται, σχεδόν στο σύνολό τους, οι τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για την επίτευξη του παραπάνω στόχου με έμφαση στις εφαρμογές των νέων, σύγχρονων τεχνικών καθώς οι παραδοσιακές μέθοδοι έχουν κριθεί, από την εμπειρία τόσο ετών, μάλλον αναποτελεσματικές.

Η διατριβή ολοκληρώνεται με την πρόταση δημιουργίας ενός τέτοιου συστήματος στην χώρα μας και ειδικότερα στο δάσος του Ταυγέτου, Περιφέρεια Πελοποννήσου. Στην πρόταση αυτή περιλαμβάνονται όλα τα απαραίτητα τεχνικοοικονομικά στοιχεία ενώ γίνεται και πρόταση της οργανωτικής δομής που πρέπει αυτό να έχει αλλά και χρονοδιάγραμμα εκτέλεσης των απαιτούμενων εργασιών προτού το σύστημα θεωρηθεί επιχειρησιακά έτοιμο.

Σκοπός της διατριβής είναι η ευαισθητοποίηση των αρμόδιων δημόσιων φορέων ώστε να αποφασιστεί έγκαιρα η υλοποίηση ενός συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών, αρχικά πιλοτικά σε μια συγκεκριμένη δασική έκταση (Ταυγέτος – Σπάρτη, στο Φαραγγι Σαμαριάς -Χανιά, στο Οροπέδιο Καθαρό - Λασιθί) και στην συνέχεια σε εθνικό επίπεδο και σε συνεργασία με διεθνείς φορείς (περιβαλλοντικές οργανώσεις, Ευρωπαϊκή Ένωση).

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1.1.</b> Οι πυρκαγιές αποτελούν μια φυσική καταστροφή	7
<b>Σχήμα 2.1.</b> Το τρίγωνο του περιβάλλοντος δημιουργίας της πυρκαγιάς	16
<b>Σχήμα 2.2.</b> Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων από χάρτες	17
<b>Σχήμα 2.3.</b> Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων από συμβολομετρία SAR	18
<b>Σχήμα 2.4.</b> Συνδυασμός εικόνων AVIRIS και μοντέλου Anderson	20
<b>Σχήμα 2.5.</b> Παράδειγμα εφαρμογής του NFDRS	28
<b>Σχήμα 2.6.</b> Η δομή του NFDRS	29
<b>Σχήμα 2.7.</b> Χάρτης επικινδυνότητας από το NFDRS	30
<b>Σχήμα 2.8.</b> Ο δείκτης FWI του CFFDRS	31
<b>Σχήμα 2.9.</b> Δείκτης FWI	33
<b>Σχήμα 2.10.</b> Παράδειγμα εφαρμογής του FDR	35
<b>Σχήμα 2.11.</b> Οπτική ταξινόμηση στο ακρωτήρι Σιθωνία	36
<b>Σχήμα 2.12.</b> Αυτόματη ταξινόμηση στο ακρωτήρι Σιθωνία	37
<b>Σχήμα 2.13.</b> Χάρτης επικινδυνότητας στο ακρωτήρι Σιθωνία	37
<b>Σχήμα 2.14.</b> Δείκτης NDVI στο ακρωτήρι Σιθωνία	38
<b>Σχήμα 2.15.</b> Οθόνη μοντέλου BEHAVEPlus	43
<b>Σχήμα 2.16.</b> Γράφημα από εφαρμογή του μοντέλου BEHAVEPlus	43
<b>Σχήμα 2.17.</b> Οθόνη μοντέλου FarSite	46
<b>Σχήμα 2.18.</b> Αρχικά δεδομένα μοντέλου FireΓΣΠ	47
<b>Σχήμα 2.19.</b> Αποτέλεσμα εφαρμογής μοντέλου FireΓΣΠ	47
<b>Σχήμα 2.20.</b> Μοντέλο πιθανοτήτων	49
<b>Σχήμα 3.1.</b> Πύργος παρατήρησης δασικών πυρκαγιών	56
<b>Σχήμα 3.2.</b> Εικόνες δέκτη AWIS	57
<b>Σχήμα 3.3.</b> Χρήση ελικοπτέρων στην ανίχνευση δασικών πυρκαγιών	58
<b>Σχήμα 3.4.</b> Θερμικοί ανιχνευτές	59
<b>Σχήμα 3.5.</b> Το σύστημα ABS	60
<b>Σχήμα 3.6.</b> Ανίχνευση πυρκαγιών με το σύστημα ABS	60
<b>Σχήμα 3.7.</b> Το σύστημα FireMapper	62
<b>Σχήμα 3.8.</b> Ανίχνευση πυρκαγιάς με το σύστημα FireMapper	62
<b>Σχήμα 3.9.</b> Παράδειγμα εφαρμογής συστήματος FireMapper	63
<b>Σχήμα 3.10.</b> Παράδειγμα εφαρμογής συστήματος FireMapper	64
<b>Σχήμα 3.11.</b> Παράδειγμα εφαρμογής συστήματος FireMapper	64
<b>Σχήμα 3.12.</b> Παράδειγμα εφαρμογής συστήματος FireMapper	65
<b>Σχήμα 3.13.</b> Το μη επανδρωμένο αεροπλάνο ALTUS II	65
<b>Σχήμα 3.14.</b> Ανίχνευση πυρκαγιών με οπτικό, δορυφορικό δέκτη	67
<b>Σχήμα 3.15.</b> Ανίχνευση πυρκαγιών με υπέρυθρο, δορυφορικό δέκτη	68
<b>Σχήμα 3.16.</b> Η δομή του συστήματος FireHawk	72
<b>Σχήμα 4.1.</b> Μωσαϊκό αεροφωτογραφιών	77
<b>Σχήμα 4.2.</b> Χάρτης επικινδυνότητας βλάστησης	79
<b>Σχήμα 4.3.</b> Χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων με δεδομένα LandSat / Spot	82
<b>Σχήμα 4.4.</b> Λόγοι ανακλαστικότητας αρχικών προς καμένων εκτάσεων	83
<b>Σχήμα 4.5.</b> Δείκτες NDVI και SWVI	85
<b>Σχήμα 4.6.</b> Εικόνες δεκτών NDVI και SWVI	86
<b>Σχήμα 4.7.</b> Χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων με MODIS VCC	89
<b>Σχήμα 4.8.</b> Αρχική κατάσταση με δεδομένα SAR	91
<b>Σχήμα 4.9.</b> Χάρτης επικινδυνότητας με δεδομένα SAR	92
<b>Σχήμα 4.10.</b> Χαρτογράφηση καμένης έκτασης με δεδομένα SAR	92
<b>Σχήμα 5.1.</b> Η περιοχή του δάσους του Ταϊγέτου	95
<b>Σχήμα 5.2.</b> Οργανόγραμμα συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών	109
<b>Σχήμα 5.3.</b> Χρονοδιάγραμμα εργασιών υλοποίησης συστήματος	112

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	5
Κεφάλαιο 1- Εισαγωγή.....	7
1.1. Η έννοια της φυσικής καταστροφής.....	7
1.2. Τηλεπισκόπηση και φυσικές καταστροφές.....	9
1.3. ΓΣΠ και φυσικές καταστροφές.....	10
1.4. Οι πυρκαγιές στην Ελλάδα.....	10
1.4.1. Στατιστικά στοιχεία.....	10
1.4.2. Επιπτώσεις των πυρκαγιών.....	12
1.5. Σκοπός της Διατριβής.....	14
Κεφάλαιο 2- Χάρτες Επικινδυνότητας – Μοντέλα Πρόβλεψης.....	16
2.1. Εφαρμογή ΓΠΣ στο στάδιο προετοιμασίας.....	16
2.2. Συλλογή δεδομένων.....	17
2.2.1 Τοπογραφία.....	18
2.2.2. Καύσιμη ύλη.....	21
2.2.3. Καιρικές συνθήκες.....	23
2.3. Χάρτες επικινδυνότητας.....	24
2.3.1. Μοντέλα καύσιμης ύλης.....	25
2.3.1.1. Μοντέλα Anderson.....	25
2.3.1.2. Μοντέλα του NFDRS.....	27
2.3.2. Παραδείγματα συστημάτων εκτίμησης επικινδυνότητας.....	28
2.3.2.1. Το αμερικανικό σύστημα NFDRS.....	29
2.3.2.2. Το καναδικό σύστημα CFFDRS.....	33
2.3.2.3. Ινδονησία.....	35
2.3.2.4. Ελλάδα.....	37
2.4. Μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης.....	41
2.4.1. Μηχανιστικά μοντέλα.....	41
2.4.1.1. Μοντέλα χαρτών.....	42
2.4.1.2. Περιγραφικά μοντέλα.....	42
2.4.2. Μοντέλα ιχνών.....	42
2.4.2.1. Μοντέλα κατανομής πιθανοτήτων.....	42
2.4.2.2. Χωρικά συσχετισμένα γεγονότα.....	43
2.4.2. Το μοντέλο BEHAVEPlus.....	43
2.4.3. Το μοντέλο Farsite.....	46
2.4.4. Το μοντέλο FireΓΣΠ.....	48
2.4.5. Μοντέλο πιθανοτήτων.....	49
2.5. Τεχνικοοικονομικά στοιχεία.....	52
Κεφάλαιο 3- Ανίχνευση Δασικών Πυρκαγιών.....	56
3.1. Εισαγωγή.....	56
3.2. Επίγειες τεχνικές ανίχνευσης.....	57
3.2.1. Οπτική παρακολούθηση.....	57
3.2.2. Ψηφιακές Κάμερες.....	59
3.3. Εναέριες τεχνικές ανίχνευσης.....	60
3.3.1. Οπτική παρατήρηση.....	60
3.3.2. Θερμικοί Ανιχνευτές.....	60
3.3.3. Υπέρυθροι ανιχνευτές.....	62
3.3.4. Μη Επανδρωμένες Εναέριες Πτήσεις.....	67
3.4. Δορυφορικές τεχνικές ανίχνευσης.....	68
3.4.1. Οπτικοί ανιχνευτές.....	68
3.4.2. Ανιχνευτές Υπέρυθρου.....	69
3.5. Ανίχνευση Δασικών Πυρκαγιών στην Ελλάδα.....	71
3.6. Τεχνικοοικονομικά Στοιχεία.....	73
Κεφάλαιο 4- Χαρτογράφηση Καμένων Εκτάσεων.....	76
4.1. Εισαγωγή.....	76
4.2. Τεχνικές Χαρτογράφησης Καμένων Εκτάσεων.....	77
4.2.1. Αεροφωτογραφίες στο Οπτικό.....	78
4.2.2. Αεροφωτογραφίες στο υπέρυθρο.....	78
4.2.3. Ταξινόμηση Καμένων Εκτάσεων με δεδομένα LandSat TM.....	79

4.2.4. Χαρακτηρισμός Καμένων Εκτάσεων με δεδομένα Spot VGT .....	81
4.2.5. Χαρτογράφηση Καμένων Εκτάσεων με δεδομένα MODIS VCC .....	87
4.3. Τεχνικοοικονομικά Στοιχεία .....	94
<b>Κεφάλαιο 5- Μελέτη Εφαρμογής σε Ελληνική Έκταση</b> .....	95
5.1. Το δάσος του Ταυγέτου .....	95
5.2. Στάδιο προετοιμασίας .....	98
5.2.1. Δημιουργία χάρτη επικινδυνότητας .....	98
5.2.2 Δημιουργία μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης πυρκαγιάς .....	100
5.3. Στάδιο ανίχνευσης – διαχείρισης της κρίσης .....	101
5.4. Στάδιο Αποτίμησης .....	104
5.5. Χρονικός προγραμματισμός – κοστολόγιο Εργασιών .....	105
5.5.1. Στάδιο Προετοιμασίας .....	105
5.5.2. Στάδιο ανίχνευσης .....	108
5.5.3. Στάδιο αποτίμησης της καταστροφής .....	109
5.6. Συγκεντρωτικά Στοιχεία .....	109
5.6.1. Οργανόγραμμα .....	110
5.6.2 Κοστολόγιο Εργασιών .....	112
5.6.3 Χρονοδιάγραμμα Εργασιών .....	113
<b>Κεφάλαιο 6- Συμπεράσματα και Προτάσεις</b> .....	115
6.1 Συμπεράσματα .....	115
6.2. Προτάσεις .....	116
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	117

## **Κεφάλαιο 1- Εισαγωγή**

### ***1.1. Η έννοια της φυσικής καταστροφής***

Οι φυσικές καταστροφές αποτελούν ένα σοβαρό πρόβλημα, ειδικά για τις αναπτυγμένες και τις υπό ανάπτυξη χώρες καθώς επανειλημμένα προκαλούν μεγάλο αριθμό θανάτων, επηρεάζουν ένα μεγάλο τμήμα του πληθυσμού και επιφέρουν κοινωνικές, οικονομικές και μακροπρόθεσμες απώλειες.

Μια φυσική καταστροφή ορίζεται συνήθως (Mechler, 2003) ως ένα ακραίο γεγονός που προκαλείται τόσο από γεωφυσικά αίτια όσο και από την ανθρώπινη ανάμειξη, επιδρά σε εκτεθειμένες και ευαίσθητες κοινωνίες με τέτοιο τρόπο ώστε η δυνατότητα αντίδρασης της κοινωνίας να εξαντλείται και να απαιτείται εξωτερική βοήθεια για την αντιμετώπισή της.

Χωρίς να παραβλέπεται η έννοια του φυσικού, μια τέτοια καταστροφή εμπεριέχει ένα στοιχείο ανθρώπινης επίδρασης. Ένα φυσικό γεγονός, όπως για παράδειγμα μια ηφαιστειακή έκρηξη, που δεν προκαλεί απώλειες στην ανθρώπινο πληθυσμό, είναι ένα φυσικό φαινόμενο αλλά όχι φυσική καταστροφή. Ένα φυσικό φαινόμενο που λαμβάνει χώρα σε κατοικημένη περιοχή είναι επικίνδυνο γεγονός τόσο για τους κατοίκους της περιοχής όσο και για τις περιουσίες τους. Όταν το γεγονός αυτό προκαλεί απώλειες σε ανθρώπινες ζωές και /ή ολοκληρωτική καταστροφή των περιουσιών ονομάζεται φυσική καταστροφή.

Διάφορα επικίνδυνα φυσικά φαινόμενα που έχουν το δυναμικό, υπό τις κατάλληλες προϋποθέσεις, να εξελιχθούν σε φυσικές καταστροφές παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

**Πίνακας 1.1** Τα κυριότερα είδη Φυσικών Καταστροφών

Ατμοσφαιρικές	Σεισμικές	Υδρολογικές
Χαλάζι	Διαταραχές ρηγμάτων	Παραθαλάσσιες πλημμύρες
Τυφώνες	Μετακίνηση εδάφους	Ερημοποίηση
Αστραπές	Πλευρική ανάπτυξη	Ξηρασία
Ανεμοστρόβιλοι	Ρευστοποίηση	Διάβρωση και ιζηματοποίηση
Τροπικές θύελλες	Κύματα Tsunami	Πλημμύρες ποταμών
		Ανεμοθύελλες
Άλλες υδρολογικές/γεωλογικές	Πυρκαγιές	Ηφαίστεια
Πτώσεις βράχων	Θάμνοι	Τέφρα
Καθιζήσεις	Δάση	Αέρια
Υπολείμματα κατολισθήσεων	Χορτάρι	Ροή λάβας
		Ροή λάσπης
		Εκτόξευση βράχων
		Ροή πυροκλαστικών υλικών



**Σχήμα 1.1.** Οι πυρκαγιές αποτελούν μια Φυσική Καταστροφή.

Μολονότι, οι άνθρωποι μπορούν να κάνουν ελάχιστα για να αλλάξουν τη συχνότητα ή την ένταση των φυσικών φαινομένων μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στη διασφάλιση του ότι διάφορες φυσικές διεργασίες δεν θα μετατραπούν σε καταστροφές από ανθρώπινο σφάλμα.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να παρουσιάσει σύγχρονες τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιμετώπιση μιας φυσικής καταστροφής, όπως είναι οι δασικές πυρκαγιές (Σχήμα 1.1). Στα επόμενα κεφάλαια αναλύονται τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη, προετοιμασία, άμεση αντιμετώπιση, αποτίμηση αλλά και την προσπάθεια, στα πλαίσια του εφικτού, αποκατάστασης του περιβάλλοντος μετά από μια δασική πυρκαγιά.



Η διατριβή πραγματεύεται τη δυνατότητα εφαρμογής σύγχρονων τεχνικών, όπως η Τηλεπισκόπηση και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΠΣ), για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών με το οποίο ο φορέας χρήσης του θα έχει τη δυνατότητα:

- της βέλτιστης προετοιμασίας,
- της άμεσης ανίχνευσης,
- της επιλογής των πλέον ενδεδειγμένων, κατά περίπτωση, μεθόδων κατάσβεσης,
- τη δυνατότητα χαρτογράφησης της καμένης έκτασης,
- παρατήρησης των, ενδεχόμενων, προσπαθειών αναδάσωσης,
- ελέγχου προσπαθειών καταπάτησης των δασικών εκτάσεων.

## ***1.2. Τηλεπισκόπηση και φυσικές καταστροφές***

Ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία πρόβλεψης, ανίχνευσης και αποκατάστασης των φυσικών καταστροφών είναι η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης του περιβάλλοντος. Όχι μόνο είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη διαδικασία γενικότερου σχεδιασμού αντιμετώπισης των φυσικών καταστροφών αλλά και στην ανίχνευση και χαρτογράφηση πολλών ειδών φυσικών καταστροφών όταν, όπως συμβαίνει συχνά, δεν υπάρχουν αναλυτικές περιγραφές των επιδράσεών τους στο ανθρώπινο και φυσικό περιβάλλον.

Εάν είναι δυνατή η έγκαιρη εκτίμηση της δυνατότητας εκδήλωσης μιας φυσικής καταστροφής (επικινδυνότητα) σε ένα εξελιγμένο αναπτυξιακό σύστημα τότε πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες για την μείωση των κοινωνικών και οικονομικών επιδράσεων των δυναμικών καταστροφών.

Με την εφαρμογή τεχνικών της Τηλεπισκόπησης είναι δυνατό να μελετηθούν σχεδόν όλοι οι φυσικοί κίνδυνοι. Αυτό συμβαίνει γιατί σχεδόν όλα τα γεωλογικά, υδρολογικά και ατμοσφαιρικά φαινόμενα που δημιουργούν επικίνδυνες καταστάσεις είναι διαδικασίες που αφήνουν στοιχεία της πρότερης δραστηριότητάς τους. Αυτά τα στοιχεία μπορούν να καταγραφούν, αναλυθούν και ερμηνευτούν στην διαδικασία σχεδιασμού.

Οι περισσότερες μελέτες Τηλεπισκόπησης που σχετίζονται με φυσικές καταστροφές αφορούν την επίδρασή τους σε μια συγκεκριμένη περιοχή, την παρακολούθηση των φαινομένων που, υπό προϋποθέσεις, μπορεί να επιταχύνουν μια καταστροφή καθώς και το πλάτος, έκταση και διάρκεια μιας καταστροφής.

### ***1.3. ΓΣΠ και φυσικές καταστροφές***

Η λήψη ορθών αποφάσεων στην διαχείριση κινδύνων απαιτεί την ταυτόχρονη μελέτη, ποσοτικοποίηση και σύνδεση μεγάλου πλήθους πληροφοριών. Αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) που είναι υπολογιστικά συστήματα τα οποία επιτρέπουν τη διαχείριση διάφορων επιπέδων (layers) πληροφοριών.

Η προσπάθεια κατανόησης και αντιμετώπισης των φυσικών καταστροφών απαιτεί πολλά διαφορετικά είδη δεδομένων όπως παρατηρήσεις Τηλεπισκόπησης, δεδομένα από διαφορετικές πηγές όπως μετρήσεις πεδίου, υπάρχοντες χάρτες και εργαστηριακά δεδομένα. Όλα αυτά τα δεδομένα μπορούν να συνδυαστούν σε ένα ΓΣΠ και να δημιουργηθούν με τον τρόπο αυτό χάρτες επικινδυνότητας, στους οποίους παρουσιάζονται οι επικίνδυνες για μια φυσική καταστροφή περιοχές.

### ***1.4. Οι πυρκαγιές στην Ελλάδα***

Πριν αρχίσει η παρουσίαση των διάφορων τεχνικών Τηλεπισκόπησης που έχουν αναπτυχθεί για την διαχείριση των δασικών πυρκαγιών και την αποτελεσματική αντιμετώπιση του φαινομένου, θεωρείται σκόπιμη η παρουσίαση ορισμένων στατιστικών στοιχείων που καταδεικνύουν τη σπουδαιότητα του φαινομένου και τις καταστροφικές συνέπειες που έχει στη χώρα μας.

#### ***1.4.1. Στατιστικά στοιχεία***

Στην Ελλάδα, σύμφωνα με τα στοιχεία της Εθνικής Στατιστικής Υπηρεσίας, περίπου το 20% της επιφάνειας της γης χαρακτηρίζεται ως δασική έκταση. Το ποσοστό αυτό αντιστοιχεί σε έκταση περίπου 25 εκατομμυρίων στρέμματα. Η μισή όμως μόνο από αυτή την έκταση, δηλαδή τα 12,5 εκατομμύρια στρέμματα, αποτελεί τα παραδοσιακά εννοούμενα δάση, με τα ψηλά δέντρα, που στην χώρα μας είναι κυρίως κωνοφόρα δέντρα. Η υπόλοιπη έκταση καλύπτεται από χαμηλά δέντρα. Επιπρόσθετα των παραπάνω εκτάσεων υπάρχουν περίπου 32 εκατομμύρια στρέμματα μερικώς δασικών εκτάσεων και θάμνων. Τέλος, υπάρχουν περίπου 19 εκατομμύρια στρέμματα αγρολειτουργικών εκτάσεων.

Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία που έχει συλλέξει η Δασική Υπηρεσία από το 1980 έως το 2000, για τον αριθμό των πυρκαγιών, την συνολική καμένη έκταση αλλά και τις αιτίες που οδήγησαν σε αυτές, για το χρονικό διάστημα των 2 τελευταίων δεκαετιών

**Πίνακας 1.2.** Στατιστικά στοιχεία πυρκαγιών στην Ελλάδα (Xanthopoulos 2000)

Έτος	Αριθμός Πυρκαγιών	Συνολική Καμένη Έκταση Δασικών και μη περιοχών (εκταρια)	Καμένη Δασική Έκταση (εκτάρια)	Μη Δασικές Καμένες Εκτάσεις (εκτάρια)	Ανθρώπινα Αίτια	Φυσικά Αίτια
1980	1.207	32.965	4.355	28.610	850	20
1981	1.159	81.417	38.653	42.764	719	12
1982	1.045	27.372	10.843	16.529	695	48
1983	968	19.613	10.907	8.706	545	38
1984	1.284	33.656	12.018	21.639	917	18
1985	1.442	105.450	48.631	56.819	804	38
1986	1.082	24.514	10.109	14.404	596	30
1987	1.266	46.315	13.605	32.711	659	63
1988	1.898	110.501	27.370	83.131	898	49
1989	1.284	42.364	23.600	18.763	599	48
1990	1.322	38.593	21.088	17.506	643	44
1991	1.041	23.574	8.000	15.574	539	18
1992	2.042	66.346	23.194	43.153	868	61
1993	2.406	54.049	24.200	29.849	860	61
1994	1.763	57.908	21.157	36.751	742	84
1995	1.438	27.203	9.645	15.541		
1996	1.757	24.000	7.592	17.718		
1997	3.117	41.839	16.760	25.178		
1998	9.282	112.802				
1999	10.723	19.050				
2000	14.650	167.006				
<b>Μέσος Όρος</b>	<b>2.333</b>	<b>55.073</b>	<b>18.429</b>	<b>29.186</b>		

Παρατηρώντας τον Πίνακα 1.2 διαπιστώνεται πως ενώ το 1980 εκδηλώθηκαν μόνο 1207 πυρκαγιές ο αριθμός αυτός υπερδεκαπλασιάστηκε μετά την πάροδο μιας εικοσαετίας. Υπάρχει πλήθος παραγόντων που συνηγορούν στην αύξηση αυτή. Ενδεικτικά αναφέρεται η οικιστική ανάπτυξη της υπαίθρου καθώς οι κάτοικοι των μεγαλουπόλεων κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών επιζητούν τη δροσιά που προσφέρουν τα ορεινά χωριά με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο κίνδυνος της πυρκαγιάς.

Μια άλλη αιτία είναι η ραγδαία τουριστική ανάπτυξη η οποία οδήγησε στην αναζήτηση χώρων δημιουργίας ξενοδοχειακών μονάδων ή και ενοικιαζόμενων δωματίων. Η έλλειψη μεγάλων εκτάσεων οδήγησε στην αύξηση των τιμών της γης ειδικά στις αναπτυσσόμενες τουριστικές περιοχές. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την μη ύπαρξη ολοκληρωμένης χαρτογράφησης των ιδιοκτησιών (κάτι που επιχειρείται αυτή την εποχή με το Εθνικό Κτηματολόγιο) οδήγησε στην αύξηση των εμπρησμών και εν συνεχεία καταπάτηση των καμένων εκτάσεων.

Σύμφωνα με στοιχεία της Δασικής Υπηρεσίας, κατά την περίοδο 1968 έως 1993, τρεις είναι οι κύριες αιτίες εμφάνισης των δασικών πυρκαγιών: (1) τα ανθρώπινα ακούσια σφάλματα, (2) οι εμπρησμοί και (3) άγνωστα αίτια. Τα ακούσια ανθρώπινα σφάλματα όπως το άναμα του τσιγάρου, η καύση σκουπιδιών, οι εργαζόμενοι στην ύπαιθρο προκάλεσαν το 36,00% των πυρκαγιών της περιόδου αυτής. Οι εμπρησμοί καταλαμβάνουν το 29,20% των αιτιών πρόκλησης πυρκαγιών, ενώ το 28,90% των πυρκαγιών δεν έχουν αποδοθεί σε κάποιο συγκεκριμένο αίτιο. Σε φυσικά αίτια (κεραυνοί) αποδίδεται το 2,40% των πυρκαγιών, ενώ το υπόλοιπο 3,50% των πυρκαγιών προκαλείται από ατυχήματα, όπως βραχυκύκλωμα ηλεκτρικών καλωδίων, χρήση εκρηκτικών κ.ά.

Στον Πίνακα 1.3 παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης πυρκαγιών τους διάφορους μήνες, με δεδομένα της Δασικής Υπηρεσίας από το 1964 έως το 1994. Παρατηρούμε ότι οι μήνες Ιούλιος, Αύγουστος και Σεπτέμβριος κάθε έτους είναι αυτοί κατά την διάρκεια των οποίων εκδηλώνονται συχνότερα οι πυρκαγιές. Οι καιρικές συνθήκες ευνοούν τους μήνες αυτούς την εκδήλωση και γρήγορη εξάπλωσή τους.

**Πίνακας 1.3.** Μηνιαία συχνότητα εμφάνισης πυρκαγιών (Δασική υπηρεσία, 2000).

Μήνας	Ποσοστό πυρκαγιών (%)
Ιανουάριος	1,40
Φεβρουάριος	2,80
Μάρτιος	4,30
Απρίλιος	3,60
Μάϊος	2,60
Ιούνιος	6,50
Ιούλιος	15,70
Αύγουστος	24,40
Σεπτέμβριος	22,80
Οκτώβριος	12,70
Νοέμβριος	2,60
Δεκέμβριος	0,80
ΣΥΝΟΛΟ	100,00

#### 1.4.2. Επιπτώσεις των πυρκαγιών

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται στοιχεία με τα οποία καταδεικνύεται η σοβαρότητα του φαινομένου και οι επιπτώσεις που έχουν οι πυρκαγιές στην οικονομική και κοινωνική ζωή της χώρας.

Οι πυρκαγιές εκτός από την δεδομένη καταστροφή περιουσιών (είτε ιδιωτικών είτε δημοσίων), αρκετά συχνά προκαλούν την απώλεια ανθρώπινων ζωών. Το 1977 η περίοδος των πυρκαγιών σημαδεύτηκε από τον θάνατο ενός ανθρώπου στην πυρκαγιά του Παρνασσού εκείνης της χρονιάς.

Την δεκαετία του 1980, 37 ανθρώπινες ζωές χάθηκαν από τις πυρκαγιές εκείνης της περιόδου. Στον αριθμό αυτό περιλαμβάνονται τόσο οι απώλειες ανθρώπων που παγιδεύτηκαν στην πυρκαγιά όσο και αυτών που σκοτώθηκαν την ώρα της προσπάθειας κατάσβεσής της (πιλότοι, πυροσβέστες). Πέντε πιλότοι σκοτώθηκαν από το 1973 κατά την διάρκεια των προσπαθειών κατάσβεσης, ενώ μεγάλος είναι και ο αριθμός των τραυματιών. Οικονομικές απώλειες, που βέβαια έχουν πολύ μικρότερη σημασία όταν συγκρίνονται με τις απώλειες ανθρώπινων ζωών, προκλήθηκαν και από την καταστροφή τεσσάρων πυροσβεστικών αεροπλάνων CL-215 και μονοθέσιων PZL M-18 (Xanthopoulos, 2000).

Κατά την διάρκεια της δεκαετίας του '90, η πυρκαγιά στην Ικαρία προκάλεσε τον θάνατο 13 ανθρώπων, ενώ η πρόσκρουση ενός ελικοπτέρου στα ηλεκτροφόρα καλώδια κατά την διάρκεια κατάσβεσης μιας πυρκαγιάς προκάλεσε τον θάνατο 3 πιλότων και 7 πυροσβεστών το 1994. Άλλοι 4 άνθρωποι σκοτώθηκαν σε πυρκαγιά κοντά στην Αθήνα το 1998, ενώ η πυρκαγιά στην Χίο το 1999 εγκλώβισε 3 δασοπυροσβέστες. Το 2000 μια πυρκαγιά κοντά στα Ελληνο- Αλβανικά σύνορα στοίχισε την ζωή σε 7 ανθρώπους.

Από τα παραπάνω είναι σαφές πως η δασική πυρκαγιά ως φαινόμενο είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο καθώς μπορεί να προκαλέσει άμεσα τον θάνατο τόσο σε απλούς πολίτες όσο και στα μέλη των δυνάμεων κατάσβεσης. Σοβαρές επιπτώσεις όμως οι πυρκαγιές έχουν και στην απώλεια περιουσιών και στην καταστροφή κτιρίων.

Το 1995 η πυρκαγιά που εκδηλώθηκε στην Πεντέλη και κατέστρεψε περίπου 6.500 εκτάρια δασικής έκτασης, προκάλεσε την ολοκληρωτική καταστροφή περίπου 100 κτιρίων τα περισσότερα εκ των οποίων ήταν κατοικίες. Μια άλλη μεγάλη πυρκαγιά στην Πεντέλη, το 1998, κατέστρεψε ακόμα περισσότερα σπίτια, ενώ η συνολική δασική έκταση που καταστράφηκε ήταν περίπου 7.500 εκτάρια.

Εκτός όμως από την καταστροφή των περιουσιών υπάρχουν και σοβαρές οικονομικές επιπτώσεις στην αγροτικές καλλιέργειες που βρίσκονται κοντά στις δασικές εκτάσεις. Ιδιαίτερα σημαντικά είναι τα περιβόλια με οπωροφόρα τα οποία μπορεί να καταστραφούν ολοκληρωτικά. Στις απώλειες

της άμεσης παραγωγής πρέπει να προστεθεί ο χρόνος επαναδημιουργίας της καρποφορίας των καμένων οπωροφόρων. Τα ελαιόδεντρα λόγω του εύφλεκτου ξύλου τους υπόκεινται σε ολοκληρωτική καταστροφή σε περίπτωση πυρκαγιάς.

### **1.5. Σκοπός της Διατριβής**

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκε η έννοια της φυσικής καταστροφής ειδικά των πυρκαγιών, η εφαρμογή των σύγχρονων τεχνικών στην προσπάθεια αντιμετώπισής της ενώ παρουσιάστηκαν και στατιστικά στοιχεία που καταδεικνύουν τις επιπτώσεις που έχουν οι πυρκαγιές στην Ελλάδα.

Σκοπός της διατριβής αυτής είναι η παρουσίαση της μεθοδολογίας που πρέπει να ακολουθηθεί προκειμένου να αναπτυχθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών, οι οποίες συνιστούν ιδιαίτερα μεγάλη απειλή για τη χώρα μας. Ένα τέτοιο σύστημα θα έχει την δυνατότητα (1) σωστής κατανομής των διαθέσιμων μέσων πυρόσβεσης (πυρ/κοί κρουνοί, χώροι απόθεσης υλικών), (2) επιλογής βέλτιστων θέσεων δημιουργίας αντιπυρικών ζωνών, (3) πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς με μαθηματικά μοντέλα, (4) ανίχνευση της πυρκαγιάς σε πραγματικό χρόνο και άμεση σήμανση συναγερμού, (5) ενημέρωση, καθοδήγηση και συντονισμός των ομάδων κατάσβεσης για την εξέλιξη της πυρκαγιάς και (6) αποτίμηση της καμένης έκτασης και προγραμματισμό της αναδάσωσης.

Η διατριβή αποτελεί μια μελέτη σκοπιμότητας για την ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος σε τοπικό επίπεδο στη χώρα μας, με εφαρμογή στο δάσος του Ταυγέτου στην Σπάρτη. Μέσω της διατριβής θα αναλυθούν όλες οι τεχνικές και θα επιλεγούν οι βέλτιστες με βάση τεχνικοοικονομικά κριτήρια. Με την ολοκλήρωση της διατριβής οι τοπικοί παράγοντες θα έχουν στα χέρια τους ένα εργαλείο στο οποίο θα μπορέσουν να στηριχθούν ώστε να εφαρμόσουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα προστασίας του δάσους του Ταυγέτου.

Πρόκειται για κάτι πρωτοποριακό για τα ελληνικά δεδομένα καθώς μέχρι σήμερα οι προσπάθειες αντιμετώπισης των δασικών πυρκαγιών στηρίζονταν σε εμπειρικές μεθόδους και η εφαρμογή σύγχρονων τεχνικών μέσω ενός ολοκληρωμένου συστήματος είναι σε πρώιμο στάδιο. Επίσης, η γνώση ολόκληρης της διαδικασίας ορθολογικής αντιμετώπισης των δασικών πυρκαγιών από το στάδιο της προετοιμασίας μέχρι το στάδιο της αποτίμησης της καταστροφής είναι κάτι το οποίο θα αποκομίσει η τοπική κοινωνία με την μελέτη της παρούσας διατριβής.

Στα επόμενα κεφάλαια της διατριβής παρουσιάζονται τα στάδια μελέτης, ανάπτυξης και υλοποίησης ενός συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών: στάδιο προετοιμασίας, το στάδιο της ανίχνευσης και διαχείρισης της κρίσης και τέλος το στάδιο της αποτίμησης της καταστροφής.

## ***Κεφάλαιο 2- Χάρτες Επικινδυνότητας – Μοντέλα Πρόβλεψης***

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι έννοιες των χαρτών επικινδυνότητας και των μοντέλων πρόβλεψης της διάδοσης των δασικών πυρκαγιών, ο τρόπος με τον οποίο δημιουργούνται καθώς επίσης και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους. Το Κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνει τέσσερις ενότητες: το στάδιο της συλλογής των δεδομένων, οι χάρτες επικινδυνότητας και τα μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης των δασικών πυρκαγιών ενώ ολοκληρώνεται στην τέταρτη ενότητα γίνεται η παράθεση των οικονομικών στοιχείων που απαιτούνται για την υλοποίηση όσων έχουν αναφερθεί πρωτύτερα.

### ***2.1. Εφαρμογή ΓΠΣ στο στάδιο προετοιμασίας***

Το πρώτο βήμα εφαρμογής των ΓΠΣ στην αντιμετώπιση, διαχείριση φυσικών καταστροφών είναι η δημιουργία μοντέλου πρόβλεψης του τρόπου διάδοσης της φυσικής καταστροφής που μελετάται δηλαδή της δασικής πυρκαγιάς. Η ακριβής πρόβλεψη του τρόπου λειτουργίας και μετάδοσης των δασικών πυρκαγιών είναι ιδιαίτερα δύσκολα καθώς εξαρτάται από πλήθος φυσικών παραμέτρων (π.χ. κλιματολογικές συνθήκες, ταχύτητα και διάδοση του ανέμου, τοπογραφία, καύσιμη ύλη κ.ά).

Η δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης στηρίζεται στην προσπάθεια απεικόνισης των φυσικών φαινομένων με την εφαρμογή κατάλληλων μαθηματικών αλγορίθμων. Είναι επομένως φυσικό να πρέπει να γίνουν ορισμένες παραδοχές ενώ πάντα εξαρτάται και από τα διαθέσιμα δεδομένα.



Παρόλα αυτά ένα σωστό μοντέλο μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες αναφορικά με τον τρόπο διάδοσης του φυσικού φαινομένου.

Στις δασικές πυρκαγιές έχουν δημιουργηθεί μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης και εξάπλωσης του φαινομένου. Τα αποτελέσματα που δίνουν αυτά τα μοντέλα έχουν συγκριθεί με πραγματικά συμβάντα ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία τους με ικανοποιητικά αποτελέσματα (Finney et al 1999, Fujioku 1999).

Εάν ήταν δυνατή η πρόβλεψη της διάδοσης μιας πυρκαγιάς τα οφέλη τόσο σε κοινωνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο θα ήταν τεράστια καθώς η αντιμετώπισή της θα ήταν άμεση και αποτελεσματική. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να ελεγχθεί το κατά πόσο είναι δυνατό να δημιουργηθούν αξιόπιστοι χάρτες επικινδυνότητας μιας δασικής έκτασης αλλά και μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης των πυρκαγιών

Η δημιουργία των χαρτών επικινδυνότητας θα έχει ως αποτέλεσμα το κοινωνικό σύνολο να επαγρυπνεί και να βρίσκεται σε εγρήγορση ενώ αναφορικά με τα μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς η διατριβή επικεντρώνεται σε εθνικό επίπεδο εξετάζοντας την περίπτωση του δάσους του Ταΰγétου στην Ελλάδα.

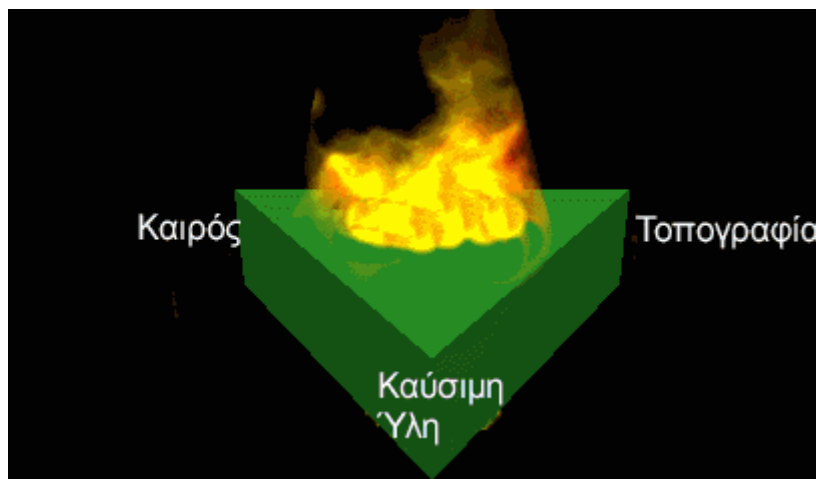
Για να προσδιοριστεί η επικινδυνότητα και να δημιουργηθεί το μοντέλο πρόβλεψης της διάδοσης των πυρκαγιών πρέπει να προηγηθεί η συλλογή των απαραίτητων δεδομένων. Στην επόμενη ενότητα περιγράφονται οι πληροφορίες που χρειάζονται ενώ παρουσιάζονται και οι δυνατοί τρόποι ανάκτησής τους.

## **2.2. Συλλογή δεδομένων**

Για να είναι δυνατή η δημιουργία χαρτών στους οποίους θα παρουσιάζονται οι περιοχές που εμφανίζουν δυναμικό εκδήλωσης πυρκαγιάς πρέπει να έχει προηγηθεί η συλλογή των κατάλληλων δεδομένων. Η διαδικασία αυτή είναι συνήθως χρονοβόρα αλλά όταν γίνει σωστά και υπεύθυνα μπορεί να εγγυηθεί για την ποιότητα και αξιοπιστία του τελικού προϊόντος.

Ομοίως για τη δημιουργία μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς εκτός από τον μαθηματικό αλγόριθμο που θα χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση πρέπει να υπάρχουν και άλλες χρήσιμες πληροφορίες (καύσιμη ύλη, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, κ.ά.) οι οποίες τις περισσότερες φορές είναι σε μεγάλο βαθμό οι ίδιες με αυτές που απαιτούνται για την δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας.

Η έναρξη μιας πυρκαγιάς προκαλείται από μια αιτία (π.χ. ανθρώπινο λάθος, κεραυνοί) και στην συνέχεια η διάδοσή της εξαρτάται από τον συνδυασμό τριών, κυρίως παραμέτρων: (1) τη τοπογραφία της περιοχής, (2) τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν εκείνη την στιγμή καθώς επίσης και (3) την ποιότητα και έκταση της καύσιμης ύλης.



**Σχήμα 2.1.** Το Τρίγωνο του Περιβάλλοντος Πυρκαγιάς περιγράφει την σχέση μεταξύ των παραμέτρων που επιδρούν στη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς. Η ισορροπία ή όχι του καιρού, της τοπογραφίας και της καύσιμης ύλης υπαγορεύει τον κίνδυνο πυρκαγιάς για μια συγκεκριμένη περιοχή.

Πολλές φορές όταν δημιουργείται ένα σύστημα διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών (στο οποίο περιλαμβάνεται η εκτίμηση επικινδυνότητας και η μοντελοποίηση της διάδοσης) προτείνονται τεχνικές βελτιστοποίησης της προσπάθειας κατάσβεσής της. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να υπάρχουν και επιπρόσθετες πληροφορίες, όπως για παράδειγμα το οδικό δίκτυο, οι πηγές νερού, τα διαθέσιμα μέσα κατάσβεσης, το διαθέσιμο ανθρώπινο δυναμικό, οι οικισμοί, κ.ά.

Στη συνέχεια περιγράφονται αναλυτικά οι πληροφορίες εκείνες που απαιτούνται για την δημιουργία χαρτών εκτίμησης επικινδυνότητας και μοντέλων πρόβλεψης διάδοσης των δασικών πυρκαγιών.

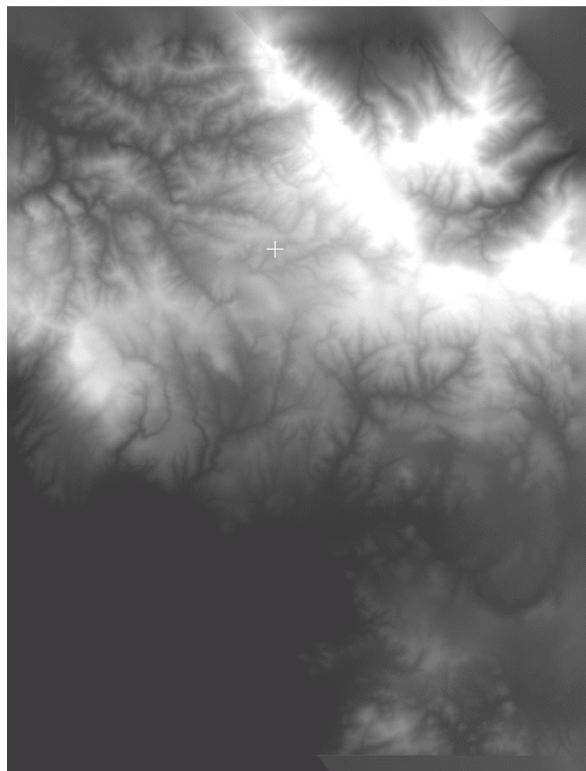
### 2.2.1 Τοπογραφία

Η τοπογραφία της περιοχής μελέτης είναι μια βασική παράμετρος στην προσπάθεια αντιμετώπισης μιας πυρκαγιάς. Διαφορετικά διαδίδεται μια πυρκαγιά σε μια επίπεδη περιοχή και διαφορετικά σε ένα βουνό. Επίσης, ανάλογα με το που βρίσκεται η περιοχή μελέτης προτείνονται διαφορετικοί τρόποι κατάσβεσης. Για παράδειγμα, η ύπαρξη στην περιοχή μελέτης κατοικημένων περιοχών (οικισμών), έχει ως αποτέλεσμα οι δυνάμεις πυρόσβεσης να δίνουν προτεραιότητα στην προστασία

των οικισμών αυτών ώστε να αποφευχθούν ανθρώπινες απώλειες και έτσι απαιτείται η συνδρομή των πλέον αποτελεσματικών πυροσβεστικών μέσων (αεροπλάνα, ελικόπτερα, κ.ά).

Η λογική της δημιουργίας χαρτών εκτίμησης επικινδυνότητας και μοντέλων πρόβλεψης της διάδοσης μιας δασικής πυρκαγιάς είναι η πλήρης εκμετάλλευση των σύγχρονων δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτό σημαίνει πως και οι πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία θα πρέπει να βρίσκονται σε ψηφιακή μορφή.

Για να γίνει αυτό θα πρέπει να δημιουργηθούν Ψηφιακά Μοντέλα Υψομέτρων (ΨΜΥ). Πρόκειται ουσιαστικά για την τρισδιάστατη αναπαράσταση της περιοχής μελέτης. Σε κάθε ισοϋψή γραμμή (ή εύρος ισοϋψών γραμμών ανάλογα με το τι θέλει ο χρήστης) δίδεται διαφορετικό χρώμα. Στο Σχήμα 2.2. παρουσιάζεται ένα ΨΜΥ διαχωριστικής ικανότητας (δηλαδή γεωμετρικής ανάλυσης) 10m της κεντρικής Εύβοιας όπως προέκυψε από ψηφιοποίηση του φύλλου χάρτη 1:50.000 “Ψαχνά” της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, έκδοση 1990.



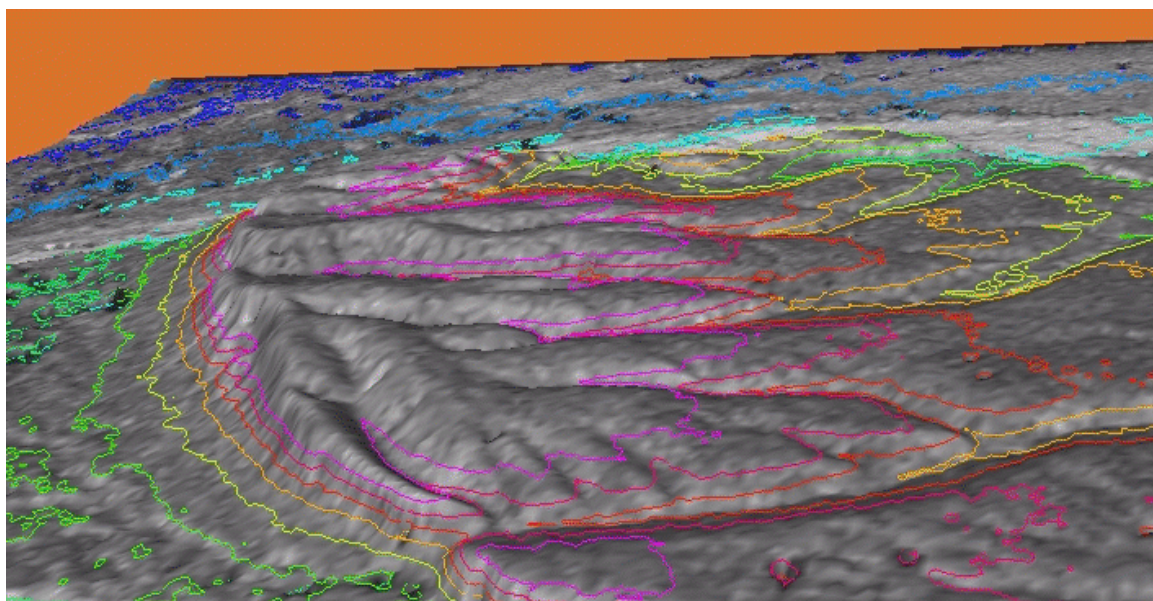
**Σχήμα 2.2.** Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων (πηγή <http://www.iis.gr/asterismos/imag.htm>)

Ο απλούστερος τρόπος δημιουργίας ενός ΨΜΥ είναι η ψηφιοποίηση ενός ήδη υπάρχοντος χάρτη. Το πρόβλημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι η ακρίβεια του μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια του βασικού χάρτη που χρησιμοποιείται για την ψηφιοποίηση. Προφανώς με την τεχνική αυτή, για την Ελλάδα, μπορούν να ψηφιοποιηθούν χάρτες κλίμακας μέχρι 1:5.000.

Η τελική επιλογή των χαρτών που θα χρησιμοποιηθούν εξαρτάται από τον μελετητή ανάλογα με την ακρίβεια που θέλει να προσδώσει στο DEM.

Μια εναλλακτική μορφή δημιουργίας DEM είναι η χρησιμοποίηση της συμβολομετρίας με Radar SAR (Synthetic Aperture Radar) (<http://www.asf.alaska.edu/step/insar/>).

Πρόκειται για μια τεχνική πολύ υψηλής ακρίβειας και η οποία έχει χρησιμοποιηθεί για δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Υψομέτρων. Σε σύγκριση με την προηγούμενη τεχνική δημιουργίας ΨΜΥ είναι πιο ακριβή (λεπτομέρειες στη συνέχεια) αλλά μπορεί να συνδυάσει και τις πληροφορίες που λαμβάνονται από την δορυφορική εικόνα Radar, αν πρόκειται για δορυφορική συμβολομετρία καθώς η τεχνική της συμβολομετρίας μπορεί να εφαρμοστεί και σε πτήσεις με αεροπλάνο. Στο Σχήμα 2.3. παρουσιάζεται το ΨΜΥ μιας περιοχής στην Αλάσκα, όπως προέκυψε με την χρήση δύο εικόνων του δορυφόρου ERS-1 του 1991 και εφαρμογή τεχνικών συμβολομετρίας.



**Σχήμα 2.3.** Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων από συμβολομετρία SAR (πηγή [http://www.asf.alaska.edu/step/insar/abstracts/rob\\_fig2.html](http://www.asf.alaska.edu/step/insar/abstracts/rob_fig2.html))

Γενικά για τη δημιουργία ενός Ψηφιακού Μοντέλου Υψομέτρων χρειάζονται μόνο οι συντεταγμένες των σημείων της επιφάνειας της περιοχής μελέτης στις τρεις διαστάσεις. Αυτές μπορούν να προκύψουν ακόμα και με απλές τοπογραφικές μετρήσεις με ολικούς γεωδαιτικούς σταθμούς (Total stations), με δορυφορικά συστήματα εντοπισμού (GPS) αλλά οι δύο τεχνικές που αναφέρθηκαν (ψηφιοποίηση χαρτών, συμβολομετρία radar) είναι αυτές που χρησιμοποιούνται συνήθως ειδικά όταν σκοπός μας είναι η κάλυψη μιας μεγάλης επιφάνειας (π.χ. σε εθνικό επίπεδο ή σε επίπεδο περιφέρειας) εδάφους.

Εκτός από το υψόμετρο οι πληροφορίες που αντλείται από ένα ΨΜΥ και βρίσκουν εφαρμογή στην περίπτωση των δασικών πυρκαγιών είναι για την κλίση και τον προσανατολισμό του εδάφους, στην περιοχή μελέτης. Η κλίση είναι καθοριστικός παράγοντας για την ταχύτητα μετάδοσης της πυρκαγιάς ενώ και ο προσανατολισμός του, παρέχει πληροφορίες σχετικά με την έκθεση της βλάστησης στις ηλιακές ακτίνες, κάτι που έχει μεγάλη επίδραση στην περιεχόμενη, στην βλάστηση, υγρασία.

Σε ένα ΓΣΠ που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση πυρκαγιών εκτός από το Ψηφιακό Μοντέλο Υψομέτρων θα πρέπει να περιέχονται και άλλα στοιχεία της περιοχής μελέτης όπως για παράδειγμα οι υπάρχοντες δρόμοι, το είδος του εδάφους, χάρτης του ιστορικού πυρκαγιών στην περιοχή, οι θέσεις των μέσων κατάσβεσης, οι θέσεις των πηγών και αποθεμάτων νερού και γενικά ότι πληροφορία κρίνει ο χρήστης ότι είναι απαραίτητη για την ορθότερη λειτουργία του..

### **2.2.2. Καύσιμη ύλη**

Οι παράμετροι που αφορούν στην βλάστηση, στην προσπάθεια κατανόησης και αντιμετώπισης της πυρκαγιάς, χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής καθώς δίνουν ουσιαστικά το δυναμικό εκδήλωσης μιας πυρκαγιάς, παρέχουν δηλαδή την καύσιμη ύλη. Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται από τα μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς και επομένως πρέπει να γίνει η συλλογή εκείνων των πληροφοριών που απαιτεί το εκάστοτε χρησιμοποιούμενο μοντέλο.

Οι πληροφορίες επομένως που πρέπει να συλλέξει κανείς στην αρχή της μελέτης του είναι η συνολική ποσότητα βιομάζας που βρίσκεται στην περιοχή μελέτης (είτε πάνω από το έδαφος είτε σε αυτό καθώς και στις δύο θέσεις ευνοείται η εξάπλωση της πυρκαγιάς) αλλά και η λεπτομερής κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων δηλαδή η ποσότητα της βιομάζας ανά σωματίδιο καύσιμης ύλης. Επίσης, η θέση της καύσιμης ύλης, δηλαδή η οριζόντια και κάθετη συνέχειά της, το πόσο συμπαγής είναι καθώς και η χημική σύσταση της βιομάζας που δίνει πληροφορίες σχετικά με την περιεχόμενη ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Τέλος, το ποσοστό της περιεχόμενης υγρασίας και η θερμοκρασία της καύσιμης ύλης.

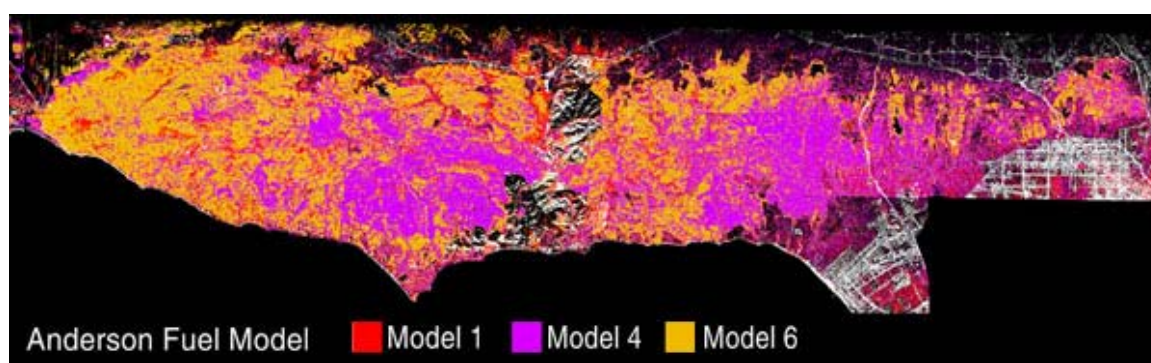
Από τις παραμέτρους που απαιτούνται συνήθως, γίνεται αντιληπτό πως η συλλογή των πληροφοριών σχετικά με την καύσιμη ύλη και η δημιουργία των λεγόμενων μοντέλων καύσιμης ύλης (fuel models) απαιτεί ίσως το μεγαλύτερο κόπο σε σχέση με τα υπόλοιπα απαραίτητα στοιχεία. Διακρίνονται τρεις, κυρίως, μεθοδολογίες δημιουργίας μοντέλων καύσιμης ύλης: οι επί



τόπου μετρήσεις, η χρησιμοποίηση παλαιότερων μοντέλων και η χρησιμοποίηση δεκτών Τηλεπισκόπησης.

Παραδοσιακές μέθοδοι, που στηρίζονται στην επί τόπου δειγματοληψία και την μετεωρολογία, έχουν επεκταθεί και περιλαμβάνουν τεχνικές Τηλεπισκόπησης και ΓΣΠ. Η Τηλεπισκόπηση διαδραματίζει συνεχώς αυξανόμενο ρόλο στη χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης και την παρακολούθηση της διαχρονικής μεταβολής της.

Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση της Τηλεπισκόπησης στην χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης είναι μέσω της ταξινόμησης της εικόνας. Κατά αυτόν τον τρόπο τα τηλεπισκοπικά δεδομένα ταξινομούνται και δημιουργούν ένα θεματικό χάρτη βλάστησης της περιοχής μελέτης. Δύο συνηθισμένα συστήματα ταξινόμησης καύσιμης ύλης είναι αυτό του Anderson και το Εθνικό Σύστημα Δείκτη Επικινδυνότητας Πυρκαγιάς των ΗΠΑ (National Fire Danger Rating System - NFDRS). Τα συστήματα αυτά αναλύονται σε επόμενη παράγραφο. Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται ο συνδυασμός μιας εικόνας από αεροπλάνο του φασματόμετρου AVIRIS (Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer) και του μοντέλου του Anderson. Παρατηρείται πως είναι δυνατή η ταξινόμηση και ομαδοποίηση των τμημάτων μιας περιοχής μελέτης με βάσει την καύσιμη ύλη με την χρήση δεδομένων Τηλεπισκόπησης. Κάθε τέτοιο τμήμα έχει διαφορετικό τρόπο συμπεριφοράς σε μια δασική πυρκαγιά και έτσι ο μελετητής μπορεί να εκτιμήσει τον κίνδυνο να εκδηλωθεί ή διαδοθεί η δασική πυρκαγιά σε μια περιοχή ανάλογα με την ποιότητα της καύσιμης ύλης που αυτή περιλαμβάνει.



**Σχήμα 2.4.** Το αποτέλεσμα του συνδυασμού μιας εικόνας AVIRIS και του μοντέλου Anderson για τα βουνά της Santa Monica στις ΗΠΑ. (πηγή <http://www.ices.ucsb.edu/resac/resac.html>)

Μια άλλη προσέγγιση είναι ο άμεσος προσδιορισμός της καύσιμης ύλης από δεδομένα Τηλεπισκόπησης δηλαδή εικόνες Τηλεπισκόπησης. Για παράδειγμα, ο λόγος της πυκνότητας πράσινων φυλλωμάτων σε σχέση με τα νεκρά υλικά είναι σημαντική παράμετρος στην δημιουργία πυρκαγιάς. Μια μέθοδος εκτίμησης των ζωντανών και νεκρών συστατικών των φυλλωμάτων των

δέντρων είναι η χωρική ανάλυση αναμίξεων (Spatial Mixture Analysis) ενώ βέβαια υπάρχουν και οι κλασσικοί δείκτες βλάστησης (NDVI, SAVI κ.ά) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η μεθοδολογία προσδιορισμού των παραμέτρων της καύσιμης ύλης εξαρτάται από τον χρήστη και επομένως η επιλογή είναι καθαρά υποκειμενική απόφαση με δεδομένο βέβαια ότι ο χρήστης έχει γνώση όλων των εναλλακτικών λύσεων που έχει στη διάθεσή του.

### 2.2.3. Καιρικές συνθήκες

Είναι προφανές ότι η γνώση των μετεωρολογικών δεδομένων μιας περιοχής είναι απαραίτητη τόσο στην προσπάθεια εκτίμησης του κινδύνου πυρκαγιάς σε αυτήν, όσο και στη πρόβλεψη της κίνησής της. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η νεφοκάλυψη καθώς και ο χρόνος μετά την έναρξη της πυρκαγιάς.

Για την συλλογή των δεδομένων αυτών μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε κατάλληλα μετεωρολογικά όργανα στην περιοχή μελέτης, είτε οι προβλέψεις του καιρού. Για μελέτες ευρείας κλίμακας (π.χ. σε εθνικό επίπεδο) η προμήθεια νέων μετεωρολογικών οργάνων είναι ασύμφορη. Αντίθετα σε περιορισμένης κλίμακας εφαρμογές (π.χ. δάσος Ταυγέτου) η ίδρυση κατάλληλων μετεωρολογικών σταθμών είναι αποδοτικότερη δίνοντας αποτελέσματα καλύτερης αξιοπιστίας σε σχέση με τις γενικές προβλέψεις του καιρού στην ευρύτερη περιοχή.

Μια άλλη πολύ σημαντική παράμετρος των καιρικών συνθηκών είναι το πώς αυτές επιδρούν στη διάδοση της δασικής πυρκαγιάς. Επειδή η αλληλεπίδραση των καιρικών συνθηκών και της καύσιμης ύλης δεν είναι γραμμικά φαινόμενα έχουν δημιουργηθεί κατάλληλοι αλγόριθμοι οι οποίοι προσπαθούν να μοντελοποιήσουν αυτά τα δυναμικά φαινόμενα και να βοηθήσουν στην πρόβλεψη της διάδοσης της πυρκαγιάς. Οι κυριότεροι από τους αλγορίθμους αυτούς θα αναφερθούν στο Κεφάλαιο 3.

Αφού παρουσιάστηκαν οι κυριότερες παράμετροι που πρέπει να εξεταστούν κατά την διάρκεια της προετοιμασίας στην επόμενη παράγραφο γίνεται εκτενής αναφορά στον τρόπο δημιουργίας χαρτών εκτίμησης επικινδυνότητας πυρκαγιών, ενώ αναφέρονται και μερικά παραδείγματα τέτοιων χαρτών.

### **2.3. Χάρτες επικινδυνότητας**

Στην προηγούμενη παράγραφο παρουσιάστηκαν τα στοιχεία που είναι απαραίτητα τόσο για την δημιουργία ενός θεματικού χάρτη για τις περιοχές επικινδυνότητας για εκδήλωση πυρκαγιάς, όσο για την προσπάθεια κατανόησης και μοντελοποίησης της συμπεριφοράς της.

Ποια είναι όμως η διαδικασία που ακολουθείται για τη δημιουργία συστημάτων εκτίμησης επικινδυνότητας πυρκαγιών; Ποια στοιχεία πρέπει να συνδυαστούν και ποια είναι τα θεωρητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται; Στα ερωτήματα αυτά καλείται να απαντήσει η παρούσα παράγραφος.

Τα βασικά στάδια που πρέπει να γίνουν για την κατασκευή χαρτών επικινδυνότητας της περιοχής μελέτης περιλαμβάνουν, αρχικώς, την δημιουργία ενός ΨΜΥ. Η ακρίβεια του ΨΜΥ ορίζεται από τον χρήστη, ανάλογα με τις απαιτήσεις που το σύστημα έχει και εάν πρόκειται για εθνικό ή τοπικό σύστημα προσδιορισμού της επικινδυνότητας. Στη συνέχεια πρέπει να δημιουργηθεί ένα ΓΣΠ με όλα τα απαιτούμενα για τον χρήστη δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά περιγράφηκαν σε προηγούμενη ενότητα και περιλαμβάνουν τις γεωλογικές δομές της περιοχής μελέτης, το οδικό δίκτυο, τις διαθέσιμες πηγές νερού, τα διαθέσιμα μέσα πυρόσβεσης και φυσικά τις πληροφορίες σχετικά με την καύσιμη ύλη, τους οικισμούς στην περιοχή μελέτης κ.ά.

Το να περιγραφεί ο τρόπος δημιουργίας ενός ΓΣΠ ξεφεύγει από τον σκοπό της παρούσας παραγράφου. Επομένως το θέμα δεν θα παρουσιαστεί αναλυτικά. Ο αναγνώστης μπορεί να πάρει μια ιδέα μέσα από τα παραδείγματα που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Η εκδήλωση μιας δασικής πυρκαγιάς εξαρτάται από πλήθος παραγόντων που έχουν αναλυθεί σε προηγούμενες παραγράφους. Το είδος όμως της χλωρίδας που υπάρχει σε κάθε περιοχή δηλώνει το δυναμικό εκδήλωσης πυρκαγιάς. Για παράδειγμα, όταν συντρέχουν οι υπόλοιποι παράγοντες είναι οι ίδιοι (π.χ. μετεωρολογικές συνθήκες, τοπογραφία), είναι περισσότερο πιθανό να εκδηλωθεί πυρκαγιά σε μια περιοχή που η χλωρίδα της, έχει υψηλό ποσοστό καύσιμης ύλης από ότι σε μια περιοχή που η καύσιμη ύλη της χλωρίδας είναι σε μικρότερα επίπεδα. Για τον λόγο αυτό είναι σημαντικό να παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο επιλέγονται και εισάγονται σε ένα σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας πυρκαγιών οι πληροφορίες σχετικά με την καύσιμη ύλη. Πρόκειται για ένα τμήμα του όλου μοντέλου ιδιαίτερα κρίσιμο και το οποίο διαφοροποιείται ανάλογα με τον χρήστη και την περιοχή μελέτης.



### **2.3.1. Μοντέλα καύσιμης ύλης**

Με τον όρο «μοντέλο καύσιμης ύλης» ουσιαστικά περιγράφονται εκείνες οι παράμετροι της βλάστησης που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία συστημάτων εκτίμησης του δυναμικού εκδήλωσης της πυρκαγιάς. Όσο καλύτερο είναι το μοντέλο αυτό τόσο πιο αξιόπιστο γίνεται το σύστημα εκτίμησης.

Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου είναι κάτι το οποίο εξαρτάται από τον μελετητή αλλά και την περιοχή μελέτης. Υπάρχουν μοντέλα τα οποία έχουν δημιουργηθεί για συγκεκριμένες περιοχές ή χώρες, για τα οποία όμως υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής και σε άλλες περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά βλάστησης.

Τα μοντέλα καύσιμης ύλης που έχουν αναπτυχθεί, έχουν άμεση σχέση με μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς και ουσιαστικά δημιουργούνται ώστε να είναι συμβατά σε κάποιο τέτοιο μοντέλο. Μερικά από αυτά τα μοντέλα είναι εκείνα που χρησιμοποιούνται από το Αμερικάνικο Εθνικό Σύστημα Εκτίμησης Επικινδυνότητας Πυρκαγιάς (US NFDRS), τα μοντέλα του Anderson κ.ά και τα οποία περιγράφονται στη συνέχεια.

#### **2.3.1.1. Μοντέλα Anderson**

Το 1982, ο Anderson (Anderson, 1982) περιέγραψε 13 σταθερούς τύπους καύσιμης ύλης. Τα μοντέλα καύσιμης ύλης είναι απλά εργαλεία που βοηθούν τον χρήστη να κατανοήσει με κάποιο αντικειμενικό τρόπο την συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Διαφοροποιήσεις στα μοντέλα είναι δυνατές με μεταβολές στον λόγο ενεργής/ανενεργής βλάστησης, τη καύσιμη ύλη και την επίδραση της ξηρασίας.

Η χρησιμοποίηση των μοντέλων Anderson είναι ευρέως διαδεδομένη καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε περιοχή. Αρκεί να έχει γίνει μια ταξινόμηση της βλάστησης (μέσω, για παράδειγμα, του δείκτη NDBI που είναι δείκτης βλάστησης που προκύπτει από επεξεργασία δορυφορικών εικόνων) και στην συνέχεια αντιστοίχιση κάθε τύπου βλάστησης με ένα από τα μοντέλα Anderson.

Στη συνέχεια ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή των 13 μοντέλων τα οποία χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και κατανόηση της πυρκαγιάς και των επιδράσεων αυτής στο έδαφος.

*Ομάδα Χορταριού*

**Μοντέλο 1.** Η διάδοση της πυρκαγιάς ελέγχεται από τα πολύ καλά, πορώδη και συνεχή ποώδη καύσιμα. Πρόκειται για επιφανειακές πυρκαγιές που κινούνται τάχιστα μέσω της χλόης. Η παρουσία ξύλων ή θάμνων είναι ελάχιστη.

**Μοντέλο 2.** Η διάδοση της πυρκαγιάς γίνεται κυρίως μέσω ώριμου ή σχεδόν ώριμου γρασσιδιού, όπου τα ξύλα ή οι θάμνοι καλύπτουν περίπου 30 με 60% της ανοικτής περιοχής. Πρόκειται πάλι για επιφανειακές πυρκαγιές που μπορεί να αυξηθούν σε ένταση καθώς συναντούν και καύσιμη ύλη από άλλα είδη.

**Μοντέλο 3.** Οι πυρκαγιές σε αυτήν την ομάδα χλόης εμφανίζει τις μεγαλύτερες ταχύτητες διάδοσης και έντασης υπό την επίδραση του ανέμου.

*Ομάδα θάμνων*

**Μοντέλο 4.** Η ένταση της πυρκαγιάς και η ταχεία διάδοσή της σχετίζεται με τα φυλλώματα και τα ενεργά ή νεκρά υλικά του ξύλου στις κορυφές ενός σχεδόν ομοιογενούς δευτερογενούς σχηματισμού. Ωριμοί θάμνοι με ύψος περίπου 2m ή περισσότερο είναι τυπικοί για αυτό το μοντέλο.

**Μοντέλο 5.** Στο μοντέλο αυτό η πυρκαγιά μεταφέρεται από επιφανειακή καύσιμη ύλη που είναι ουσιαστικά τα υπολείμματα που έχουν πέσει από τους θάμνους και το γρασίδι στην περιοχή. Οι πυρκαγιές δεν είναι ιδιαίτερα έντονες επειδή η καύσιμη ύλη είναι σχετικά μικρή και οι θάμνοι έχουν μικρή περιεκτικότητα ξυλώδους υλικού. Στο μοντέλο αυτό εντάσσονται και μικρής ηλικίας πράσινα χορτάρια με μικρή περιεκτικότητα νεκρού ξυλώδους υλικού.

**Μοντέλο 6.** Οι πυρκαγιές μεταφέρονται μέσω του επιπέδου εκείνου των θάμνων όπου τα φυλλώματα είναι περισσότερο εύφλεκτα από ό,τι η καύσιμη ύλη στο μοντέλο 5 αλλά απαιτεί μέτριους ανέμους, μεγαλύτερους από 10km την ώρα.

**Μοντέλο 7.** Η πυρκαγιά διαδίδεται τόσο μέσω της επιφάνειας όσο και μέσω της συστοιχίας των θάμνων με ίδια ευκολία και μπορεί να συμβεί σε μεγαλύτερα ποσοστά υγρασίας της νεκρής καύσιμης ύλης λόγω του ότι τα ζωντανά (ενεργά) φυλλώματα και άλλα ενεργά υλικά είναι περισσότερο εύφλεκτα.

*Ομάδα ξυλείας*

**Μοντέλο 8.** Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει συνήθως βραδύκαυστη καύσιμη ύλη με μικρό ύψος της πύρινης φλόγας αν και η πυρκαγιά μπορεί να περιλαμβάνει μικρές εστίες (“jackpots”) μεγαλύτερων συγκεντρώσεων καύσιμης ύλης που μπορεί να ξεσπάσουν. Μόνο κάτω από δύσκολες καιρικές συνθήκες μπορεί αυτά τα καύσιμα να αποτελέσουν απειλή. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει

κωνοφόρα δέντρα ή φυτά, ξυλεία από φυλλοβόλα δέντρα που έχει μαραθεί, καθώς επίσης και κλαράκια, πευκοβελόνες και φυλλώματα.

**Μοντέλο 9.** Η πυρκαγιά διαδίδεται στην επιφάνεια ταχύτερα από το μοντέλο 8 και έχει μεγαλύτερο μήκος φλόγας. Χαρακτηριστική καύσιμη ύλη είναι οι μακριές πευκοβελόνες. Οι συγκεντρώσεις του νεκρού, πεσμένου ξυλώδους υλικού θα προκαλέσει ανάφλεξη των δέντρων.

**Μοντέλο 10.** Η καύση της φωτιάς γίνεται στην επιφάνεια με καύσιμη ύλη μεγαλύτερης έντασης, από ότι άλλα είδη υπολειμμάτων ξυλείας. Λόγω υπερωρίμανσης και διάφορων φυσικών γεγονότων δημιουργείται μεγάλο φορτίο καύσιμης ύλης στο δασικό δάπεδο. Στο μοντέλο αυτό είναι πιθανό το λαμπάδιασμα ανεξάρτητων δέντρων με αποτέλεσμα να δημιουργούνται προβλήματα ελέγχου της πυρκαγιάς.

#### *Ομάδα σχισμών*

**Μοντέλο 11.** Οι πυρκαγιές είναι αρκετά ενεργές στις χαρακιές με ποώδες υλικό ανάμεσά τους. Τα καύσιμα φορτία είναι σχετικά μικρά και βρίσκονται σε σχισμές κωνοφόρων ή φυλλοβόλων δέντρων.

**Μοντέλο 12.** Μεγάλης έντασης πυρκαγιές που διαδίδονται εξαιρετικά γρήγορα και οι οποίες είναι ικανές για την δημιουργία χαρακτηριστικών καιγόμενων τεμαχίων ξύλων. Όταν η πυρκαγιά ξεκινά συνήθως διατηρείται με την ίδια ένταση μέχρι να συμβεί μια μεταβολή στις συνθήκες. Η ποσότητα της καύσιμης ύλης στο μοντέλο αυτό είναι της τάξης των 350 τόνων ανά στρέμμα ενώ η κατανομή της ποσότητας αυτής είναι σχεδόν ομοιόμορφη.

**Μοντέλο 13.** Η πυρκαγιά δημιουργείται σε ένα συνεχόμενο επίπεδο σχισμών. Το υλικό αυτό του μοντέλου εμφανίζει ποσότητες μεγαλύτερες των 10cm. Μεταδίδεται γρήγορα μέσω της καλής ποιότητας, καύσιμης ύλης και η έντασή της αυξάνεται όσο αρχίζουν να καίγονται μεγάλες ποσότητες καύσιμης ύλης.

#### **2.3.1.2. Μοντέλα του NFDRS**

Το NFDRS χρησιμοποιεί τα μοντέλα καύσιμης ύλης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1. Παρατηρείται ότι πρόκειται για ποσοτικό και όχι περιγραφικό μοντέλο όπως τα μοντέλα του Anderson.

**Πίνακας 2.1.** Τα μοντέλα καύσιμης ύλης που χρησιμοποιεί το NFDRS.

Fuel Model	Example vegetation / fuel type	Fuel Load, tons/acre						Fuel Depth, ft	Moist. of Ext. %
		1h	10h	100h	1000h	live woody	live herb.		
A	Annual grass and forbs	0.2					0.3	0.8	15
L	Perennial grass	0.25					0.5	1.0	15
N	Sawgrass	1.5	1.5			2.0		3.0	25
C	Open timber / grass	0.4	1.0			0.5	0.8	0.75	20
D	Southern rough	2.0	1.0			3.0	0.75	2.0	30
T	Sagebrush / grass	1.0	0.5			2.5	0.5	1.25	15
B	Mature chaparral	3.5	4.0	0.5		11.5		4.5	15
F	Intermediate brush	2.5	2.0	1.5		9.0		4.5	15
E	Hardwoods (winter)	1.5	0.5	0.25		0.5	0.5	0.4	25
P	Southern plantation	1.0	1.0	0.5		0.5	0.5	0.4	30
R	Hardwoods (summer)	0.5	0.5	0.5		0.5	0.5	0.25	25
U	Western, long-needle conifer	1.5	1.5	1.0		0.5	0.5	0.5	20
I	Heavy slash	12.0	12.0	10.0	12.0			2.0	25
J	Medium slash	7.0	7.0	6.0	5.5			1.3	25
K	Light slash	2.5	2.5	2.0	2.5			0.6	25
O	Pocosin	2.0	3.0	3.0	2.0	7.0		4.0	30
S	Alaskan tundra	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	25
H	Closed, short-needle conifer (normal dead)	1.5	1.0	2.0	2.0	0.5	0.5	0.3	20
G	Closed, short-needle conifer (heavy dead)	2.5	2.0	5.0	12.0	0.5	0.5	1.0	25
Q	Alaskan black spruce	2.0	2.5	2.0	1.0	4.0	0.5	3.0	25

Η αναλυτική παρουσίαση κάθε μοντέλου καύσιμης ύλης ξεφεύγει από τον σκοπό της εργασίας αυτής και αποτελεί αντικείμενο μελέτης άλλου γνωστικού αντικειμένου (π.χ. γεωπόνους, δασολόγους). Η αποδοχή του καταλληλότερου μοντέλου ή συστήματος μοντέλων αρκεί για την δημιουργία τόσο του χάρτη εκτίμησης επικινδυνότητας, όσο και του μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης των πυρκαγιών. Είναι προφανές πως η επιλογή του μοντέλου καύσης πρέπει να γίνει με γνώμονα την περιοχή μελέτης.

### 2.3.2. Παραδείγματα συστημάτων εκτίμησης επικινδυνότητας

Υπάρχουν διάφορα συστήματα (δείκτες) εκτίμησης του κινδύνου που εφαρμόζονται είτε σε τοπικό είτε σε εθνικό επίπεδο. Σκοπός όλων αυτών των συστημάτων είναι η δημιουργία θεματικών χαρτών στους οποίους εμφανίζονται οι περιοχές μελέτης με βάση το δυναμικό που εμφανίζουν για πρόκληση πυρκαγιάς.

Η δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας σε εθνικό επίπεδο είναι επίπονη διαδικασία, ιδιαίτερα όταν μιλάμε για μεγάλες σε έκταση χώρες όπως οι ΗΠΑ, ο Καναδάς και η Αυστραλία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται επιγραμματικά διάφοροι τέτοιοι δείκτες ταξινόμησης της επικινδυνότητας αλλά και οι χάρτες επικινδυνότητας που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση.

### **2.3.2.1. Το αμερικανικό σύστημα NFDRS**

Το σύστημα National Fire Danger Rating System (NFDRS) χρησιμοποιεί καθημερινές παρατηρήσεις των καιρικών συνθηκών που σχετίζονται με πυρκαγιές καθώς επίσης και προβλέψεις των καιρικών αυτών συνθηκών με σκοπό τη δημιουργία δεικτών που δείχνουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς ή το δυναμικό εκδήλωσης πυρκαγιάς για μεγάλες περιοχές. Οι παρατηρήσεις των καιρικών συνθηκών γίνονται μια φορά την ημέρα την ίδια ώρα και στο ίδιο μέρος.

Το όλο σύστημα βασίζεται στην προσέγγιση της εκτίμησης της χειρότερης περίπτωσης. Αυτό σημαίνει πως πρόκειται για απογευματινή μέτρηση των καιρικών συνθηκών οπότε ο καιρός είναι θερμότερος και ξηρότερος, ενώ μετράει τον κίνδυνο εκδήλωσης πυρκαγιάς από νότια στα δυτικά.

Το σύστημα θεωρεί ότι οι πυρκαγιές εκδηλώνονται σε συνεχή επίπεδα καύσιμης ύλης στην επιφάνεια του εδάφους. Το σύστημα έχει ως σκοπό της πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς μόνο στο μέτωπό της και θεωρεί ότι το μήκος των φλογών στο μέτωπο της φωτιάς σχετίζεται άμεσα με την συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Παρέχει διαβαθμίσεις και δείκτες ταξινόμησης που ερμηνεύονται αναφορικά με το περιστατικό της πυρκαγιάς και τη συμπεριφορά της. Οι δείκτες εκτίμησης επικινδυνότητας πυρκαγιάς είναι σχετικοί και όχι απόλυτοι. Αυτό σημαίνει πως όταν ένα συστατικό ή δείκτης του συστήματος διπλασιάζεται πρέπει να αναμένουμε διπλασιασμό της εκδήλωσης ή της έντασης της πυρκαγιάς.

Η βασική δομή του συστήματος (Σχήμα 2.6) παρέχει 3 δείκτες: τον Δείκτη Συμβάντος (Occurrence Index), τον Δείκτη Καύσης (Burning Index) και τον Δείκτη Φορτίου Πυρκαγιάς (Fire Load Index). Οι δείκτες αυτοί προκύπτουν από 3 συστατικά συμπεριφοράς της πυρκαγιάς: τον Παράγοντα Διάδοσης (Spread Component-SC), τον Παράγοντα Απελευθέρωσης Ενέργειας (Energy Release Component-ERC) και τον Παράγοντα Ανάφλεξης (Ignition Component-IC). Η κλίμακα κάθε δείκτη μεταβάλλεται από 0 ως 100.

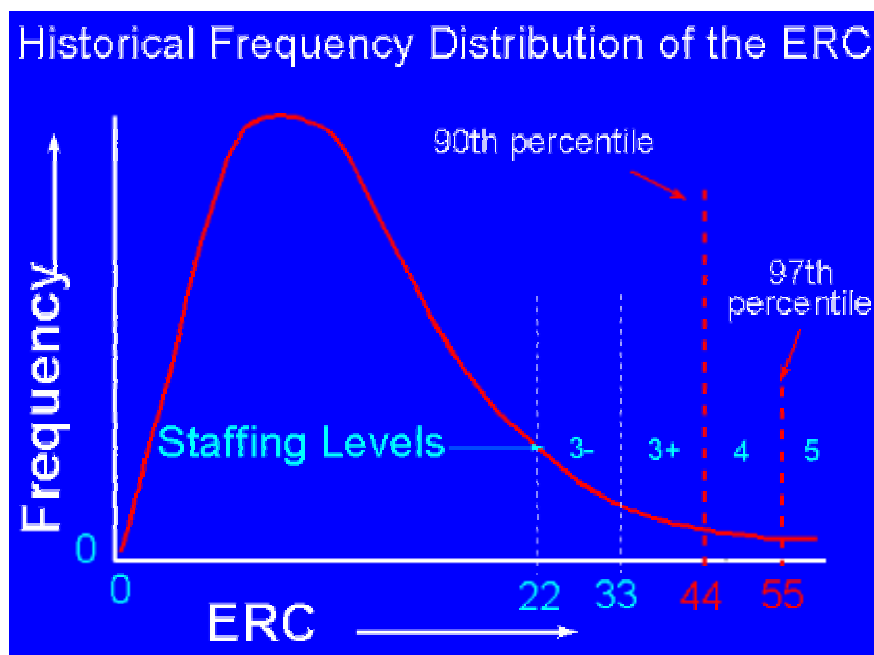
Το τελικό προϊόν του NFDRS, στην καθημερινή δημιουργία ενός προγράμματος πρόληψης και καταστολής των πυρκαγιών, είναι τα επίπεδα των δεικτών. Αυτά μερικές φορές αναφέρονται ως επίπεδα δράσης, επιθετικά επίπεδα, προληπτικά επίπεδα, επίπεδα προετοιμασίας ή ως Επίπεδα Πρόληψης Βιομηχανικών Πυρκαγιών (IFPL).

Η προϋπόθεση για την ισχύ των επιπέδων δεικτών είναι πως ο συνεχής κίνδυνος πυρκαγιάς μπορεί να χωριστεί σε διακριτά χρονικά διαστήματα στα οποία μπορεί να προσχεδιαστούν δραστηριότητες διαχείρισης. Με άλλα λόγια για κάθε επίπεδο δείκτη θα πρέπει να ληφθεί μια συγκεκριμένη

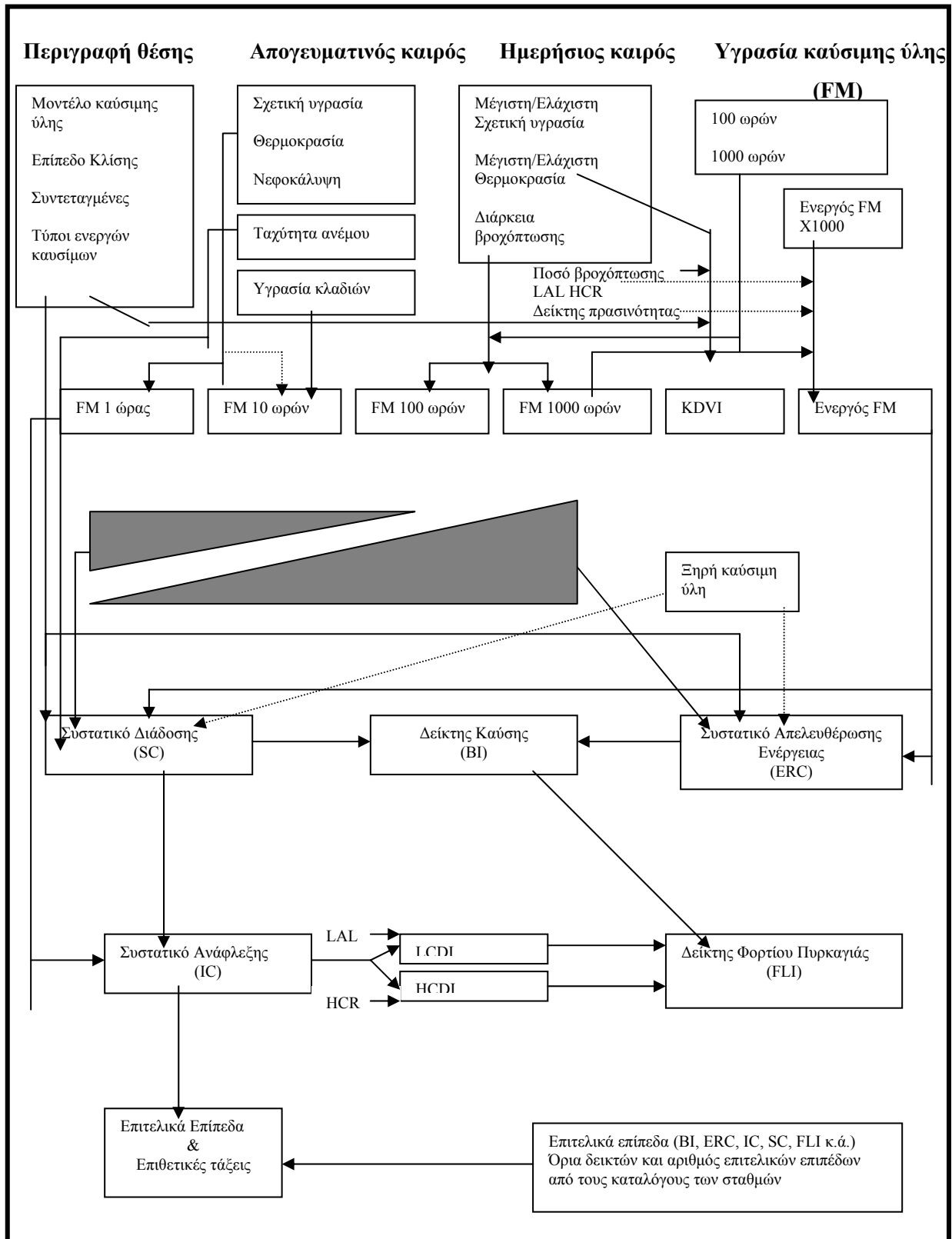
απόφαση διαχείρισης που θα έχει ως σκοπό την καταστολή της πυρκαγιάς. Τα επίπεδα δεικτών αποτελούν τον σύνδεσμο μεταξύ των πληροφοριών για εκτίμηση κινδύνου πρόκλησης πυρκαγιών των αποφάσεων διαχείρισης των πυρκαγιών. Τα επίπεδα δεικτών διαβαθμίζονται με αριθμητικό τρόπο (από I ως IV) ή περιγραφικά (Μικρός ως Εξαιρετικός).

Το πρώτο βήμα στον καθορισμό των επιπέδων των δεικτών είναι η επιλογή από τις πολιτειακές ή ομοσπονδιακές (πάντα στις ΗΠΑ) υπηρεσίες διαχείρισης ενός συστατικού ή δείκτη του NFDRS που περιγράφει καλύτερα τα συνολικά προβλήματα πυρκαγιών στην περιοχή μελέτης. Για παράδειγμα αναφέρουμε ότι στην Washington χρησιμοποιείται το δείκτη ERC.

Από στατιστική ανάλυση των ιστορικών μετεωρολογικών δεδομένων για πυρκαγιές μπορούν να καθοριστούν τα ποσοστά στην κατανομή των ιστορικών δεδομένων ERC που χρησιμοποιούνται ως οδηγοί για ποικίλες αποφάσεις στη διαχείριση των πυρκαγιών. Στην Washington, για τον καθορισμό των επιτελικών επιπέδων (staffing levels), χρησιμοποιείται ως βάση το 90<sup>ο</sup> και 97<sup>ο</sup> ποσοστό των ERC (Σχήμα 2.5). Στην δυτική Washington τα ποσοστά αυτά αντιστοιχούν σε 44 και 55 BTUs ανά ft<sup>2</sup>.



Σχήμα 2.5. Παράδειγμα εφαρμογής του NFDRS στην Washington, ΗΠΑ.



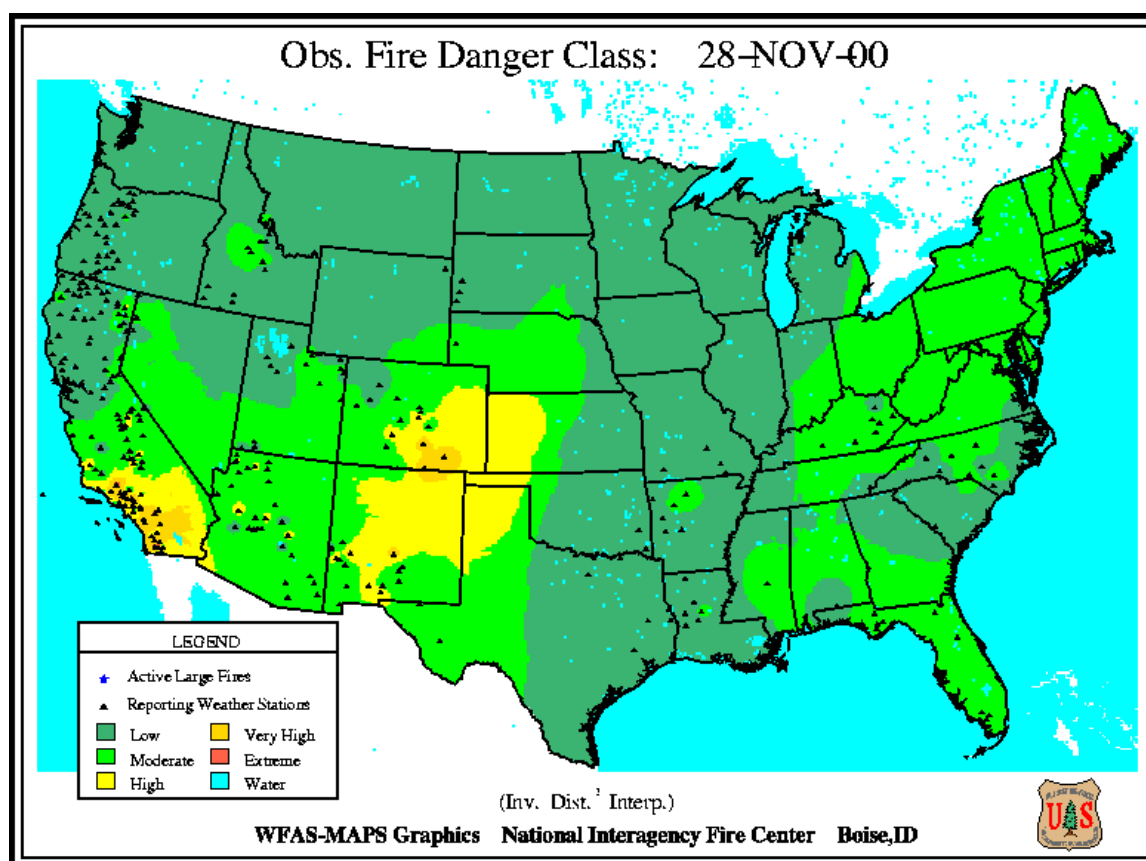
**Σχήμα 2.6.** Η δομή του NFDRS. Οι γραμμές δείχνουν την συνεισφορά της υγρασίας της νεκρής καύσιμης ύλης στο Συστατικό Διάδοσης (SC) και στο Συστατικό Απελευθέρωσης Ενέργειας (ERC). Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν εναλλακτικές διαδρομές στο σύστημα NFDRS.

Αυτό σημαίνει πως όταν ο δείκτης ERC είναι 55 υπάρχει 3% πιθανότητα η προσχεδιασμένη ενέργεια καταστολής να μην είναι επιτυχής σε ενδεχόμενη πυρκαγιά (Πίνακας 2.2).

Πίνακας 2.2. Τα επιτελικά επίπεδα στην περίπτωση της εικόνας 2.7.

Τάξη	Formula (άνω όρια κάθε τάξης)	ERC	Επιτελικά επίπεδα
1	(ERC90)/8	5.5	1
2	(ERC90)/4	11	1
3	(ERC90)*3/8	16.5	2
4	(ERC90)/2	22	2
5	(ERC(90)*3/4	33	3-
6	<b>ERC90</b>	<b>44</b>	<b>3+</b>
7	(ERC90+ERC97)/2	49.5	4
8	<b>ERC97</b>	<b>55</b>	<b>4</b>
9	>ERC97	>55	5

Κάθε χρόνο στις ΗΠΑ κατά τη διάρκεια της περιόδου των πυρκαγιών δημιουργούνται θεματικοί χάρτες, σε εθνική κλίμακα, για επιλεγμένα, μετεωρολογικά και εκτίμησης επικινδυνότητας εκδήλωσης πυρκαγιών, συστατικά. Στο Σχήμα 2.7. παρουσιάζεται ο χάρτης που δημιουργήθηκε ακολουθώντας τις παραπάνω διαδικασίες στις 28-11-2000.



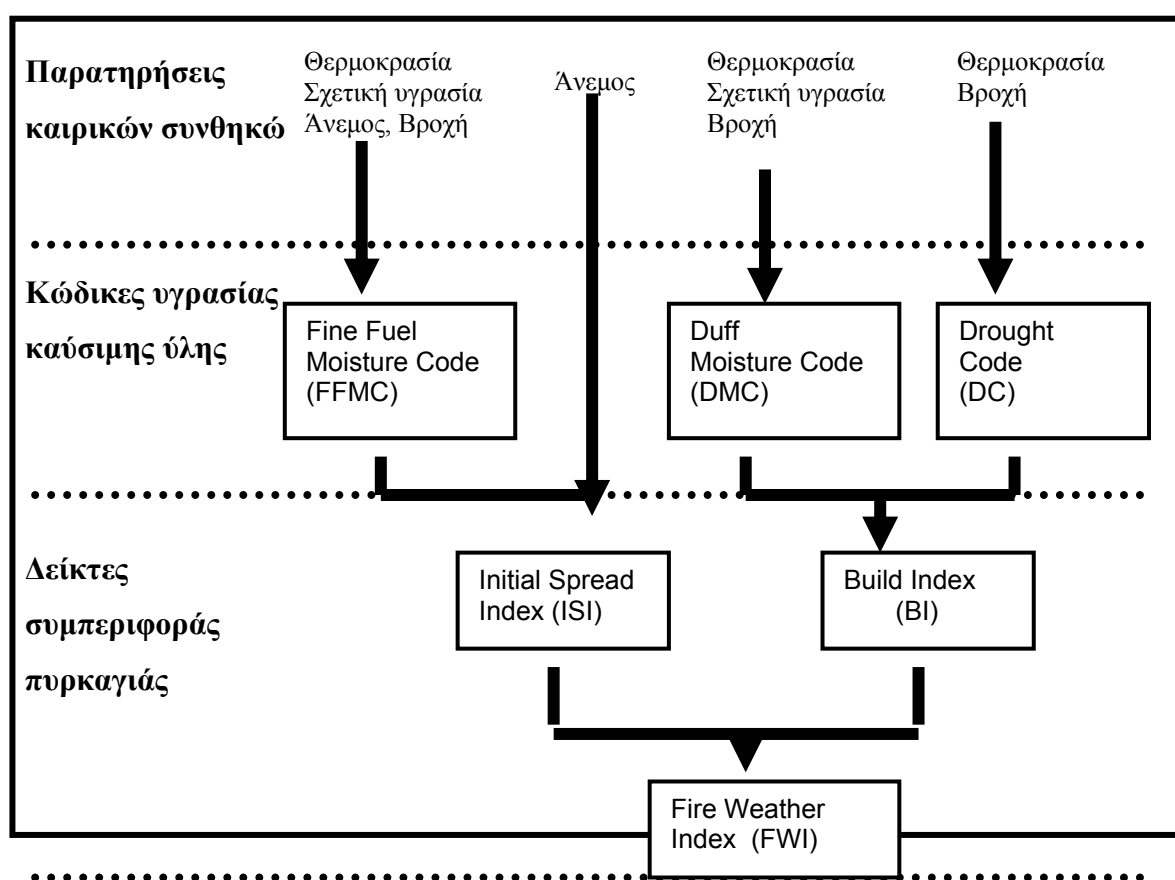
Σχήμα 2.7. Παράδειγμα χάρτη επικινδυνότητας με χρήση του συστήματος NFDRS.



### 2.3.2.2. Το καναδικό σύστημα CFFDRS

Το σύστημα CFFDRS (Canadian Forest Fire Danger Rating System) αποτελείται από δύο βασικά τμήματα. Το FWI (Fire Weather Index) και το FBI (Fire Behavior Index). Το FWI αποτελείται από 6 δείκτες που λαμβάνουν υπόψη τους τις επιδράσεις της υγρασίας της καύσιμης ύλης και του ανέμου στην συμπεριφορά της πυρκαγιάς (Σχήμα 2.8).

Τα πρώτα τρία συστατικά είναι οι κώδικες της υγρασίας της καύσιμης ύλης και είναι αριθμητικές διαβαθμίσεις της περιεχόμενης υγρασίας στα υπολείμματα των φυτών και άλλων ποιοτικών καυσίμων, τη μέση περιεχόμενη υγρασία των ελαφρώς συμπαγών οργανικών στρωμάτων σε μέσα βάθη και την μέση περιεχόμενη υγρασία στα βαθιά, συμπαγή οργανικά στρώματα.



Σχήμα 2.8. Ο δείκτης FWI του καναδικού CFFDRS.

Οι υπόλοιποι τρεις δείκτες είναι δείκτες της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς και οι οποίοι αναπαριστούν τον ρυθμό της διάδοσης της πυρκαγιάς της διαθέσιμης καύσιμης ύλης καθώς και την ένταση στο μέτωπο της πυρκαγιάς. Οι τιμές τους αυξάνονται όσο ο κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιάς μεγαλώνει.

Ο υπολογισμός των δεικτών του Σχήματος 2.8. βασίζεται σε αλληλέπληρες, καθημερινές παρατηρήσεις της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της ταχύτητας του ανέμου και της ημερήσιας βροχόπτωσης. Οι έξι αυτοί δείκτες προσδίδουν αριθμητικές διαβαθμίσεις στο σχετικό δυναμικό εκδήλωσης πυρκαγιάς.

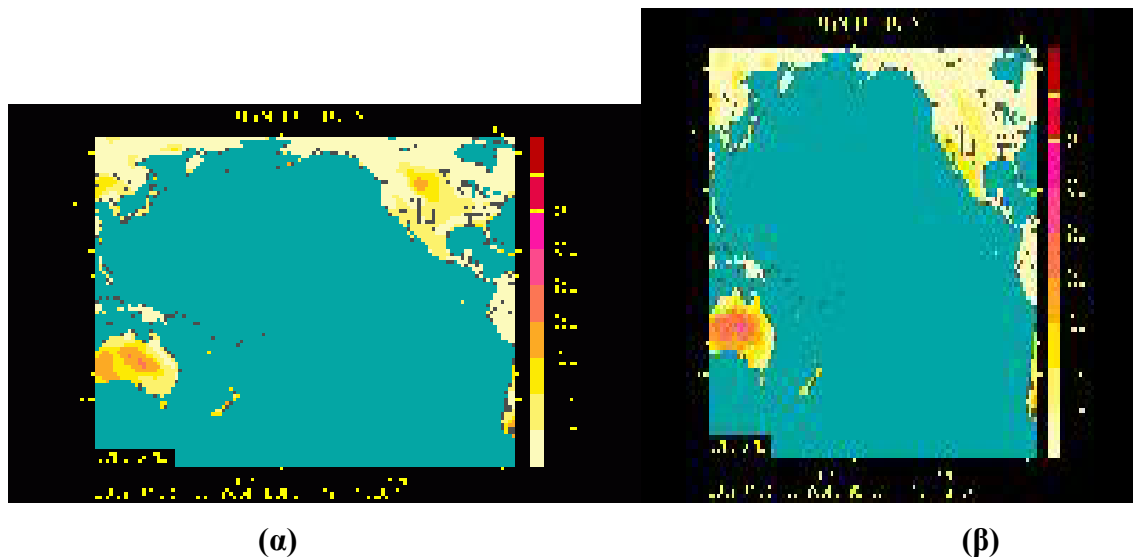
Ο δείκτης FFMC είναι μια αριθμητική διαβάθμιση της περιεχόμενης υγρασίας στα υπολείμματα των φυτών και άλλων καλής ποιότητας καυσίμων. Αυτός ο δείκτης είναι δείκτης της ευκολίας ανάφλεξης της καύσιμης ύλης. Ο δείκτης DMC είναι μια αριθμητική διαβάθμιση της μέσης περιεχόμενης υγρασίας των ελαφρώς συμπαγών οργανικών στρωμάτων σε μέτρια βάθη. Παρέχει μια ένδειξη της κατανάλωσης καύσιμης ύλης σε μετρίου μεγέθους ξυλώδη υλικά.

Ο δείκτης DC είναι μια ποσοτική διαβάθμιση της μέσης περιεχόμενης υγρασίας στα βαθιά, συμπαγή οργανικά στρώματα. Πρόκειται για χρήσιμο δείκτη των εποχιακών επιδράσεων της ξηρασίας στην καύσιμη ύλη των δασών. Ο δείκτης ISI παρέχει τον αναμενόμενο ρυθμό διάδοσης της πυρκαγιάς. Συνδυάζει τις επιδράσεις του ανέμου και του FFMC στον ρυθμό διάδοσης χωρίς την επίδραση των μεταβλητών παραμέτρων της καύσιμης ύλης.

Ο δείκτης BI δίνει το συνολικό ποσό διαθέσιμης καύσιμης ύλης για ανάφλεξη και συνδυάζει τους δείκτες DMC και DC. Τέλος, ο δείκτης FWI είναι μια αριθμητική διαβάθμιση της έντασης της πυρκαγιάς που συνδυάζει τους δείκτες ISI και BI.

Ο δείκτης FWI του CFFDRS μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιοδήποτε μέρος του κόσμου καθώς οι παράμετροι που χρησιμοποιεί δεν είναι προσαρμοσμένες μόνο στα καναδικά δεδομένα αλλά είναι αντικειμενικές. Έτσι, για παράδειγμα το σύστημα αυτό έχει χρησιμοποιηθεί και στην Νέα Ζηλανδία (με μερικές τροποποιήσεις) ενώ χρησιμοποιείται και από οργανισμούς στην νοτιο-ανατολική Ασία για προβλέψεις της εκτίμησης επικινδυνότητας στην περιοχή.

Στο Σχήμα 2.9. παρουσιάζονται οι προβλέψεις για την εβδομάδα από 25/11/2000 ως 02/12/2000 για περιοχές στον Ειρηνικό Ωκεανό αλλά και η πρόβλεψη για τον επόμενο μήνα. Είναι προφανές ότι τα στοιχεία αυτά ανανεώνονται συνεχώς και είναι διαθέσιμα και στο Διαδίκτυο.



*Σχήμα 2.9. Η χρησιμοποίηση του FWI για εβδομαδιαίες (α) και μηνιαίες (β) προβλέψεις*

### 2.3.2.3 Ινδονησία

Στην Ινδονησία προκειμένου να δημιουργηθεί ένα σύστημα αντιμετώπισης και διαχείρισης πυρκαγιών δημιούργησαν ένα Δείκτη διαβάθμισης της Επικινδυνότητας Πυρκαγιάς (Fire Danger Rating-FDR). Στη συνέχεια θα περιγραφεί ο τρόπος δημιουργίας του σε μια συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Ο FDR παρέχει το δυναμικό εκδήλωσης πυρκαγιάς ή ξηρασίας για ένα πλήθος μετεωρολογικών συνθηκών. Το σύστημα παρέχει το δυναμικό εκδήλωσης πυρκαγιάς με απλό τρόπο, χωρίς εξειδικευμένες τεχνικές και οικονομικές απαιτήσεις και ως σκοπό είχε την εύκολη προσαρμογή του στην περιοχή μελέτης στο ανατολικό Kalimantan στην Ινδονησία. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή του Δείκτη Ξηρότητας Keetch / Byram (KBDI) επειδή βασίζεται μόνο σε λίγα μετεωρολογικά δεδομένα .

Η μέθοδος KBDI αναπτύχθηκε το 1968. Η μέγιστη δυνατή περιεχόμενη υγρασία του εδάφους ορίζεται ως χωρητικότητα του πεδίου. Με βάση αυτή την χωρητικότητα υπολογίζεται η απώλεια υγρασίας. Μόνο τρεις παράμετροι απαιτούνται για τον υπολογισμό του FDR:

- Η μέγιστη μέση ετήσια βροχόπτωση του σταθμού
- Η σημερινή μέγιστη θερμοκρασία
- Η σημερινή βροχόπτωση

Η εξίσωση του δείκτη ξηρότητας (Drought Factor-DF), και η οποία έχει στην περίπτωση αυτή ελάχιστα τροποποιηθεί, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης. Η εξίσωση αυτή είναι:

$$DF = (2000 - KBDI) * (0.9676 * EXP(0.0875 * T_{max} + 1.552) * 8.229) * 0.001 / (1 + 10.88 * EXP(-0.00175 * Ann_{rain}))$$

όπου  $T_{max}$  είναι η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία (μετρούμενη σε βαθμούς Κελσίου C) και  $Ann_{rain}$  είναι η μέση ετήσια βροχόπτωση (μετρούμενη σε mm). Αυτές είναι οι μοναδικές μεταβλητές, όλα τα άλλα στοιχεία θεωρούνται σταθερά (όπως για παράδειγμα η εξατμισοδιαπνοή και η βλάστηση).

Το KBDI ισούται το άθροισμα των KBDI της προηγούμενης ημέρας μειωμένο κατά 10 φορές. Η βροχή προστίθεται στον σημερινό DF. Ο κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιάς που εκφράζεται μέσω του KBDI κυμαίνεται από 0 ως 2000. Για να αρχίσει ο υπολογισμός του KBDI σε μια δεδομένη περιοχή πρέπει να ανατρέξουμε σε μια περίοδο όπου ο KBDI ήταν μηδέν. Οι Keetch / Byram υποδεικνύουν ως τέτοιο σημείο την ημέρα μετά από μια βροχερή περίοδο με βροχόπτωση 150-200 mm σε διάστημα μιας εβδομάδας.

Διακρίνονται τρεις διαβαθμίσεις του κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιάς που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3. Αυτά τα διαφορετικά στάδια δείχνουν την ξηρασία των κυρίαρχων καυσίμων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο KBDI μπορεί να αναπαρασταθεί τόσο αριθμητικά όσο και περιγραφικά και επομένως να παρασταθεί σε μια εικόνα.

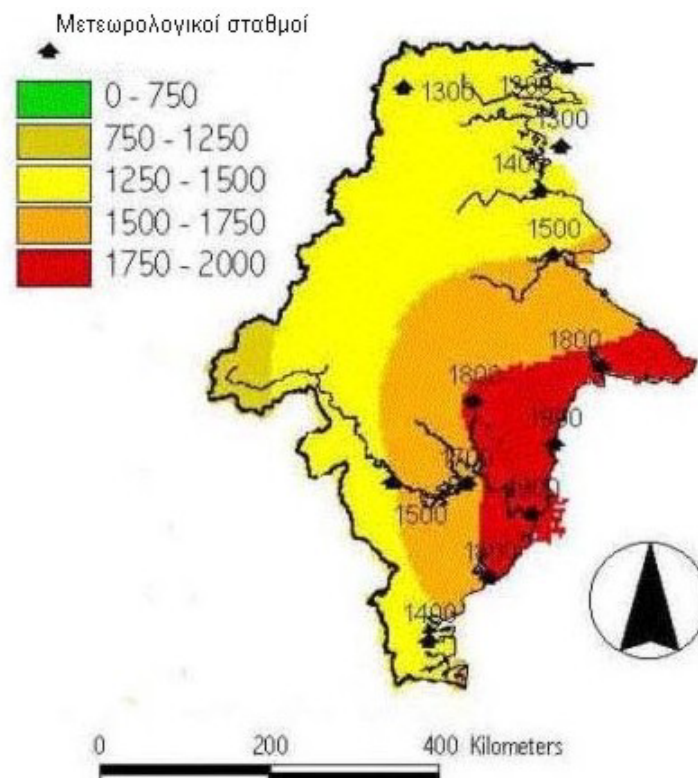
**Πίνακας 2.3.** Οι διαβαθμίσεις του FDR.

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ
0-999	Μικρός
1000-1499	Μέτριος
1500-2000	Υψηλός

Στην περιοχή μελέτης προσδιορίστηκε ο δείκτης KBDI ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω. Αυτό έγινε γιατί η μέθοδος υπολογισμού του είναι εύκολα προσαρμόσιμη στην περιοχή μελέτης και οι απαιτήσεις δεδομένων του είναι λίγα και απλά. Χρειάζονται δεδομένα βροχοπτώσεων και θερμοκρασίας από όσο το δυνατόν περισσότερες περιοχές.

Η ενσωμάτωση επιπρόσθετων μετεωρολογικών σταθμών μπορεί να αποβεί χρήσιμη καθώς κάνουν τις τιμές του KBDI πιο ακριβείς και κάνει το ποσοστό της γενίκευσης να ελαττώνεται. Αυτό είναι επιθυμητό λόγω της πιθανής διαφοροποίησης της βροχόπτωσης και της θερμοκρασίας σε όλη την περιοχή μελέτης.

Στο Σχήμα 2.10. παρουσιάζεται ο χάρτης που προέκυψε για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης ακολουθώντας την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω.



**Σχήμα 2.10.** Το αποτέλεσμα εφαρμογής του FDR στο ανατολικό Kalimantan, Ινδονησία.

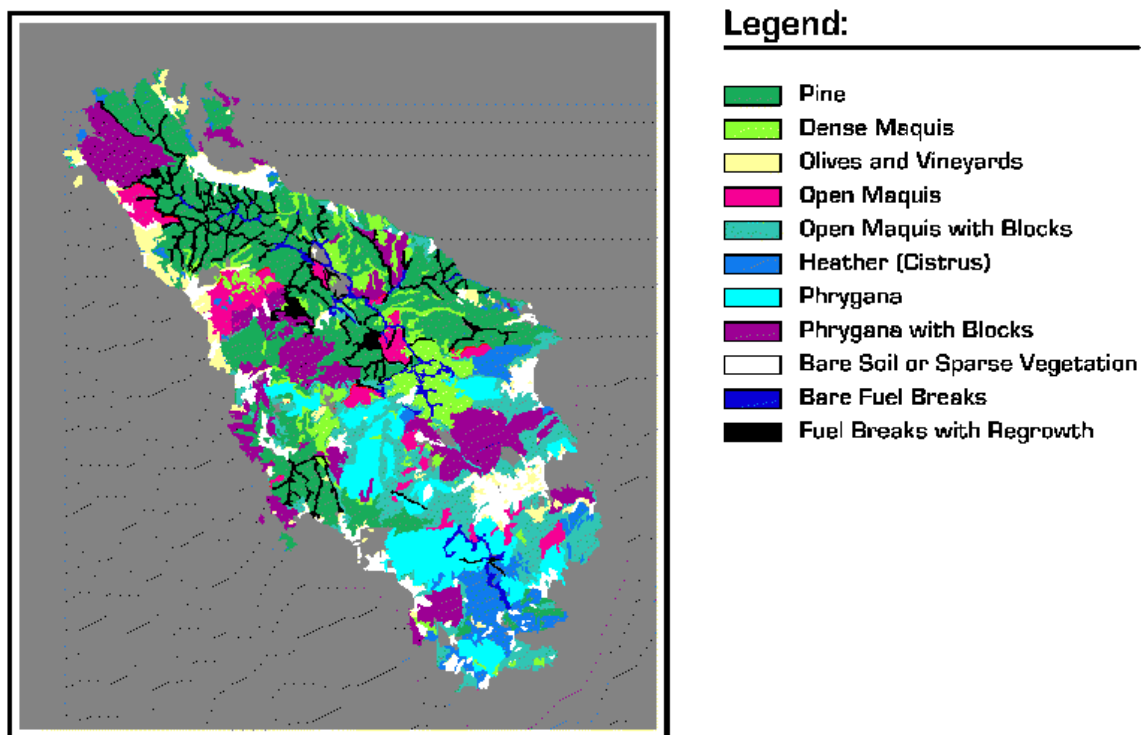
#### 2.3.2.4. Ελλάδα

Προσπάθεια δημιουργίας χάρτη εκτίμησης επικινδυνότητας για μια συγκεκριμένη περιοχή μελέτης έχει γίνει και στην Ελλάδα (Kuntz and Karteris - 1993). Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην Χαλκιδική και πρόκειται για το αρχικό στάδιο της δημιουργίας συστήματος διαχείρισης πυρκαγιών.

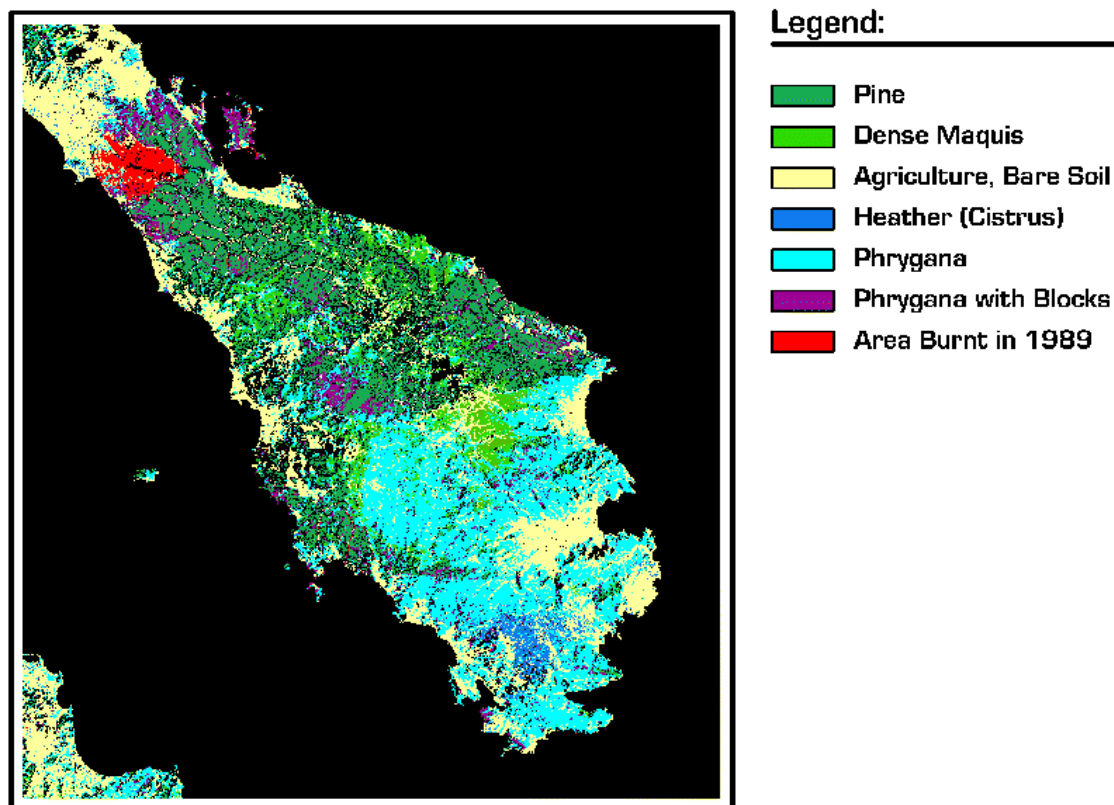
Για να δημιουργηθεί ο χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιάς στο ακρωτήρι Σιθωνία, Χαλκιδική, προηγήθηκε η δημιουργία ενός χάρτη της βλάστησης με τη χρησιμοποίηση δεδομένων του θεματικού χαρτογράφου (TM) του δορυφόρου Landsat. Στη συνέχεια έγινε ταξινόμηση της εικόνας κάνοντας τόσο καθοδηγούμενη ταξινόμηση από τους μελετητές αλλά και αυτοματοποιημένη χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Μεγίστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood). Στο Σχήμα 2.11.

παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της καθοδηγούμενης ταξινόμησης και στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της αυτόματης ταξινόμησης

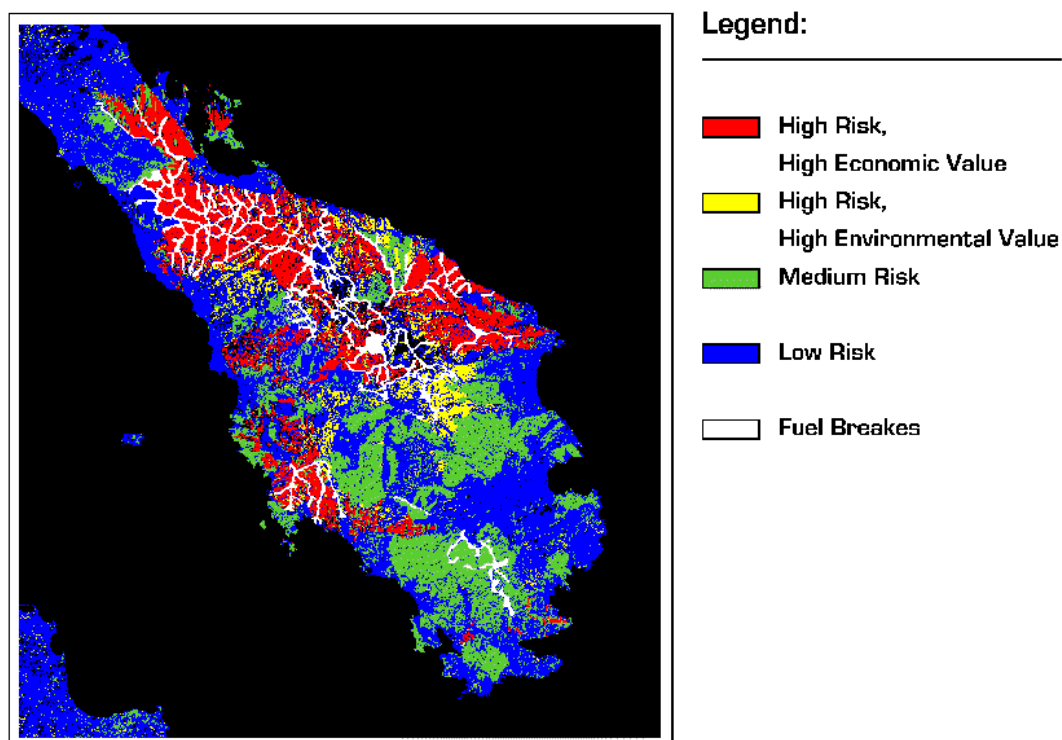
Αφού γίνει η ταξινόμηση γίνεται μια αντιστοίχιση των διαφορετικών ομάδων βλάστησης σε 4 κατηγορίες κινδύνου πυρκαγιάς. Το αποτέλεσμα είναι το Σχήμα 2.13.



*Σχήμα 2.11. Το αποτέλεσμα της οπτικής ταξινόμησης στο ακρωτήριο Σιθωνία.*

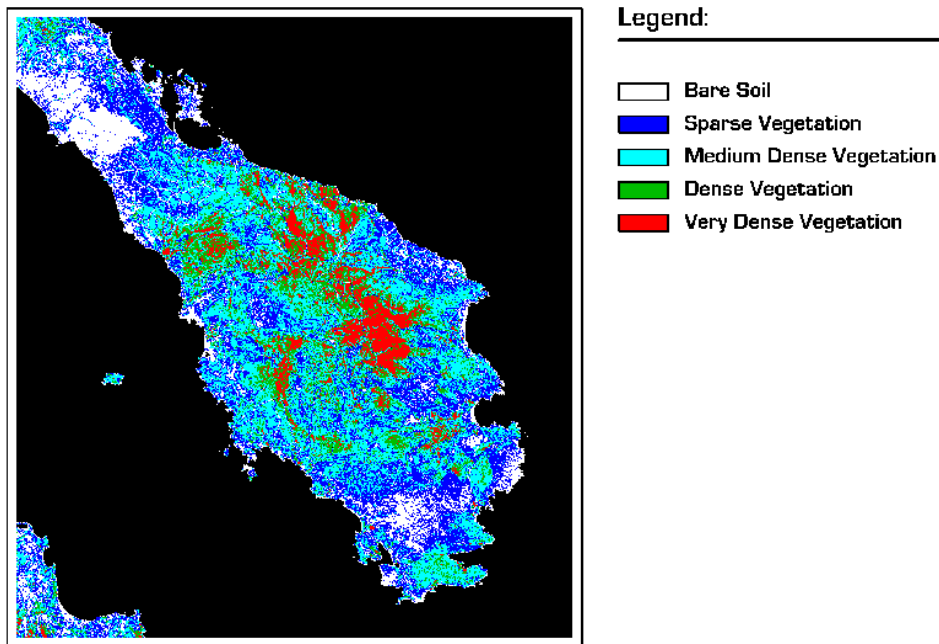


Σχήμα 2.12. Το αποτέλεσμα της αυτόματης ταξινόμησης στο ακρωτήρι Σιθωνία.



Σχήμα 2.13. Χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιάς στο ακρωτήρι Σιθωνία με απλή αντιστοίχιση.

Ένας δεύτερος, περισσότερο αναλυτικός, χάρτης επικινδυνότητας της περιοχής είναι αυτός που προκύπτει από τον συνδυασμό του χάρτη βλάστησης και των δεδομένων NDVI όπως αυτά προκύπτουν από μια εικόνα Landsat.



*Σχήμα 2.14. Ο δείκτης NDVI της περιοχής μελέτης.*

Είναι φανερό πως οι χάρτες επικινδυνότητας που προέκυψαν από τις παραπάνω διαδικασίες είναι εξαιρετικά απλουστευμένοι. Πάντως παρατηρείται από αυτή την τελευταία εφαρμογή ότι το να δημιουργηθεί ένας χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιάς δεν είναι κατ' ανάγκη μια διαδικασία που απαιτεί μεγάλους οικονομικούς πόρους για να επιτευχθεί.

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν οι βασικές αρχές που πρέπει να διέπουν ένα σύστημα εκτίμησης επικινδυνότητας. Έγινε ιδιαίτερη αναφορά στα μοντέλα καύσιμης ύλης που υπάρχουν ενώ παρουσιάστηκαν δύο εθνικοί δείκτες εκτίμησης του κινδύνου (NFDRS, CFFDRS) και δύο τοπικοί χάρτες εκτίμησης επικινδυνότητας (Ινδονησία, Ελλάδα).

Από την στιγμή που έχει γίνει η κατάλληλη προετοιμασία και υπάρχουν οι χάρτες εκτίμησης επικινδυνότητας, το επόμενο βήμα που πρέπει να γίνει, στα πλαίσια ενός συστήματος διαχείρισης πυρκαγιών είναι η δημιουργία ενός μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς.

Στην επόμενη παράγραφο αναλύονται οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην προσπάθεια δημιουργίας ενός τέτοιου μοντέλου ενώ γίνεται και παρουσίαση των αρχών λειτουργίας των κυριότερων μοντέλων που ήδη υπάρχουν .



Με δεδομένη την δημιουργία ενός χάρτη επικινδυνότητας μιας περιοχής μελέτης, στο Κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς. Τα στοιχεία που περιλαμβάνει και οι θεωρητικές αρχές στις οποίες στηρίζεται ένα τέτοιο μοντέλο αποτελούν το αντικείμενο μελέτης του Κεφαλαίου αυτού.

## **2.4. Μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης**

Η προσπάθεια κατανόησης της συμπεριφοράς των πυρκαγιών και πρόβλεψης της διάδοσής τους είναι αντικείμενο μελέτης για δεκαετίες. Η χρησιμοποίηση μεθόδων μοντελοποίησης μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών για την πρόβλεψη της εξάπλωσής της είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη τα τελευταία χρόνια.

Πρόσφατες βελτιώσεις στη δασολογία και την προσπάθεια ερμηνείας των πυρκαγιών σε συνδυασμό με την ύπαρξη δορυφορικών δεδομένων υψηλής διαχωριστικής ικανότητας, ισχυρά μέσα διαχείρισης και επεξεργασίας εικόνων, τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ) αλλά και η συνεχώς αυξανόμενη ισχύς των υπολογιστών έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη εξεζητημένων αλλά εύκολων στην χρήση εφαρμογών μοντελοποίησης των πυρκαγιών.

Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των πυρκαγιών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μηχανιστικά μοντέλα στα οποία η πυρκαγιά διαδίδεται μέσω πλέγματος κελιών είτε ως μοντέλα ιχνών (footprint models) τα οποία απλώνουν την πυρκαγιά ταυτόχρονα σε σημεία ή περιοχές του εδάφους.

Τα μηχανιστικά μοντέλα διακρίνονται ως αυτά που στηρίζονται σε χάρτες και η εξάπλωση της πυρκαγιάς γίνεται σε συνάρτηση με τα πραγματικά χαρακτηριστικά του εδάφους και σε αυτά τα οποία ονομάζονται συνοπτικά και τα κελιά ταυτίζονται στις περισσότερες περιπτώσεις.

Ομοίως τα μοντέλα ιχνών διακρίνονται σε αυτά που στηρίζονται σε κατανομές πιθανοτήτων και σε αυτά τα οποία μοντελοποιούν χωρικά συσχετιζόμενες δραστηριότητες.

### **2.4.1. Μηχανιστικά μοντέλα.**

Τα μηχανιστικά μοντέλα στηρίζονται στη μοντελοποίηση της πυρκαγιάς λαμβάνοντας υπόψη τους την τοπολογία της περιοχής μελέτης αλλά και την καύσιμη ύλη.

#### **2.4.1.1. Μοντέλα χαρτών**

Σε γενικές γραμμές τα μοντέλα αυτά αποδίδουν την ανάφλεξη και τη διάδοση των πυρκαγιών ως συνάρτηση των καιρικών συνθηκών, της καύσιμης ύλης και της τοπογραφίας της περιοχής μελέτης. Για τη δημιουργία τους είναι απαραίτητη η χρήση αναλυτικού ΓΣΠ στο οποίο θα περιέχεται κάποιο λεπτομερές ΨΜΥ ενώ κρίσιμη είναι η επιλογή από τον χρήστη του κατάλληλου μοντέλου καύσιμης ύλης αλλά και οι καιρικές παράμετροι τις οποίες θα συνυπολογίζει το μοντέλο.

#### **2.4.1.2. Περιγραφικά μοντέλα**

Ο δεύτερος τύπος μηχανιστικών μοντέλων περιλαμβάνει αυτά τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως ένας τύπος κυψελοειδών αυτόματων (cellular automata) με την έκταση της πυρκαγιάς που παρατηρείται σε ένα κελί να είναι, εν μέρει, συνάρτηση της πυρκαγιάς στα γειτονικά κελιά. Το μέγεθος κάθε κελιού εξαρτάται από τα διαθέσιμα στοιχεία και την ακρίβεια του μοντέλου. Σε αυτά τα μοντέλα οι πυρκαγιές εξαπλώνονται με ένα είδος διήθησης (percolation). Εάν σε ένα κελί έχει εκδηλωθεί πυρκαγιά, αυτή μεταδίδεται σε ένα γειτονικό κελί που δεν έχει καεί με μια προκαθορισμένη πιθανότητα. Η εξάπλωση της πυρκαγιάς μπορεί να γίνει εντός μιας περιοχής γειτονικών κελιών ή μόνο στα παράπλευρα κελιά. Η συνολική πιθανότητα εμφάνισης πυρκαγιάς σε ένα κελί είναι μια σύνθετη συνάρτηση των πιθανοτήτων ανάφλεξης και διάδοσης.

Τα μοντέλα αυτά διάδοσης των πυρκαγιών μπορεί επίσης να στηρίζονται στη διήθηση της περιοχής μελέτης στην οποία τα κελιά με καύσιμη ύλη είναι τοποθετημένα τυχαία στο έδαφος και τότε, τα κελιά, εκτίθενται σε τυχαίες αναφλέξεις. Στην περίπτωση αυτή η εξάπλωση της πυρκαγιάς γίνεται μεταξύ των κελιών που περιέχουν καύσιμη ύλη. Πάλι, η εξάπλωση της πυρκαγιάς γίνεται είτε σε έναν προκαθορισμένο αριθμό γειτονικών κελιών είτε μόνο στα τέσσερα γειτονικά κελιά.

#### **2.4.2. Μοντέλα ιχνών**

Στα μοντέλα αυτά η διάδοση της πυρκαγιάς στηρίζεται σε κατανομές πιθανοτήτων για την διάδοση της πυρκαγιάς αλλά και στη στατιστική συσχέτιση διάφορων παραμέτρων που αναλύονται στην συνέχεια που μπορεί να οδηγήσουν σε εκδήλωση πυρκαγιάς.

##### **2.4.2.1. Μοντέλα κατανομής πιθανοτήτων**

Χωρικά μοντέλα πυρκαγιών μπορεί να στηρίζονται σε κατανομές πιθανοτήτων όπου η περιοχή στην οποία θα εκδηλωθεί πυρκαγιά είναι μια τυχαία μεταβλητή που περιγράφεται από μια καθορισμένη κατανομή πιθανότητας. Για παράδειγμα, έχει πραγματοποιηθεί μοντελοποίηση της εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας την κατανομή του Poisson, ενώ η περιοχή κάθε

πυρκαγιάς περιγράφηκε από μια γεωμετρική κατανομή. Οι πυρκαγιές έχουν ελλειπτικό σχήμα και τοποθετούνται τυχαία στο έδαφος.

Άλλοι ερευνητές έχουν εκτιμήσει το μέγεθος των πυρκαγιών χρησιμοποιώντας μια κατανομή πιθανοτήτων, έκαναν ανάφλεξη ενός τυχαίου σημείου για κάθε πυρκαγιά και στη συνέχεια την διέδωσαν τυχαία. Τέτοια μοντέλα θεωρούνται υβριδικά καθώς συνδυάζουν μοντέλα ιχνών (η περιοχή των πυρκαγιών χαρακτηρίζεται από μια κατανομή πιθανότητας) και μηχανιστικά μοντέλα (η μορφή της πυρκαγιάς καθορίζεται από την εξάπλωσή της).

#### **2.4.2.2. Χωρικά συσχετισμένα γεγονότα**

Οι πυρκαγιές μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως χωρικά συσχετισμένα γεγονότα καθορίζοντας τόσο τον κίνδυνο πυρκαγιάς για κάθε σημείο στο έδαφος όσο και τον τρόπο συσχέτισης μεταξύ της εκδήλωσης των γεγονότων. Αυτή η συσχέτιση μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση της απόστασης με σημεία τα οποία είναι αρκετά πιθανό να καούν την ίδια χρονιά από ότι σημεία που είναι αρκετά μακριά.

Στην ενότητα αυτή παρουσιάστηκαν, συνοπτικά, τα κυριότερα είδη μοντέλων πρόβλεψης της διάδοσης πυρκαγιών. Επειδή σκοπός της εργασίας αυτής είναι η παρουσίαση ρεαλιστικών μοντέλων αρκούν οι παραπάνω γενικές πληροφορίες. Η αναλυτική περιγραφή διάφορων μοντέλων και η ανάπτυξη της θεωρίας στην οποία στηρίζονται βοηθά καλύτερα τον αναγνώστη να κατανοήσει τη χρησιμότητα μοντελοποίησης των πυρκαγιών. Έτσι, στη συνέχεια θα περιγραφούν διάφορα μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης των πυρκαγιών.

#### **2.4.2. Το μοντέλο BEHAVEPlus**

Το μοντέλο BehavePlus είναι ένα μοντέλο που λειτουργεί σε περιβάλλον Windows και σκοπό έχει την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς για εφαρμογές στην προσπάθεια αντιμετώπισης και διαχείρισής της. Έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται με δεδομένα την καύσιμη ύλη, τις καιρικές συνθήκες και την τοπογραφία της περιοχής μελέτης.

Για να προσδιοριστεί ο τρόπος διάδοσης της πυρκαγιάς το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί το μαθηματικό μοντέλο του Rothermel. Το 1946 ο Fons απέδειξε ότι τα δυναμικά χαρακτηριστικά της ενέργειας της πυρκαγιάς στο μέτωπό της (την διεπιφάνεια μεταξύ του καιγόμενου μετώπου και της γειτονικής καύσιμης ύλης) ήταν ουσιαστικά στην ικανότητα μιας πυρκαγιάς να διατηρήσει τον ρυθμό διάδοσής της.

Αργότερα, ο Frandsen (1971) χρησιμοποίησε μια βασική μαθηματική περιγραφή των δυναμικών χαρακτηριστικών της ενέργειας στο μέτωπο της πυρκαγιάς. Η βασική μορφή αυτής της μαθηματικής σχέσης είναι ο λόγος της ενέργειας που απελευθερώνεται στα γειτονικά καύσιμα από το καιγόμενο μέτωπο προς την ενέργεια εκείνη που απαιτείται για την ανάφλεξη των γειτονικών αυτών καυσίμων.

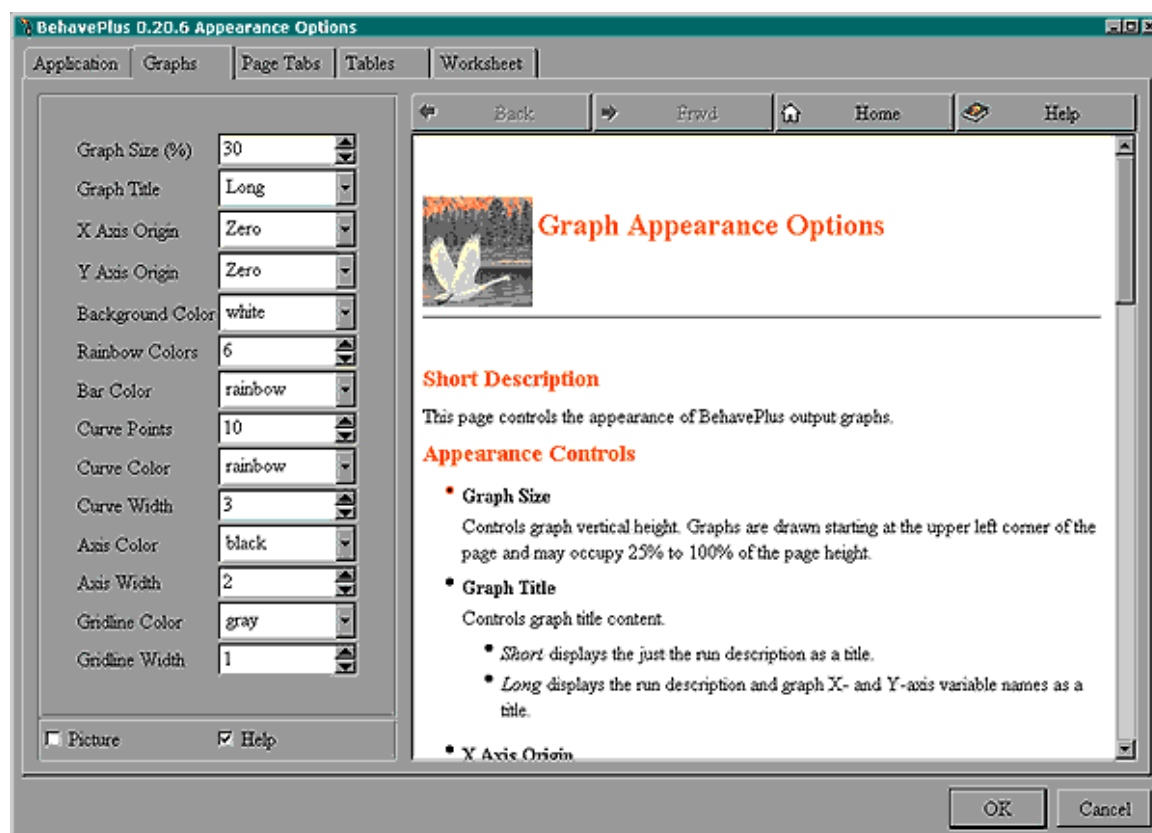
Ωστόσο, αυτός ο λόγος περιείχε όρους που περιελάμβαναν τους μηχανισμούς ροής της ενέργειας οι οποίοι ήταν άγνωστοι και επομένως η μαθηματική αυτή σχέση δεν ήταν δυνατό να λυθεί αναλυτικά. Ο Rothermel (1972) επαναπροσδιόρισε τον λόγο αυτό με καινούργιους όρους που επέτρεπαν την μαθηματική προσέγγιση του φαινομένου και στη συνέχεια επαλήθευσε το μοντέλο αυτό χρησιμοποιώντας γνωστές μεταβλητές σε μια σήραγγα ανέμου θαλάμου ανάφλεξης (wind tunnel/combustion chamber).

Για τον υπολογισμό του ρυθμού διάδοσης το μοντέλο Rothermel απαιτεί τρία είδη παραμέτρων: τις ιδιότητες των σωματιδίων της καύσιμης ύλης (περιεχόμενη ενέργεια, ορυκτολογική σύσταση και πυκνότητα σωματιδίων), τη διάταξη της καύσιμης ύλης (φορτίο ανάλογα με την τάξη μεγέθους, το μέσο μέγεθος, το βάθος της καύσιμης ύλης) και τέλος περιβαλλοντικά συσχετιζόμενες τιμές (ταχύτητα ανέμου, περιεχόμενη στην καύσιμη ύλη υγρασία και κλίση).

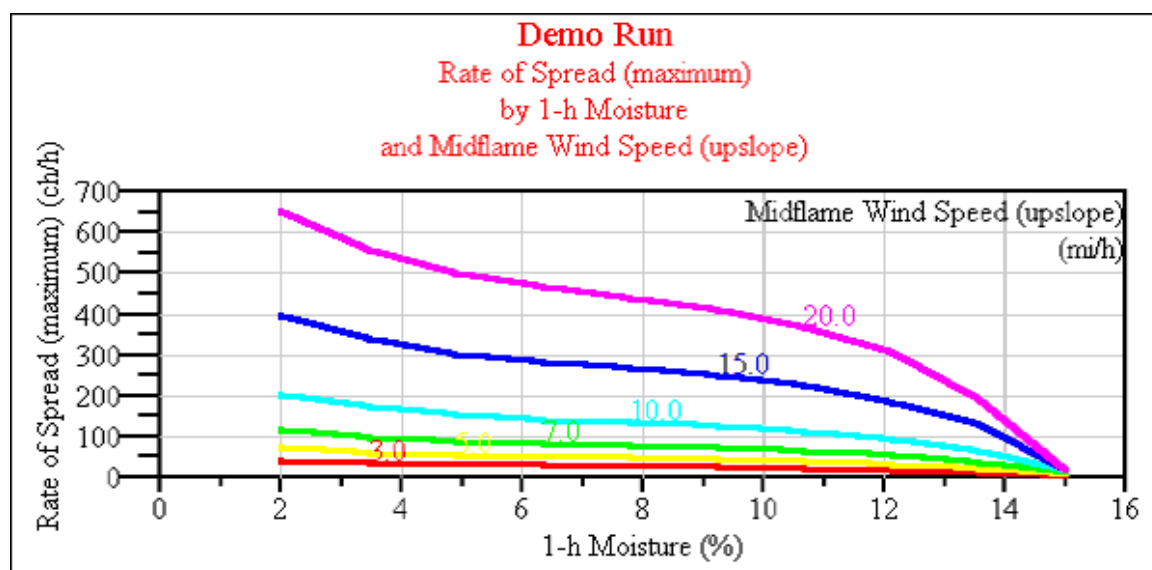
Τα δεδομένα που πρέπει να εισαχθούν στο μοντέλο εξαρτώνται από τον σκοπό της χρησιμοποίησής του. Έτσι, μοντέλα καύσιμης ύλης, η υγρασία της καύσιμης ύλης η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου, η κλίση του εδάφους χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ρυθμού διάδοσης, το μήκος των φλογών και της ένταση της πυρκαγιάς. Με δεδομένο τον χρόνο μετά την ανάφλεξη θα είναι δυνατή η εκτίμηση του μεγέθους της πυρκαγιάς. Εάν δοθεί ως δεδομένη μια γραμμή ρυθμού διάδοσης της πυρκαγιάς αλλά και η προτεινόμενη μέθοδος κατάσβεσης μπορεί να υπολογιστεί το τελικό μέγεθος της πυρκαγιάς.

Οι προβλέψεις της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς γίνονται για ένα σημείο σε δεδομένο χώρο και χρόνο με καθορισμένες από τον χρήστη παραμέτρους όπως η καύσιμη ύλη, οι καιρικές συνθήκες και η τοπογραφία. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το μοντέλο Farsite (που θα περιγραφθεί στην συνέχεια) το οποίο προβλέπει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς για μεταβλητές καιρικές συνθήκες, καύσιμη ύλη και τοπογραφία. Όμως, τα εισαγόμενα στο μοντέλο στοιχεία είναι πολύ πιο εύκολο να αναχθούν στο πεδίο σε σχέση με το μοντέλο Farsite το οποίο απαιτεί την υποστήριξη λεπτομερούς ΓΣΠ.

Στο Σχήμα 2.15. παρουσιάζεται το αποτέλεσμα εφαρμογής του μοντέλου το οποίο ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει, όπως θέλει, τη μορφή των γραφικών παραστάσεων που παρέχει το μοντέλο. Στην Σχήμα 2.16 παρουσιάζεται μια τέτοια γραφική παράσταση.



Σχήμα 2.15. Η μορφή του μοντέλου BehavePlus.



Σχήμα 2.16. Το BehavePlus χρησιμοποιεί γραφήματα για την παρουσίαση των εξαγόμενων στοιχείων της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς όταν τα αρχικά στοιχεία καθορίζονται ως φάσματα τιμών. Μέχρι δύο εισαγόμενα δεδομένα μπορούν να οριστούν με αυτό τον τρόπο.

### 2.4.3. Το μοντέλο Farsite

Το Farsite (Fire Area Simulator) είναι ένα μοντέλο για χωρική και προσωρινή προσομοίωση της συμπεριφοράς και διάδοσης των πυρκαγιών υπό συνθήκες ετερογενούς εδάφους, καύσιμης ύλης και καιρικών συνθηκών. Είναι ένα δισδιάστατο αιτιοκρατικό και στοχαστικό μοντέλο διάδοσης πυρκαγιών που προβλέπει πότε, πού και πώς μια πυρκαγιά θα διαδοθεί. Το Farsite περιλαμβάνει μοντέλα για επιφανειακές πυρκαγιές, πυρκαγιές στις κορυφές των δέντρων, επιτάχυνση της πυρκαγιάς και την υγρασία της καύσιμης ύλης.

Για τη μοντελοποίηση χρησιμοποιεί μια εφαρμογή της αρχής του Huygens για την διάδοση των κυμάτων. Η διαδικασία είναι, στην πραγματικότητα, παρόμοια με τις ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον ίδιο σκοπό. Η διαφορά μεταξύ τους είναι πως η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη, ταχύτερη και σχετικά απλή. Επιπλέον, οι προκύπτουσες παράμετροι συμπεριφοράς και διάδοσης της πυρκαγιάς μπορούν να μεταφερθούν τόσο αριθμητικά όσο και γραφικά σε άλλες εφαρμογές και ιδιαίτερα σε ΓΣΠ. Αυτά τα πλεονεκτήματα ωστόσο, απαιτούν περισσότερες και πιο οργανωμένες πληροφορίες αναφορικά με την τοπογραφία, τις καιρικές συνθήκες και την καύσιμη ύλη.

Το μοντέλο απαιτεί για την λειτουργία του την υποστήριξη ενός ΓΣΠ (για την δημιουργία, διαχείριση και παροχή χωρικών θεματικών δεδομένων που αφορούν την καύσιμη ύλη της βλάστησης και την τοπογραφία). Πέντε αρχικά θεματικά δεδομένα απαιτούνται για να αρχίσει να λειτουργεί το Farsite και αυτά είναι το υψόμετρο, η κλίση, ο προσανατολισμός, η καύσιμη ύλη (συνήθως χρησιμοποιείται το μοντέλο του Anderson) και το οριζόντιο ποσοστό της επιφάνειας του εδάφους που καλύπτεται από φυλλώματα (canopy cover). Επιπλέον, μπορούν να εισαχθούν το ύψος των φυλλωμάτων, το ύψος της βάσης του κορμού και η πυκνότητά της.

Τα δεδομένα αυτά πρέπει να είναι σε format ASCII και να συνδυαστούν σε ένα μόνο αρχείο στο Farsite. Όλες οι θεματικές ενότητες πρέπει να είναι γεωμετρικά ταυτισμένες και να έχουν ακριβώς την ίδια διαχωριστική ικανότητα. Επίσης, οι προσομοιώσεις με το Farsite απαιτούν την ανάπτυξη από τον χρήστη αρχείων δεδομένων για τις μετεωρολογικές συνθήκες, τον άνεμο και την αρχική υγρασία της καύσιμης ύλης.

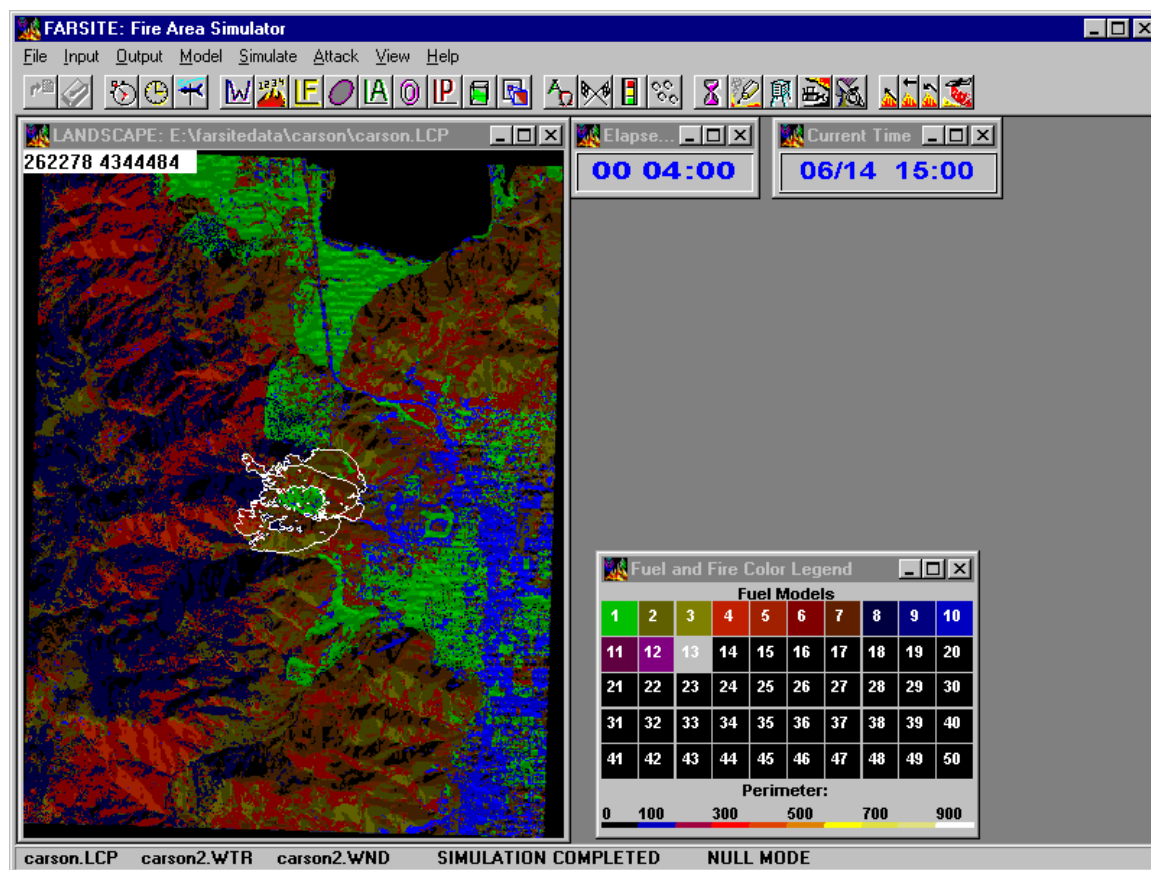
Το μεγαλύτερο, ίσως, μειονέκτημα του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου. Ακόμα και με τη χρήση υπερυπολογιστών είναι ιδιαίτερα δύσκολο για τους μετεωρολόγους να μοντελοποιήσουν με ακρίβεια τον τρόπο μεταβολής του ανέμου σε

μεταβαλλόμενη τοπογραφία. Το μοντέλο θεωρεί τον άνεμο σε ανοιχτό χώρο (open wind), παράλληλο με το έδαφος, σταθερό στον χώρο αλλά να μπορεί να μεταβληθεί σε ταχύτητα και διεύθυνση στον χρόνο. Η χωρική μεταβλητότητα του ανέμου επιτυγχάνεται μόνο μέσω της χρησιμοποίησης πολλαπλών σειρών δεδομένων. Οι ταχύτητες του ανέμου προσαρμόζονται για μετρίου μήκους φλόγες στηριζόμενοι στα χαρακτηριστικά της κάλυψης των φυλλωμάτων και του μοντέλου καύσιμης ύλης.

Αποδεχόμενο την αρχή του Huygens για την διάδοση της πυρκαγιάς το μοντέλο αυτό θεωρεί ότι η διάδοση είναι ελλειπτική. Επίσης, η εξάπλωση της πυρκαγιάς σε οποιαδήποτε διεύθυνση είναι ανεξάρτητη από την μορφή του μετώπου της πυρκαγιάς. Για παράδειγμα, σημεία κατά μήκος ενός μετώπου πυρκαγιάς μπορούν να θεωρούν ανεξάρτητες πηγές κυμάτων. Η επιτάχυνση της πυρκαγιάς εξαρτάται από την καύσιμη ύλη αλλά είναι ανεξάρτητη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Η πυρκαγιά λαμβάνει άμεσα την ελλειπτική της μορφή όταν μεταβληθούν οι συνθήκες καύσης (π.χ. η ταχύτητα του ανέμου ή η απότομη μεταβολή της κλίσης του εδάφους).

Ενώ οι ελλειπτικές μορφές είναι ανεξάρτητες της καύσιμης ύλης, η μορφή (όχι το μέγεθος) καθορίζεται μόνο από τον πίνακα κλίσης-άνεμου που προκύπτει. Εάν χρησιμοποιηθούν μεταβλητότητες στην ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου με μεγαλύτερη συχνότητα από την διαχωριστική ικανότητα της ροής του ανέμου δεν θα επηρεαστεί η ελλειπτική μορφή της πυρκαγιάς. Η αρχή μιας ελλειπτικής πυρκαγιάς τοποθετείται στην μεγάλη εστία της έλλειψης. Η διάδοση ενός συνεχούς μετώπου πυρκαγιάς μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από πεπερασμένο αριθμό σημείων.

Στο Σχήμα 2.17. παρουσιάζεται το αποτέλεσμα προσομοίωσης μιας πυρκαγιάς με εφαρμογή του Farsite..



Σχήμα 2.17. Η οθόνη του Farsite μετά από προσομοίωση πυρκαγιάς.

#### 2.4.4. Το μοντέλο FireΓΣΠ

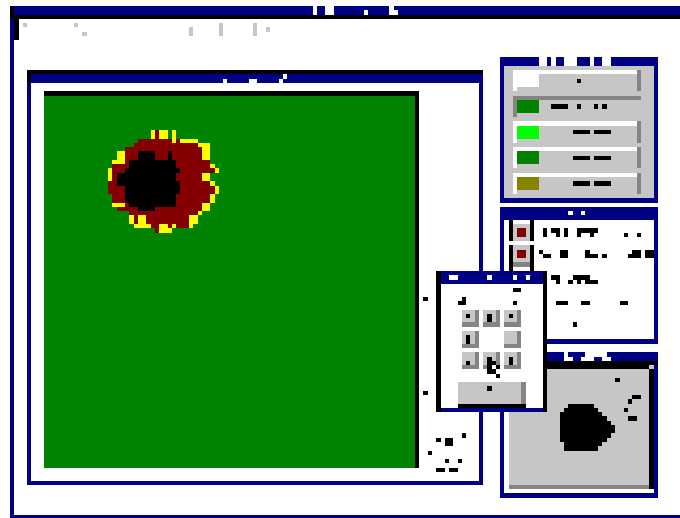
Μέχρι τώρα έχουν περιγραφθεί μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς τα οποία στηρίζονται σε εμπειρικά μοντέλα εκ των οποίων το συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο είναι αυτό του Rothermel. Μια εναλλακτική τεχνική για την προσομοίωση της διάδοσης μιας πυρκαγιάς είναι αυτή που χρησιμοποιεί μοντέλα κυψελοειδών αυτόματων (cellular automata models).

Πρόκειται για μαθηματικά μοντέλα στα οποία ο χώρος και ο χρόνος δεν είναι συνεχείς συναρτήσεις και οι αρχικές παράμετροι μπορούν να πάρουν τιμές σε συγκεκριμένα όρια. Οι κανόνες με τους οποίους μεταβάλλονται οι αρχικές παράμετροι είναι τοπικός, δηλαδή εξαρτώνται από ένα μικρό αριθμό γειτονικών σημείων. Οι κανόνες μετάδοσης μπορεί να είναι είτε αιτιοκρατικό είτε συνάρτηση πιθανοτήτων των γειτονικών σημείων. Ομοίως θεωρείται μια ομάδα σημείων σε μια γραμμή (μία διάσταση), και άλλες ομάδες σε ένα πλέγμα (δισδιάστατες και τρισδιάστατες). Ο χρόνος είναι διακριτός με τακτά ή όχι διαστήματα.

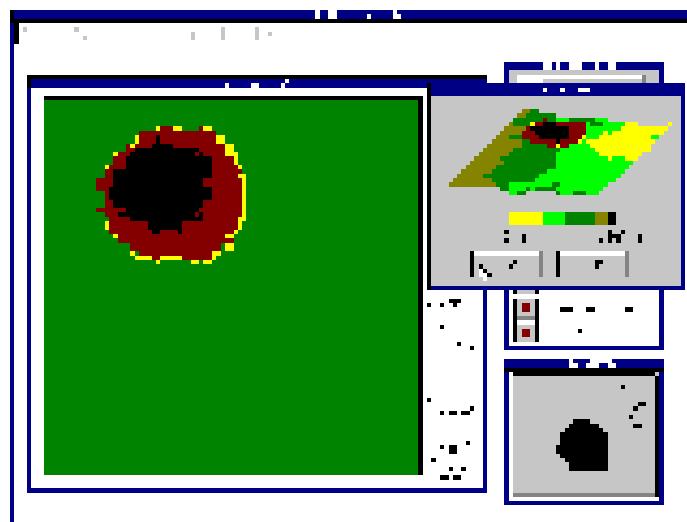
Το μοντέλο FireΓΣΠ στηρίζεται στην τεχνική της αυτόματης κυψέλης αλλά είναι δυνατή η σύγκριση με το μοντέλο διάδοσης του Rothermel. Επιτρέπει την, σε πραγματικό χρόνο, οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε ψηφιδωτά (raster format) και σε ψηφιακό



μοντέλο εδάφους. Το αρχικό μέγεθος των κελιών είναι 70m x 70m. Στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η οθόνη με στοιχεία του ανέμου. Τα τελικά αποτελέσματα του μοντέλου εμφανίζονται συνεχώς επικαλύπτοντας την πυρκαγιά με το επίπεδο της βλάστησης ή του υψομέτρου (Σχήμα 2.19).



Σχήμα 2.18. Τα δεδομένα του ανέμου στο FireΓΣΠ.



Σχήμα 2.19. Τα αποτελέσματα του μοντέλου και η τρισδιάστατη εικόνα.

#### 2.4.5. Μοντέλο πιθανοτήτων

Μια εναλλακτική τεχνική στην προσπάθεια μοντελοποίησης της κίνησης και συμπεριφοράς της πυρκαγιάς είναι το να θεωρηθεί αυτή σαν μια σειρά τυχαίων γεγονότων.

Ένα μοντέλο πιθανοτήτων παρέχει την δυνατότητα διόρθωσης των διαφορών που παρατηρούνται μεταξύ ενός αιτιοκρατικού μοντέλου και της πραγματικότητας. Ωστόσο, ένα τέτοιο μοντέλο τείνει να αποτελεί εξαίρεση στην προσπάθεια πρόβλεψης της συμπεριφοράς των πυρκαγιών. Ένα τέτοιο

μοντέλο είναι των Catchpole, Hatton και Catchpole (CHC) το οποίο θεωρεί την διάδοση της πυρκαγιάς ως ένα μοντέλο Markov.

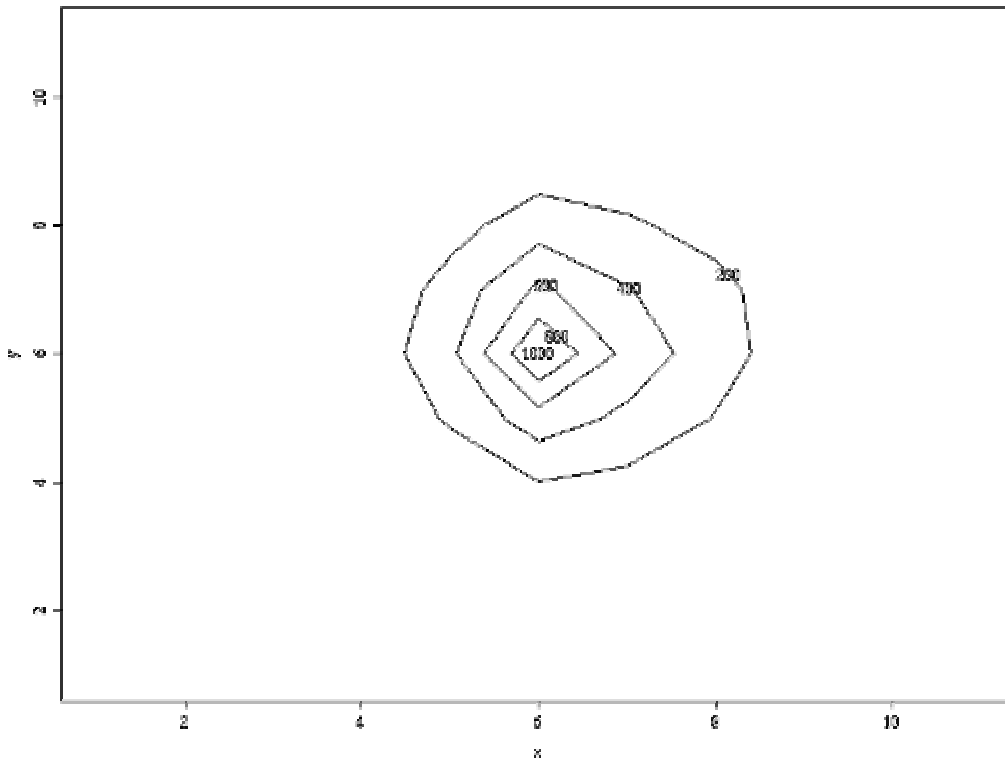
Η λογική του μοντέλου (που αναφέρεται σε μία διάσταση) είναι ότι με δεδομένη μια μεγάλη, γραμμική περιοχή κελιών (ίσων διαστάσεων) το CHC θεωρεί την περίπτωση όπου τα είδη της καύσιμης ύλης μεταβάλλονται τυχαίως από κελί σε κελί. Η πιθανότητα εμφάνισης ενός δεδομένου τύπου καύσιμης ύλης σε ένα γνωστό κελί εξαρτάται μόνο από τον τύπο της καύσιμης ύλης του γειτνιάζοντος κελιού. Έτσι, ο πίνακας της καύσιμης ύλης που δημιουργείται είναι μια μονοδιάστατη διαδικασία Markov

$$\text{Prob}(X_i / x_1, x_2, \dots, x_{i-1}) = \text{Prob}(X_i / x_{i-1})$$

Δηλαδή η πιθανότητα του τύπου  $X$  της καύσιμης ύλης σε ένα κελί  $i$ , με δεδομένους τους τύπους  $x_1$  στο κελί 1,  $x_2$  στο κελί 2 ....και  $x_{i-1}$  στο κελί  $i-1$  εξαρτάται μόνο από τον τύπο της καύσιμης ύλης στο κελί  $i-1$ . Για  $k$  τύπους καύσιμης ύλης ( $k > 1$ ), η πιθανότητα στα δεξιά αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο ενός πίνακα πιθανοτήτων  $k$  επί  $k$  στον οποίο κάθε στοιχείο  $p_{ij}$  δίνει την πιθανότητα ανάφλεξης του τύπου  $j$ , από ένα κελί του τύπου  $i$ . Το μοντέλο CHC χρησιμοποιεί αυτές τις πιθανότητες για να υπολογίσει τον αναμενόμενο χρόνο για την καύση ενός τυχαίου κελιού (ή σειράς κελιών) δηλαδή τον αναμενόμενο ρυθμό διάδοσης και τη μεταβλητότητα του ρυθμού διάδοσης.

Ο Fujika (1996) επέκτεινε το μοντέλο CHC στις δύο διαστάσεις. Η αναλυτική παρουσίαση της θεωρίας που χρησιμοποίησε ξεφεύγει από τον σκοπό της εργασίας αυτής. Όμως, ένα παράδειγμα εφαρμογής της τεχνικής που ανέπτυξε είναι το ακόλουθο.

Προσομοίωσε την ανάπτυξη μιας πυρκαγιάς σε ένα πλέγμα 11 γραμμών και 11 στηλών χρησιμοποιώντας την διαδικασία Markov (Σχήμα 2.20). Η φωτιά ξεκίνησε από το κέντρο και το χρονικό διάστημα που χρησιμοποιήθηκε ήταν 10.



**Σχήμα 2.20.** Παράδειγμα εφαρμογής μοντέλου πιθανοτήτων για την εξάπλωση πυρκαγιών.

Στο Σχήμα 2.20. παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός που κάθε κελί κάηκε για 1000 δοκιμές. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται οι καμπύλες πιθανότητας της εξομοίωσης Monte Carlo για 1000 επαναλήψεις με προσομοίωση της πυρκαγιάς με βήμα 10. Οι καμπύλες αυτές δείχνουν μια εμπειρική κατανομή της θέσης της πυρκαγιάς για το συγκεκριμένο βήμα. Για παράδειγμα, οι καμπύλες των 500 δίνουν το όριο εντός του οποίου η πυρκαγιά καίει στις μισές τουλάχιστον εφαρμογές με τις συγκεκριμένες συνθήκες.

Στην ενότητα αυτή περιγράφηκαν τα πιθανά είδη μοντελοποίησης και συνοπτικά παρουσιάστηκε η βασική αρχή λειτουργίας τους. Επίσης, παρουσιάστηκαν και τρία μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης πυρκαγιών (BAHEVEPlus, FARSITE, FireΓΣΠ) μαζί με τις θεωρητικές αρχές στις οποίες στηρίζονται. Στη συνέχεια παρατίθενται διάφορα τεχνικοοικονομικά στοιχεία βάσει των οποίων θα γίνει η επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού μεθόδων για την επίτευξη του τελικού στόχου που δεν είναι άλλος από την δημιουργία χάρτη επικινδυνότητας και μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης στην περίπτωση εφαρμογής στο δάσος του Ταυγέτου.

## 2.5. Τεχνικοοικονομικά στοιχεία

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το εκτιμώμενο κόστος τόσο για την συλλογή των δεδομένων όσο και για την προμήθεια των απαραίτητων λογισμικών προγραμμάτων για την δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας αλλά και μοντέλων πρόβλεψης της διάδοσης των δασικών πυρκαγιών.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.2, η γνώση της τοπογραφίας της περιοχής μελέτης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την εκδήλωση ή όχι αλλά και τον τρόπο διάδοσης της πυρκαγιάς. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η δημιουργία του ΨΜΥ, μπορεί να γίνει με την ψηφιοποίηση ήδη υπαρχόντων χαρτών σε κλίμακα που ορίζει ο αναλυτής. Το δάσος του Ταϋγέτου καταλαμβάνει έκταση περίπου 500km<sup>2</sup>. Οι τοπογραφικοί χάρτες που πρέπει να ψηφιοποιηθούν είναι κλίμακας 1:5000. Η ψηφιοποίηση χαρτών αυτής της κλίμακας δημιουργεί Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους με ισοϋψείς ανά 4m. Η κάλυψη της περιοχής του δάσους του Ταϋγέτου απαιτεί περίπου 45 φύλλα χάρτη. Η προμήθεια κάθε φύλλου χάρτη από την Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού (ΓΥΣ) από κάποιο πανεπιστημιακό ίδρυμα στοιχίζει 3,00 €. Το συνολικό κόστος προμήθειας των τοπογραφικών χαρτών είναι περίπου 135,00€.

Μια εναλλακτική λύση είναι και η προμήθεια έτοιμων Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους από την ΓΥΣ. Τα ΨΜΥ αυτά έχουν ισοϋψείς ανά 20 μέτρα και το κόστος για κάθε φύλλο χάρτη είναι 35 €. Το συνολικό κόστος της προμήθειας των έτοιμων Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους ανέρχεται στις 1.585 €.

Η τρίτη εναλλακτική λύση για την δημιουργία του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους είναι η προμήθεια εικόνων δορυφορικής συμβολομετρίας SAR (Synthetic Aperture Radar). Η λύση αυτή ενώ ενδείκνυται για τη δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους σε μεγάλες περιοχές στην περίπτωση της περιοχής του δάσους του Ταϋγέτου δεν συνίσταται η χρήση της καθώς στην περιοχή μελέτης υπάρχει έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο με αποτέλεσμα να καθίσταται δύσκολη η εφαρμογή αυτής της τεχνικής στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.

Στον Πίνακα 2.4 παρουσιάζονται αναλυτικά τα στοιχεία που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός λεπτομερούς ΓΣΠ για την συγκεκριμένη εφαρμογή. Παρουσιάζονται και διάφορες εναλλακτικές λύσεις ενώ δεν έχει υπολογιστεί το κόστος προμήθειας του ψηφιοποιητή, του λογισμικού πακέτου επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων (π.χ. ERDAS, ErMapper) καθώς και του ΓΣΠ (π.χ ArcInfo, MapInfo).

**Πίνακας 2.4.** Το εκτιμώμενο κόστος προμήθειας των απαραίτητων στοιχείων για τη δημιουργία ενός λεπτομερούς ΓΣΠ.

Στοιχείο	Επιθυμητή Κλίμακα	Ποσότητα	Κόστος (€)
Τοπογραφικός χάρτης	1:5000	45	132,06
Έτοιμα ΨΜΥ από ΓΥΣ		45	1584,74
Γεωλογικός χάρτης	1:50000	2	35,22
Χάρτης Γενικής Χρήσης	1:50000	2	11,74
Χάρτης Χρήσης Γης	1:50000	2	
Χάρτης Γαιοϊκανότητας	1:50000	2	
Δορυφορική εικόνα (IKONOS)			5.000

Εκτός από τους χάρτες για τη δημιουργία ενός λεπτομερούς ΓΣΠ, σε αυτήν την φάση, απαιτείται ακόμα η ύπαρξη ενός layer από μωσαϊκό αεροφωτογραφιών και μία δορυφορική εικόνα. Επειδή, η διαδικασία συνένωσης των αεροφωτογραφιών για την κάλυψη της περιοχής μελέτης αναμένεται να είναι αρκετά επίπονη τόσο από άποψη χρόνου όσο και από άποψη ευκρίνειας (δεν είναι πάντα διαθέσιμες οι αεροφωτογραφίες της καλύτερης δυνατής κλίμακας) προτείνεται η προμήθεια μιας εικόνας του δορυφόρου IKONOS η οποία έχει γεωμετρική ανάλυση της τάξης του 1m. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ικανοποιητική αντικατάσταση του μωσαϊκού των αεροφωτογραφιών με μια δορυφορική εικόνα. Το κόστος προμήθειας της συγκεκριμένης δορυφορικής εικόνας ανέρχεται στο ποσό των 5.000€ ανάλογα με την ποιότητά της και μπορεί σε πρώτη φάση να θεωρείται μεγάλο αλλά οι πληροφορίες που παρέχονται από μια τέτοια εικόνα είναι τέτοιες που αποσβένουν ταχύτατα το κόστος προμήθειας.

Μέχρι τώρα έχουν αναφερθεί τα στοιχεία που αφορούν το κόστος δημιουργίας του ΓΣΠ που απαιτείται για τη δημιουργία των χαρτών επικινδυνότητας. Η αξιοπιστία των χαρτών επικινδυνότητας εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, και από τα μοντέλα καύσιμης ύλης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι ανάκτησης πληροφοριών σχετικών με την καύσιμη ύλη μιας δασικής περιοχής. Η μεθοδολογία που πρέπει να ακολουθηθεί είναι η εξής:

- Βιβλιογραφική έρευνα για τα είδη της βλάστησης στην περιοχή μελέτης,
- Πραγματοποίηση επί τόπου μετρήσεων (καύσιμης ύλης, τοπογραφικές αποτυπώσεις, κ.ά) στην περιοχή μελέτης,
- Αντιστοίχιση της υπάρχουσας βλάστησης σε κάποιο ήδη γνωστό μοντέλο καύσιμης ύλης (π.χ. Anderson)
- Επιλογή του κατάλληλου δείκτη για το δυναμικό εκδήλωσης πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης.

Η βιβλιογραφική έρευνα μπορεί να γίνει με την χρησιμοποίηση στοιχείων από Δημόσιες Υπηρεσίες (Υπουργείο Γεωργίας, Δασική Υπηρεσία) αλλά και από οργανισμούς προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος (π.χ. World Wildlife Fund-WWF). Συμπληρωματικά της βιβλιογραφικής έρευνας μπορούν να πραγματοποιηθούν επί τόπου μετρήσεις για τον προσδιορισμό της ποιότητας της καύσιμης ύλης στην περιοχή μελέτης.

Ωστόσο, αυτή είναι μια διαδικασία η οποία, τουλάχιστον σε πρώτη φάση, μπορεί να παραλειφθεί και να εφαρμοστεί είτε στην περίπτωση που δεν είναι εφικτή η αξιόπιστη αντιστοίχιση της βλάστησης της περιοχής μελέτης σε κάποιο υπάρχον μοντέλο καύσιμης ύλης είτε στην περίπτωση που κατά την διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος παρατηρηθούν σημαντικές αποκλίσεις του μοντέλου από την πραγματική συμπεριφορά της βλάστησης.

Από τη στιγμή που έχει γίνει η βιβλιογραφική έρευνα πρέπει να γίνει αντιστοίχιση της υπάρχουσας βλάστησης με κάποιο αποδεκτό μοντέλο καύσιμης ύλης. Το μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μοντέλο πρόβλεψης της διάδοσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ώστε αυτά τα δύο να είναι συμβατά.

Από τα μοντέλα καύσιμης ύλης που είναι ευρέως διαδεδομένα στην περίπτωση του δάσους του Ταϋγέτου αρκετά καλή εφαρμογή μπορεί να βρει το μοντέλο του Anderson καθώς αφενός μεν είναι ένα γενικό μοντέλο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε οποιαδήποτε περιοχή μελέτης και αφετέρου είναι συμβατό με τα περισσότερα μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς. Η περιγραφή του μοντέλου αυτού είναι διαθέσιμη στο Διαδίκτυο ενώ έχει πραγματοποιηθεί πλήθος εφαρμογών με βάση το μοντέλο του Anderson με αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ο δείκτης που θα χρησιμοποιηθεί για την απεικόνιση του δυναμικού εκδήλωσης πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης εξαρτάται από τον αναλυτή και έτσι μπορεί να είναι κάποιος δείκτης τον οποίο ο αναλυτής θα έχει προσαρμόσει ειδικά στην περιοχή μελέτης ή επίσης μπορεί να είναι κάποιος δείκτης που χρησιμοποιείται από διεθνείς υπηρεσίες και οργανισμούς στα πλαίσια εθνικών ή τοπικών συστημάτων αντιμετώπισης πυρκαγιών (π.χ. KDBI, FBI). Παραδείγματα τέτοιων δεικτών έχουν αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα ενώ ανάλογα με τον δείκτη που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί πρέπει να υπάρχει και η κατάλληλη υποδομή για την πραγματοποίηση των απαιτούμενων μετρήσεων.

Η ολοκλήρωση της εκτίμησης επικινδυνότητας στα πλαίσια του συστήματος αντιμετώπισης και διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση ενός μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς. Στην ενότητα 2.4 παρουσιάστηκαν τα είδη των μοντέλων πρόβλεψης της διάδοσης που υπάρχουν σήμερα στο εμπόριο. Έχοντας συνεχώς υπόψη ότι κανένα μοντέλο δεν είναι δυνατόν να προβλέψει 100% την πορεία της πυρκαγιάς, η επιλογή του καλύτερου για κάθε περιοχή μελέτης μοντέλου εξαρτάται από τον αναλυτή.

Από τα μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί το μοντέλο FarSite παρουσιάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα (ψηφιακά δεδομένα, ταχύτητα υπολογισμών, φιλικό προς τον χρήστη κ.ά.) ενώ το συγκεκριμένο μοντέλο έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών στον διεθνή χώρο με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Βέβαια, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που δίνει οποιοδήποτε μοντέλο εξαρτάται από τα δεδομένα που θα εισάγει ο χρήστης σε αυτό. Για το συγκεκριμένο μοντέλο, έχει ήδη αναφερθεί, πως απαιτείται η ύπαρξη ενός λεπτομερούς ΓΣΠ, το οποίο για την περιοχή μελέτης του δάσους του Ταυγέτου θα έχει ήδη δημιουργηθεί για τις ανάγκες του χάρτη επικινδυνότητας. Το μοντέλο FarSite είναι διαθέσιμο στο Διαδίκτυο και μπορεί να το προμηθευτεί κανείς ελεύθερα.

Με την επιλογή του μοντέλου πρόβλεψης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί ουσιαστικά ολοκληρώνεται το στάδιο της προετοιμασίας του συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών. Μέχρι τώρα ο μελετητής έχει δημιουργήσει ένα λεπτομερές ΓΣΠ της περιοχής μελέτης, έχει γίνει ταξινόμηση της βλάστησης, δημιουργία του χάρτη επικινδυνότητας καθώς επίσης και προσομοίωση της αναμενόμενης κίνησης της πυρκαγιάς μέσω του μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς.

Αυτό σημαίνει πως οι χρήστες του συστήματος είναι σε θέση να γνωρίζουν τα τμήματα της περιοχής μελέτης που εμφανίζουν υψηλή πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς (μέσω του χάρτη επικινδυνότητας) και να προβλέψουν την κίνηση της πυρκαγιάς σε ενδεχόμενη εκδήλωση του φαινομένου (μέσω του μοντέλου πρόβλεψης) και έτσι να είναι κατάλληλα προετοιμασμένοι για την περίπτωση πιθανής ανάφλεξης.

Το σύστημα αντιμετώπισης και διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών έχει ως κύριο σκοπό την άμεση ανίχνευση και επομένως έγκαιρη και αποτελεσματική καταστολή της. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι τεχνικές και τα απαιτούμενα μέσα για την έγκαιρη ανίχνευση της πυρκαγιάς.

### ***Κεφάλαιο 3- Ανίχνευση Δασικών Πυρκαγιών***

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση των διάφορων τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί για την ανίχνευση των δασικών πυρκαγιών. Γίνεται περιγραφή τόσο των συμβατικών τεχνικών (οπτική παρακολούθηση) όσο και των πλέον σύγχρονων τεχνικών που περιλαμβάνουν την χρησιμοποίηση δορυφορικών εικόνων. Το Κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση οικονομοτεχνικών στοιχείων και την επιλογή της βέλτιστης τεχνικής για την έγκαιρη και αποτελεσματική ανίχνευση ενδεχόμενης πυρκαγιάς στο δάσος του Ταϊγέτου.

#### **3.1. Εισαγωγή**

Στα πλαίσια ανάπτυξης και λειτουργίας ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών, η έγκαιρη ανίχνευση της εκδήλωσης του φαινομένου αποτελεί έναν από τους πλέον καθοριστικούς τομείς που θα κρίνει στη συνέχεια τη λειτουργικότητα και αποδοτικότητα του συστήματος. Όσο καλό μοντέλο πρόβλεψης και αν έχει δημιουργηθεί ή όσο οργανωμένες και αν είναι οι δυνάμεις πυρόσβεσης εάν υπάρξει σημαντική καθυστέρηση στην ανίχνευση της πυρκαγιάς το αποτέλεσμα θα είναι σίγουρα αποθαρρυντικό και η φυσική καταστροφή δεδομένη.



Η πλέον κρίσιμη παράμετρος στην διαδικασία ανίχνευσης της πυρκαγιάς είναι ο χρόνος μετά την έναρξη του φαινομένου στον οποίο θα επιτευχθεί η ανίχνευση αυτή και θα ειδοποιηθούν τα μέσα πυρόσβεσης. Οι διάφορες τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί εμφανίζουν διαφορετικούς χρόνους ανίχνευσης της πυρκαγιάς με την οπτική παρατήρηση να αποτελεί συνήθως την πιο άμεση τεχνική ανίχνευσης και τη χρησιμοποίηση δορυφορικών δεδομένων ως την τεχνική με την μεγαλύτερη καθυστέρηση. Τα παραπάνω μπορούν να μεταβληθούν ανάλογα με την περιοχή μελέτης.

Ήδη έχουν αναφερθεί δύο τεχνικές μέσω των οποίων μπορεί να γίνει η ανίχνευση των δασικών πυρκαγιών: η οπτική παρακολούθηση και η χρήση δορυφορικών εικόνων. Υπάρχουν διάφορες άλλες τεχνικές με παραπλήσιες ή εντελώς διαφορετικές αρχές λειτουργίας. Έτσι, για να την ανίχνευση των πυρκαγιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές που στηρίζονται στην οπτική ανίχνευση της πυρκαγιάς (καπνοί) αλλά και την ανίχνευση της διαφοράς θερμοκρασίας (υπέρυθροι και άλλοι ανιχνευτές).

Η δυνατότητα κάθε τεχνικής ανίχνευσης να παρέχει άμεσα τα αποτελέσματά της σε ένα κέντρο ελέγχου ώστε να μπορούν να ειδοποιηθούν άμεσα οι υπηρεσίες πυρόσβεσης είναι μια παράμετρος που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αναφορικά με τη λειτουργικότητα και αποτελεσματικότητα της τεχνικής στα πλαίσια του συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα παρουσιαστούν και αναλυθούν διάφορες τεχνικές ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση της βέλτιστης τεχνικής ανίχνευσης για την περιοχή του δάσους του Ταϋγέτου. Η παρουσίαση των τεχνικών γίνεται με την ομαδοποίησή τους σε *επίγειες*, *εναέριες* και *δορυφορικές*.

### **3.2. Επίγειες τεχνικές ανίχνευσης**

Οι επίγειες τεχνικές ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών περιλαμβάνουν την συμβατική οπτική παρακολούθηση της περιοχής ενδιαφέροντος από πύργους ελέγχου αλλά και σύγχρονες τεχνικές που περιλαμβάνουν τη χρησιμοποίηση πλήρως αυτοματοποιημένων συσκευών, που στηρίζονται στις αρχές της Τηλεπισκόπησης, και στις οποίες δεν εμπλέκεται στη διαδικασία ανίχνευσης καθόλου ο παράγοντας άνθρωπος.

#### **3.2.1. Οπτική παρακολούθηση**

Η τεχνική αυτή αποτελεί τον παλαιότερο τρόπο παρακολούθησης και ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών. Περιλαμβάνει την πραγματοποίηση περιπολιών από κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό μέσα στην περιοχή μελέτης με σκοπό την άμεση ανίχνευση της πυρκαγιάς. Το

προσωπικό που είναι επιφορτισμένο με την πραγματοποίηση των περιπολιών είναι εφοδιασμένο και με κατάλληλους ραδιοπομπούς ώστε όταν γίνει η ανίχνευση της πυρκαγιάς να ειδοποιηθούν άμεσα οι υπηρεσίες πυρόσβεσης.

Η παρακολούθηση της περιοχής ενδιαφέροντος γίνεται και με την ίδρυση πύργων ελέγχου (Σχήμα 3.1) και επάνδρωση αυτών με κατάλληλα εκπαιδευμένο προσωπικό το οποίο έχει την ευθύνη παρακολούθησης της δασικής περιοχής και είναι εφοδιασμένο με τα κατάλληλα μηχανήματα ώστε να μπορούν να ειδοποιηθούν άμεσα οι υπηρεσίες πυρόσβεσης.

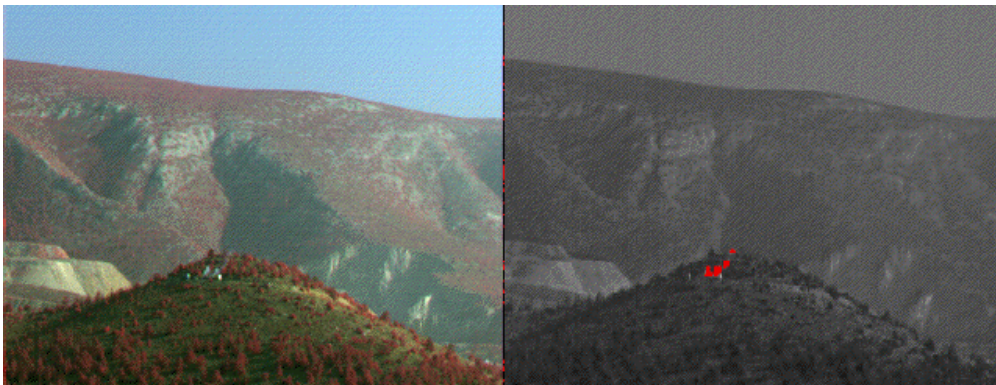


*Σχήμα 3.1. Πύργος παρακολούθησης δασικών πυρκαγιών.*

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ο χρόνος εντός του οποίου επιτυγχάνεται η ανίχνευση της πυρκαγιάς. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο μέσος χρόνος ανίχνευσης με την τεχνική αυτή είναι 15 λεπτά της ώρας. Στα μειονεκτήματα της τεχνικής αυτής περιλαμβάνεται η μικρή περιοχή ελέγχου που έχουν συνήθως οι πύργοι ελέγχου. Το μειονέκτημα αυτό εξαρτάται φυσικά από το ανάγλυφο της περιοχής παρατήρησης και το ύψος του πύργου ελέγχου.

### 3.2.2. Ψηφιακές Κάμερες

Επίσης, υπάρχουν δέκτες όπως το Airborne Wildfire Intelligence System (AWIS) που ουσιαστικά αποτελούν σύστημα Τηλεπισκόπησης αλλά όχι δορυφορικό. Η αρχή λειτουργίας του AWIS είναι αρκετά απλή. Λαμβάνει εικόνες της περιοχής μελέτης με κατάλληλους δέκτες και έχει την δυνατότητα αποστολής των δεδομένων αυτών σε επίγειους σταθμούς ελέγχου (Σχήμα 3.2). Κάθε δέκτης έχει την δυνατότητα κάλυψης περιοχής εδάφους  $5\text{m}^2$  με αποτέλεσμα να χρειάζονται 5 ως 10 δέκτες για την κάλυψη μιας περιοχή  $1000\text{m}^2$  ανάλογα πάντα με το ανάγλυφο της περιοχής. Ο δέκτης AWIS χρησιμοποιεί υπέρυθρη ακτινοβολία για την ανίχνευση της πυρκαγιάς.



*Σχήμα 3.2. Εικόνα από τον δέκτη AWIS από τις πυρκαγιές στην Αθήνα το 1994.*

Ένα άλλο παράδειγμα ψηφιακής κάμερας που μπορεί να τοποθετηθεί σε ένα πύργο ελέγχου είναι το σύστημα FireHawk. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο σύστημα, που αποτελείται από κάμερες, μικροκυματικούς πομπούς και δέκτες, οθόνες και λογισμό υπολογιστή, που υποβοηθάται από έναν χρήστη.

Το σύστημα συστηματικά και με ηλεκτρονικό τρόπο ελέγχει μια συγκεκριμένη περιοχή για την εκδήλωση πυρκαγιάς. Η ανίχνευση της πυρκαγιάς επιτυγχάνεται στον μικρότερο δυνατό χρόνο. Η κάμερα του συστήματος καλύπτει περιοχή 6 km, τοποθετημένη σε κάποιο πύργο ελέγχου, έχει την δυνατότητα περιστροφής  $360^\circ$  μοιρών. Εικόνες βίντεο αποστέλλονται σε πραγματικό χρόνο στο κέντρο ελέγχου όπου ένας επεξεργαστής συγκεντρώνει τις εικόνες σε πραγματικό χρόνο και ανά τακτά χρονικά διαστήματα (της τάξης των μερικών λεπτών της ώρας) τις συγκρίνει και ειδοποιεί μόλις εντοπιστεί πυρκαγιά. Η ύπαρξη ανθρώπου κρίνεται βοηθητική για την αποφυγή λανθασμένων ενδείξεων αν και χρησιμοποιούνται ειδικοί αλγόριθμοι για την αποφυγή σφαλμάτων.

### 3.3. Εναέριες τεχνικές ανίχνευσης

Οι εναέριες τεχνικές ανίχνευσης χρησιμοποιούν, σε γενικές γραμμές, τα ίδια συστήματα που χρησιμοποιούνται και από τις δορυφορικές τεχνικές με την διαφορά ότι οι τελευταίες επιτυγχάνουν την παρατήρηση πολύ μεγαλύτερης περιοχής ενδιαφέροντος.

Στα εναέρια μέσα ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών περιλαμβάνονται η λήψη αεροφωτογραφιών, οι εναέριοι θερμικοί και υπέρυθροι σαρωτές, τα ενάρια radar και άλλα που αναλύονται στη συνέχεια.

#### 3.3.1. Οπτική παρατήρηση

Μια απλή μέθοδος ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών είναι οι συστηματικές πτήσεις αεροπλάνων ή ελικοπτέρων (Σχήμα 3.3) πάνω από τις περιοχές ενδιαφέροντος και η οπτική παρατήρηση των πιλότων για ενδεχόμενη πυρκαγιά. Ως τεχνική η μέθοδος αυτή ομοιάζει με την δημιουργία πύργων ελέγχου με την διαφορά ότι σε αυτήν μπορούν να καλυφθούν πολύ μεγαλύτερες περιοχές.



*Σχήμα 3.3. Ελικόπτερο μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την ανίχνευση πυρκαγιών*

Πάλι υπάρχουν τα μειονεκτήματα της εκπαίδευσης του προσωπικού αλλά και της έγκαιρης ανίχνευσης καθώς το ανθρώπινο μάτι δεν μπορεί να αντιληφθεί την αρχή της πυρκαγιάς αλλά η ανίχνευσή της γίνεται αφού αυτή έχει λάβει σημαντικές διαστάσεις.

#### 3.3.2. Θερμικοί Ανιχνευτές

Κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών υπάρχει το πρόβλημα του εντοπισμού της εστίας της λόγω των πυκνών καπνών που έχουν δημιουργηθεί με αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η δουλειά του πιλότου καθώς αυτός δεν μπορεί να εντοπίσει το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς αλλά και το κυρίως μέτωπό της.

Υπάρχουν όμως απλά και φιλικά στον χρήστη συστήματα για την ανίχνευση της πυρκαγιάς μέσα από τους καπνούς. Πρόκειται για κάμερες οι οποίες είτε είναι φορητές και τις κρατάει ο συγκυβερνήτης του αεροπλάνου (Σχήμα 3.4α) είτε τοποθετούνται στη άτρακτο του αεροπλάνου / ελικοπτέρου και παρέχουν συνεχή λήψη στο πλήρωμα (Σχήμα 3.4β):



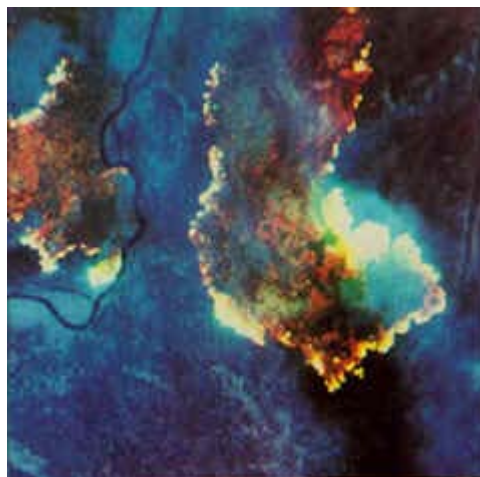
*Σχήμα 3.4. Θερμικοί ανιχνευτές σε εναέριες τεχνικές ανίχνευσης (α) φορητοί (β) σταθεροί.*

Ένα άλλο σύστημα που έχει αναπτυχθεί, ονομάζεται ABS (Airborne Bi-spectral Scanner) (Σχήμα 3.5) και πέραν την θερμικής ανίχνευσης έχει τη δυνατότητα ανίχνευσης και σε κανάλι της επιλογής του χρήστη.

Πρόκειται για μια διπλή οπτική θύρα, έναν σαρωτή δύο φασματικών ζωνών που αποτελείται από μία κεφαλή σάρωσης με έναν ή δύο ανιχνευτές. Το σύστημα πραγματοποιεί ταυτόχρονη σάρωση στο θερμικό και σε μια δεύτερη φασματική περιοχή μεταξύ των εγγύς υπέρυθρο, ορατό ή υπεριώδες. Η οθόνη που βρίσκεται στο αεροσκάφος / ελικόπτερο παρέχει έλεγχο, σε πραγματικό χρόνο, της πορείας της πτήσης (λόγω της ύπαρξης ενσωματωμένου δέκτη GPS) και της ποιότητας των δεδομένων.



*Σχήμα 3.5. Το σύστημα ABS*



*Σχήμα 3.6. Ανίχνευση πυρκαγιάς από το σύστημα ABS*

Υπάρχουν αρκετά ακόμα συστήματα τα οποία αποτελούνται από θερμικούς ανιχνευτές και στηρίζονται στις ίδιες αρχές λειτουργίας. Η διαφορά τους, και επομένως η επιλογή του βέλτιστου συστήματος είναι συνάρτηση της αξιοπιστίας, της δυνατότητας παροχής λεπτομερών δεδομένων, της δυνατότητας μετάδοσης των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και φυσικά του κόστους προμήθειας / συντήρησης αυτών.

### **3.3.3. Υπέρυθροι ανιχνευτές**

Όταν αναφέρεται κανείς σε τεχνικές και όργανα ανίχνευσης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό της εστίας δασικών πυρκαγιών πρέπει να λάβει υπόψη του ότι οι ανιχνευτές που στηρίζονται στις αρχές της Τηλεπισκόπησης (είτε εναέριοι είτε δορυφορικοί) έχουν την δυνατότητα (τουλάχιστον οι περισσότεροι από αυτούς) για καταγραφή σημάτων επομένως και απεικόνιση της περιοχής μελέτης σε διάφορες φασματικές ζώνες.

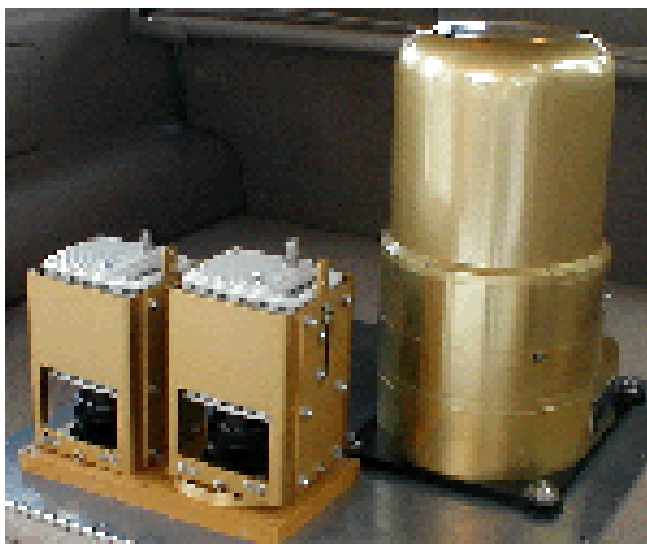


Ενδεικτικά αναφέρεται η συσκευή *FireMapper* (Σχήμα 3.7) η οποία είναι ένα υψηλής ακρίβειας, εναέριο σύστημα απεικόνισης με δυνατότητα επιλογής μεταξύ 3 υπέρυθρων και δύο ορατών φασματικών ζωνών. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 3.1 ενώ είναι χαρακτηριστικό πως το σύστημα καταγράφει όλα τα δεδομένα με συντεταγμένες GPS και έχει την δυνατότητα άμεσης μετάδοσης των εικόνων.

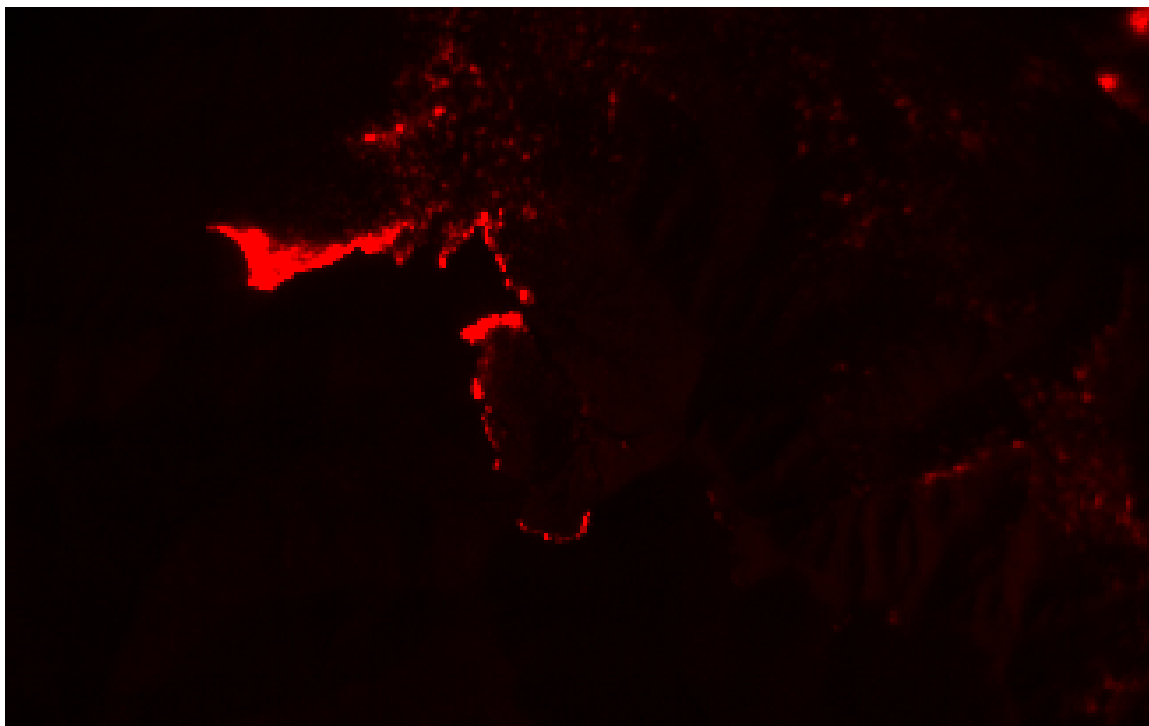
**Πίνακας 3.1.** Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή *FireMapper*

<b>Απόδοση Δέκτη:</b>	<b>Υπέρυθρες Ζώνες</b>	<b>Ορατές Ζώνες</b>
Φασματικές ζώνες	8,0 ως 12.5 μ	0.615 ως 0.685μ
	8.2 ως 9.0 μ	0.815 ως 0.885μ
	11.5 ως 12.5μ	
Αριθμός εικονοστοιχείων	327 x 245	1528 x 1024
Καταγραφή (bits )	16	10
Χωρική διακρ. Ικανότητα IFOV ( mrad)	1.85	0.375
Οπτικό πεδίο FOV (deg)	34.7	32.8
<b>Φυσικές παράμετροι του δέκτη</b>		
Βάρος (Kgr)	55	35
Μέγεθος (cm )	23 x 28 x 56	15 x 29 x 25,4
Ισχύς (watts)	25	16
Δεδομένα ανά εικόνα (Mbytes)	0.136	3.13

Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της καταγραφής με το σύστημα *FireMapper* της πυρκαγιάς που έλαβε χώρα στην περιοχή Serra do Maranhao στην βόρειο Βραζιλία τον Σεπτέμβριο του 2000 στην φασματική ζώνη των 8.5μm (InfraRed).



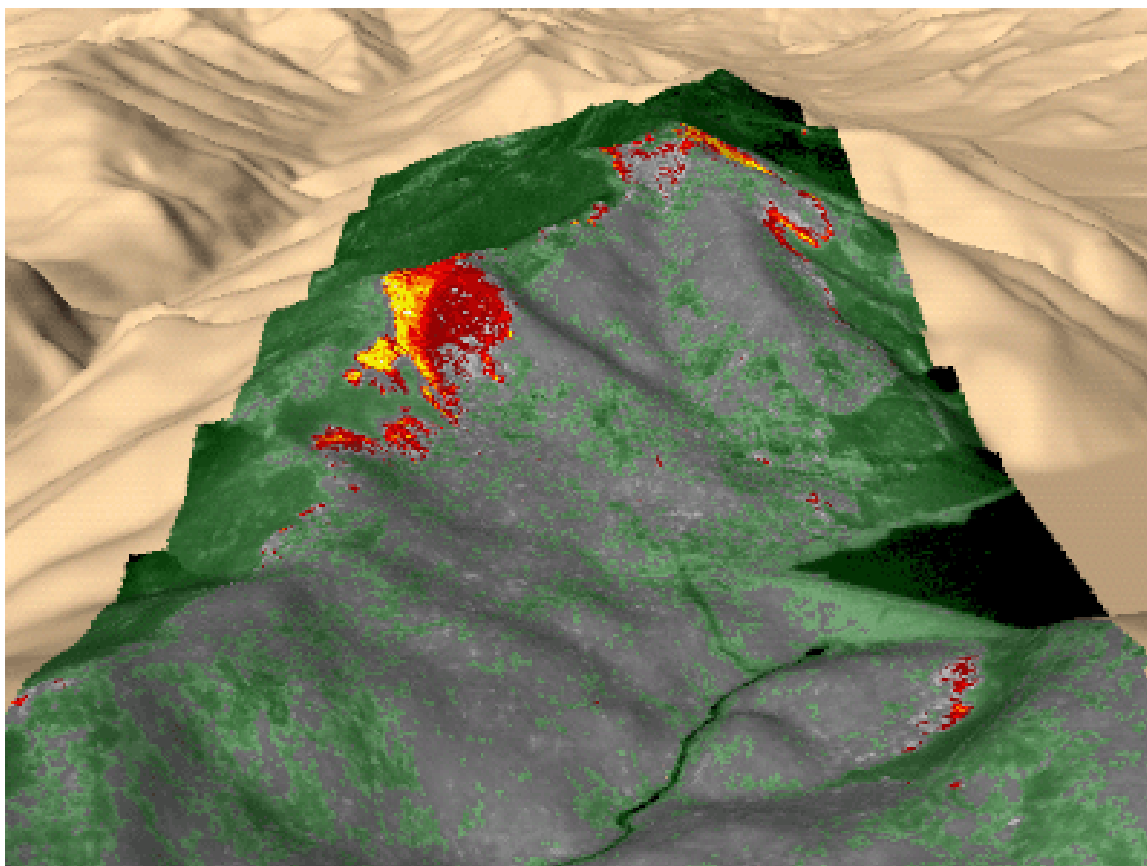
*Σχήμα 3.7. Το σύστημα FireMapper.*



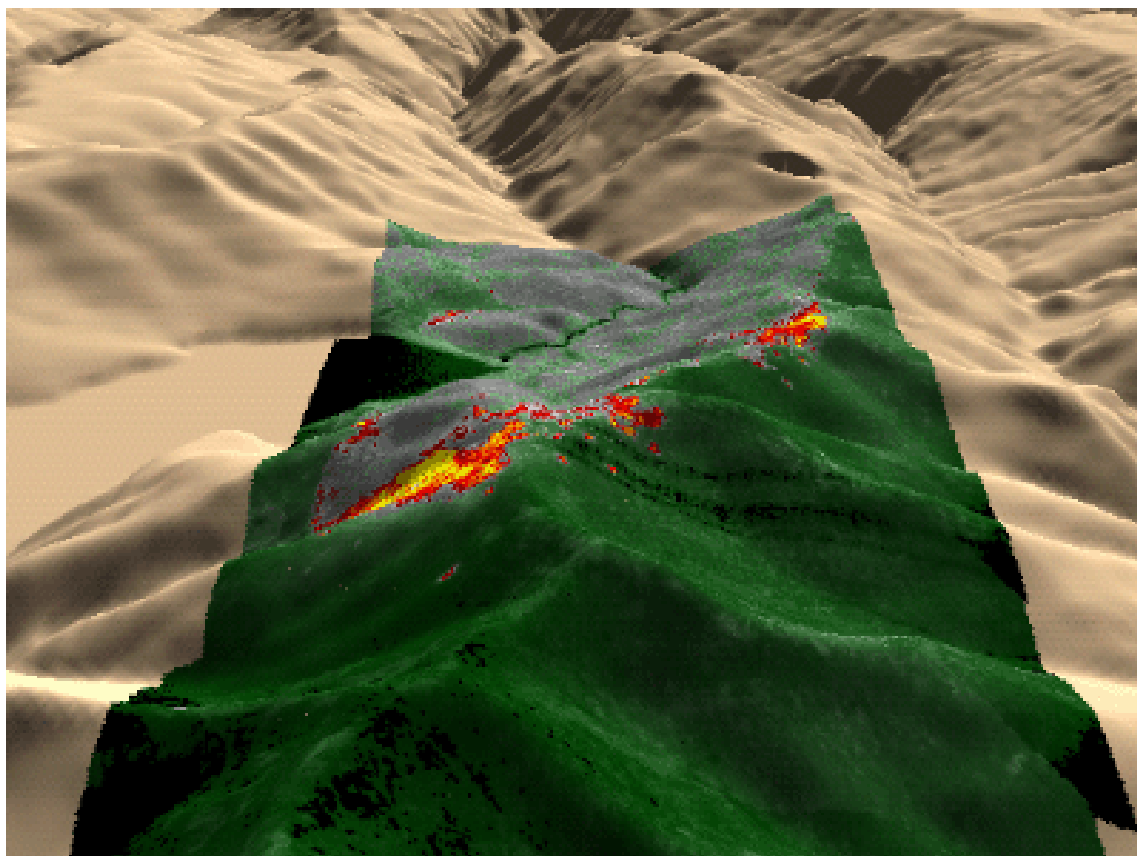
*Σχήμα 3.8. Η καταγραφή δασικής πυρκαγιάς με το σύστημα FireMapper.*



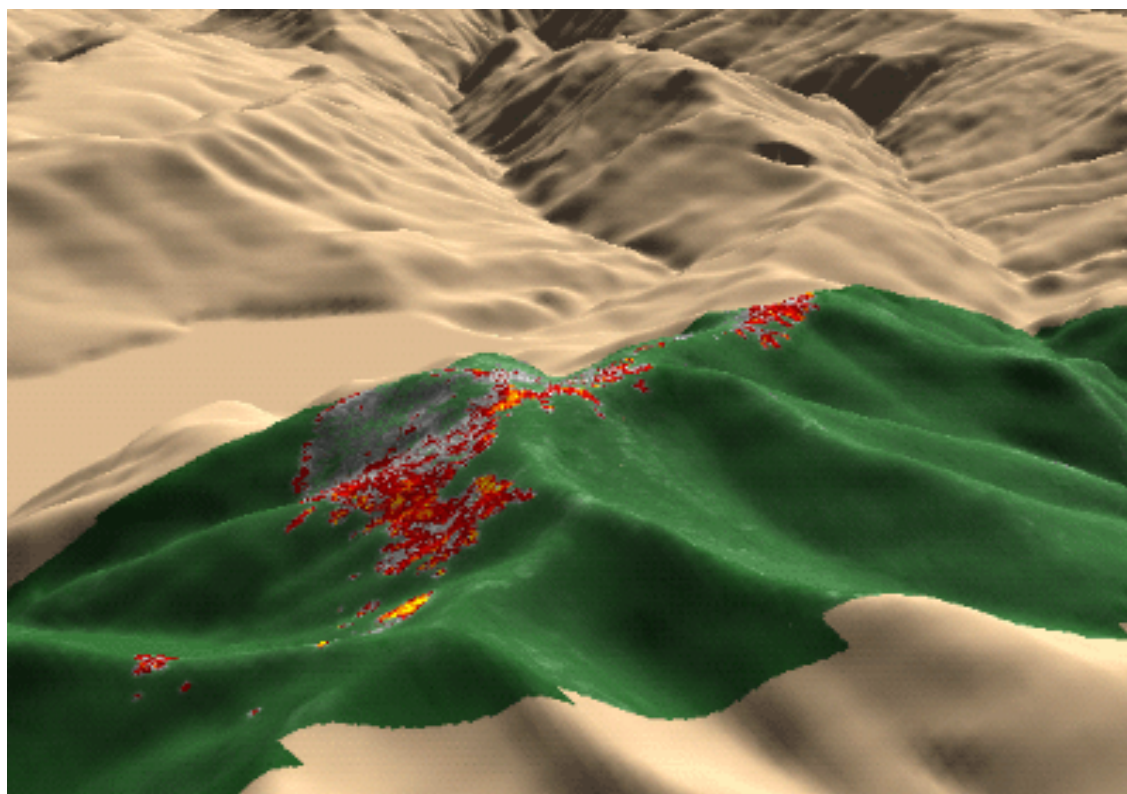
Ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής του συστήματος FireMapper είναι η πυρκαγιά που ξέσπασε στο Εθνικό Πάρκο του Eldorado, ΗΠΑ, στις 29 Αυγούστου 2001. Οι εικόνες που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια λήφθηκαν από αεροπλάνο και μεταδόθηκαν κατά τμήματα μέσω τηλεπικοινωνιακών δορυφόρων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Το σύστημα FireMapper μετράει την ακτινοβολία του εκπεμπόμενου θερμικού – υπέρυθρου φωτός, το οποίο διαπερνά τον καπνό. Ψευδοχρωματικές εικόνες δείχνουν την φαινόμενη επιφανειακή θερμοκρασία με τις θερμότερες περιοχές να αναπαριστώνται με ανοιχτά χρώματα, με στις αποχρώσεις του γκρι να φανερώνουν περιοχές στάχτης ενώ οι περιοχές όπου δεν έχει εκδηλωθεί ακόμα πυρκαγιά εμφανίζονται με το πράσινο χρώμα.



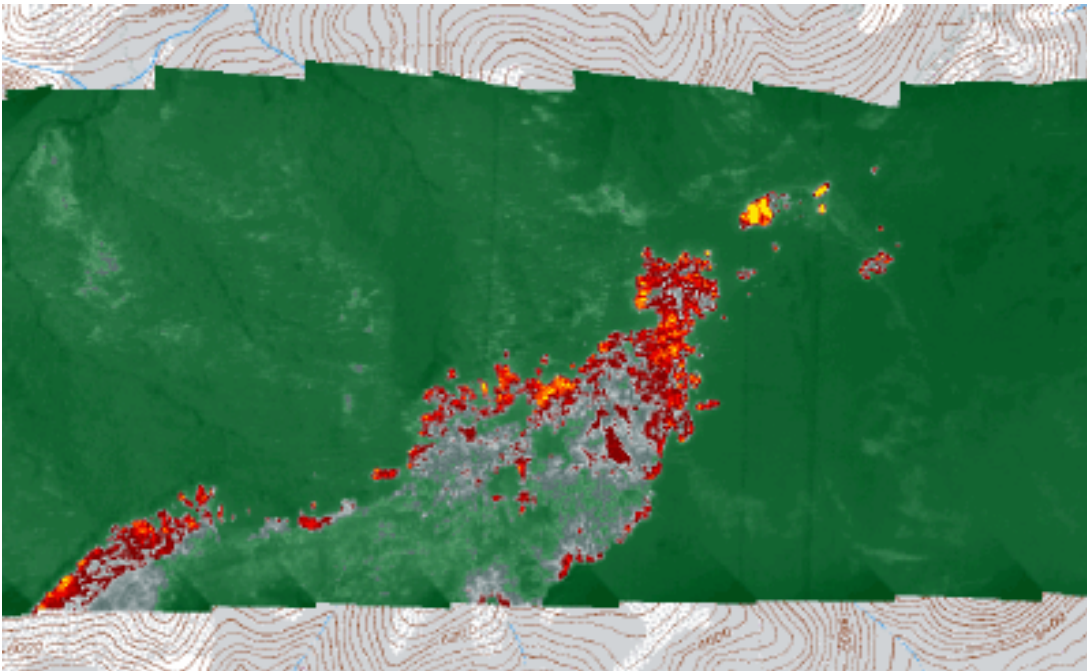
**Σχήμα 3.9.** Η εικόνα αυτή λήφθηκε στις 1415 τοπική ώρα. Εμφανίζεται η κύρια εστία της πυρκαγιάς στα αριστερά της εικόνας ενώ η πιο ψυχρή, λεπτή γραμμή στο κάτω δεξιά τμήμα είναι φωτιά που μόλις έχει αρχίσει να φουντώνει.



*Σχήμα 3.10. Εικόνα από ΒΑ λήψη στις 14:15μμ τοπική ώρα.*



*Σχήμα 3.11. Εικόνα από την ίδια γωνία λήψης όπως το Σχήμα 3.10 στις 17:52μμ τοπική ώρα. Παρατηρείται ότι η κυρίως γραμμή της πυρκαγιάς έχει περάσει το φαράγγι στο κέντρο αριστερά και διάφορες εστίες έχουν δημιουργηθεί κατά μήκος του φαραγγιού.*



**Σχήμα 3.12.** Κάτοψη της περιοχής στις 17:52μμ τοπική ώρα. Κατόψεις όπως αυτή μπορούν να βοηθήσουν σημαντικά του πυροσβέστες δίνοντας τους τις ακριβείς συντεταγμένες των εστιών και ταξινομώντας τις εστίες ανάλογα με την έντασή τους.

#### 3.3.4. Μη Επανδρωμένες Εναέριες Πτήσεις

Η Αμερικανική Υπηρεσία Διαστήματος (NASA) έχει κατασκευάσει ένα ειδικό τύπο αεροπλάνου το ALTUS II (Σχήμα 3.13) που πραγματοποιεί πτήσεις στα 18.000m, λαμβάνει φωτογραφίες των πυρκαγιών στις υποκείμενες περιοχές, τις μεταδίδει (τις εικόνες) στο Διαδίκτυο (Internet) από όπου το κέντρο συντονισμού της κατάσβεσης της πυρκαγιάς τις παρακολουθεί σε πραγματικό χρόνο.



**Σχήμα 3.13 .** Το μη επανδρωμένο αεροπλάνο ALTUS II

Από αυτές τις εικόνες οι άνθρωποι που έχουν επιφορτιστεί με την προσπάθεια κατάσβεσης της πυρκαγιάς, μπορούν να δουν, αφού βέβαια πρώτα τις υπερθέσουν σε κάποιο χάρτη της περιοχής

της ίδιας κλίμακας, τη θέση της πυρκαγιάς αλλά και τον ρυθμό εξάπλωσή της και έτσι να καθορίσουν την στρατηγική για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της φυσικής καταστροφής.

Στην άτρακτο του αεροσκάφους τοποθετείται μια ευρείας γωνίας λήψης τηλεοπτική κάμερα και ένας ψηφιακός, πολυφασματικός σαρωτής που μπορεί να εντοπίζει τις φλόγες μέσα από τον καπνό. Το βάρος όλου του εξοπλισμού είναι περίπου 90Kg.

Τα δεδομένα που λαμβάνονται από την κάμερα και τον σαρωτή στέλνονται σε ένα επικοινωνιακό δορυφόρο. Αυτές οι ψηφιακές πληροφορίες μεταδίδονται σε ειδικό κέντρο της NASA για επεξεργασία εικόνας σε πραγματικό χρόνο. Στη συνέχεια οι επιστήμονες υπερθέτουν τις επεξεργασμένες εικόνες σε χάρτες της περιοχής όπου εκδηλώθηκε η πυρκαγιά και στην συνέχεια τις τοποθετούν στο Διαδίκτυο από όπου μπορούν να τις δούν οι υπεύθυνοι για την κατάσβεση της πυρκαγιάς. Η όλη διαδικασία δεν διαρκεί περισσότερο από 15min.

### **3.4. Δορυφορικές τεχνικές ανίχνευσης**

Οι τεχνικές ανίχνευσης των δασικών πυρκαγιών με δορυφορικές εικόνες δεν διαφέρουν, αναφορικά με τις βασικές αρχές λειτουργίας, από τις εναέριες ή ακόμα και τις επίγειες τεχνικές. Η διαφορά είναι ότι με την χρήση δορυφορικών εικόνων επιτυγχάνεται η κάλυψη μιας αρκετά μεγάλης περιοχής του εδάφους χωρίς ιδιαίτερα μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα. Στην ενότητα αυτή αναφέρονται παραδείγματα δορυφορικών δεκτών που με την κατάλληλη επεξεργασία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανίχνευση δασικών πυρκαγιών καθώς επίσης και οι βασικές αρχές λειτουργίας τους.

#### **3.4.1. Οπτικοί ανιχνευτές**

Οι οπτικοί δορυφορικοί δέκτες είναι δέκτες οι οποίοι έχουν την δυνατότητα να λαμβάνουν σήματα στο ορατό φάσμα του μήκους κύματος. Οι οπτικοί δορυφορικοί δέκτες δεν χρησιμοποιούνται τόσο στην ανίχνευση των δασικών πυρκαγιών αλλά κυρίως στην παρακολούθηση και καταγραφή της καμμένης γης. Ωστόσο κρίθηκε σκόπιμο να αναφερθούν και ως τεχνική ανίχνευσης γιατί πληρούν όλες τις προϋποθέσεις για να χρησιμοποιηθούν με αυτό το σκοπό.

Τα μειονεκτήματα της χρήσης των δορυφορικών οπτικών ανιχνευτών είναι κυρίως η αδυναμία καταγραφής σήματος σε περιοχή που καλύπτεται από έντονη νεφοκάλυψη, η δυσκολία εντοπισμού της εστίας της πυρκαγιάς καθώς επίσης και η, γενικότερη για τους δορυφορικούς ανιχνευτές αδυναμία, άμεσης αποστολής του σήματος στο επίγειο κέντρο ελέγχου.

Ωστόσο, όταν δεν υπάρχει έντονη νεφοκάλυψη πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος οι οπτικοί δορυφορικοί ανιχνευτές μπορούν να εντοπίσουν τον καπνό που έχει δημιουργηθεί από τη πυρκαγιά. Ο καπνός αυτός εμφανίζεται συνήθως ως ανοιχτή γκρι γραμμή. Στο πραγματικό σημείο όπου βρίσκεται η πυρκαγιά, ο καπνός απεικονίζεται ως πυκνή, στενή γραμμή που εξαπλώνεται κατά την φορά του ανέμου. Όταν ο καπνός βρίσκεται υπό την επίρρεια ανέμων, εμφανίζεται ως λεπτότερη και περισσότερο εξαπλωμένη γραμμή. Στην οπτική απεικόνιση ο καπνός μπορεί να εντοπισθεί εκατοντάδες χιλιόμετρα μακριά (πάντα κατά την φορά του ανέμου) από την πραγματική εστία της πυρκαγιάς ως μια γκρι (περισσότερο ομοιάζει με το χρώμα του γάλακτος) περιοχή (Σχήμα 3.14)



*Σχήμα 3.14. Ανίχνευση πυρκαγιάς από οπτικό δορυφορικό ανιχνευτή.*

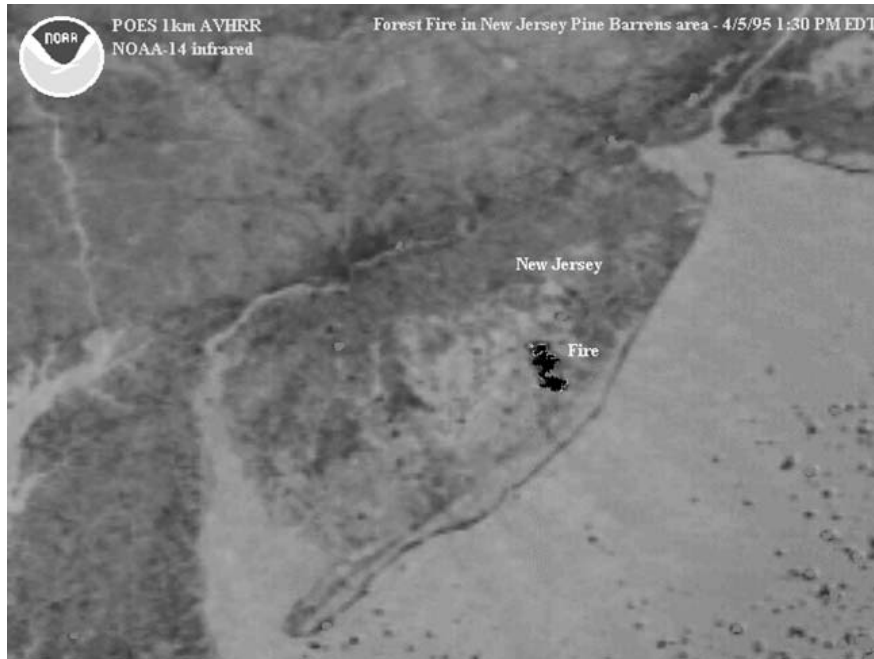
Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι η χρήση των οπτικών δορυφορικών ανιχνευτών εμφανίζει αρκετά μειονεκτήματα και δεν είναι ακριβής ο εντοπισμός της εστίας της πυρκαγιάς. Το γεγονός αυτό καθιστά την χρησιμοποίησή τους μη προτιμητέα για την ανίχνευση δασικών πυρκαγιών.

### **3.4.2. Ανιχνευτές Υπέρυθρου**

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο οι δορυφορικοί ανιχνευτές δεν χρησιμοποιούνται (συνήθως) για την καταγραφή σημάτων σε μια αποκλειστικά φασματική ζώνη. Για λόγους που θα αναφερθούν στην συνέχεια του κεφαλαίου οι κυρίως χρησιμοποιούμενες φασματικές ζώνες είναι αυτές του ορατού και του υπέρυθρου.

Η απεικόνιση και καταγραφή του καπνού που δημιουργείται από μια δασική πυρκαγιά στο υπέρυθρο τμήμα του φάσματος ομοιάζει με αυτήν του ορατού χωρίς φυσικά αυτό να σημαίνει πως περιέχονται οι ίδιες πληροφορίες. Απλά ένας μη ειδικός παρατηρητής των εικόνων θα αντιληφθεί ομοιότητα αναφορικά με τον τρόπο απεικόνισης του καπνού.

Στο Σχήμα 3.15 παρουσιάζεται η καταγραφή της ίδιας πυρκαγιάς που παρουσιάστηκε στο Σχήμα 3.14 αλλά αυτή την φορά όχι στο ορατό αλλά στο υπέρυθρο:



**Σχήμα 3.15.** Απεικόνιση πυρκαγιάς με δορυφορικό ανιχνευτή με καταγραφή στο υπέρυθρο.



### 3.5. Ανίχνευση Δασικών Πυρκαγιών στην Ελλάδα

Στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου αυτού αναφέρθηκαν, συνοπτικά, οι κυριότερες μέθοδοι και τεχνικές ανίχνευσης των δασικών πυρκαγιών. Είναι σαφές πως η βασική απαίτηση όλων των μεθοδολογιών (είτε πρόκειται για επίγεια είτε για δορυφορική ανίχνευση) είναι σε γενικές γραμμές η ίδια: όσο το δυνατόν ταχύτερη ανίχνευση της πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας δέκτες οι οποίοι εκμεταλλεύονται διαφορετικές ιδιότητες της πυρκαγιάς ώστε να προβούν στην ανίχνευσή της.

Έτσι, οι οπτικοί δέκτες ουσιαστικά ανιχνεύουν την ύπαρξη καπνού ενώ οι υπέρυθροι δέκτες εκμεταλλεύονται την διαφορετική θερμοκρασία όπου έχουν οι φλεγόμενες περιοχές από τις γειτονικές τους με αποτελέσματα να ανιχνεύονται οι πυρκαγιές.

Το ερώτημα επομένως που τίθεται είναι το τι πρέπει να γίνει ώστε να είναι δυνατή η έγκαιρη ανίχνευση των δασικών πυρκαγιών. Η ποικιλία δεκτών, τεχνικών ανίχνευσης μάλλον δυσχαιρένει τη λήψη απόφασης καθώς υπάρχει δυσκολία στην εξέρευση της βέλτιστης τεχνικής και μεθοδολογίας.

Όταν αναφέρεται άμεση ανίχνευση δασικών πυρκαγιών σε τοπικό επίπεδο ως τέτοιο θεωρείται ένα εθνικό σύστημα ανίχνευσης πυρκαγιών. Σε αυτή την περίπτωση και με δεδομένη την ύπαρξη ενός εθνικού χάρτη επικινδυνότητας, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα σύστημα ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών που ως σκοπό θα έχει την επιχειρησιακή αντιμετώπιση της πυρκαγιάς, θα πρέπει να έχει την δυνατότητα εντοπισμού της εστίας της πυρκαγιάς με ακρίβεια περίπου 50m ενώ θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να την ανιχνεύσει, σε χρόνο μικρότερο των 15min από την έναρξη της.

Επειδή όμως κανένα δορυφορικό σύστημα δεν είναι δυνατόν να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις για την ανίχνευση των δασικών πυρκαγιών χρησιμοποιούνται, κατά κύριο λόγο, επίγειες ή ακόμα και εναέριες τεχνικές ανίχνευσης. Πέραν των τεχνικών απαιτήσεων οι οποίες δεν είναι δυνατόν να καλυφθούν από ένα δορυφορικό σύστημα ανίχνευσης, το κόστος προμήθειας και επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων καθιστούν την λύση αυτή ανέφικτη, ειδικά σε μια χώρα όπως η Ελλάδα με περιορισμένες οικονομικές δυνατότητες.

Για την άμεση επομένως ανίχνευση των δασικών πυρκαγιών στην χώρα μας μπορεί να υλοποιηθεί ένα εθνικό δίκτυο πύργων ελέγχου οι οποίοι θα είναι εφοδιασμένοι με ειδικές κάμερες, όπως αυτές που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο, και οι οποίες θα έχουν την δυνατότητα άμεσης αποστολής των δεδομένων που λαμβάνουν καταρχήν σε ένα τοπικό κέντρο ελέγχου και από εκεί σε

ένα κεντρικό εθνικό κέντρο ελέγχου από όπου θα γίνεται και ο συντονισμός των προσπαθειών κατάσβεσης.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αφενός μεν η άμεση ανίχνευση των πυρκαγιών σε χρόνους μικρότερους των 15min και αφετέρου δεν απαιτεί τα τεράστια ποσά που απαιτούνται με τις δορυφορικές τεχνικές ανίχνευσης.

Παράλληλα, με την ίδρυση των πύργων ελέγχου μπορεί να δημιουργεί και ένα εθνικό σχέδιο εναέριων περιπόλων με τις οποίες θα είναι δυνατή η παρατήρηση σαφώς μεγαλύτερων περιοχών στο έδαφος. Και αυτές οι περίπολοι θα είναι εφοδιασμένες με ειδικές κάμερες οι οποίες θα έχουν την δυνατότητα άμεσης αποστολής των δεδομένων τους στις τοπικές ή κεντρικές βάσεις ελέγχου.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές πως για την χώρα μας και ειδικότερα για την περιοχή του Ταϋγέτου που αποτελεί και την περιοχή μελέτης η βέλτιστη επιχειρησιακή μέθοδος ανίχνευσης πυρκαγιών είναι η δημιουργία πύργων ελέγχου, μη επανδρωμένων, αλλά εφοδιασμένων με ειδικές κάμερες.

Για τη δημιουργία των πύργων αυτών ελέγχου θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής ώστε κάθε πύργος ελέγχου να επιτηρεί την μέγιστη δυνατή περιοχή με σκοπό και η επιτήρηση να είναι πλήρης και να αποφευχθούν άσκοπες δαπάνες (δημιουργία παραπάνω πύργων ελέγχου από όσους πραγματικά απαιτούνται).

Σε κατάλληλη περιοχή, πλησίον του δάσους του Ταϋγέτου, θα πρέπει να βρίσκεται το κέντρο ελέγχου στο οποίο θα καταφθάνουν οι εικόνες από τους πύργους ελέγχου, στις οποίες εικόνες θα γίνεται επεξεργασία τόσο από ειδικό λογισμικό πρόγραμμα (αυτόματα δηλαδή), όσο και από ειδικούς επιστήμονες με σκοπό να αποφευχθούν λανθασμένοι συναγερμοί. Το κέντρο αυτό ελέγχου θα έχει και τον ρόλο του συντονιστή των προσπαθειών κατάσβεσης της πυρκαγιάς αλλά και της άμεσης ενημέρωσης των δυνάμεων κατάσβεσης και την κίνηση της πυρκαγιάς.

Τα κυριότερα πρόβληματα της όλης στρατηγικής που προτείνεται είναι η δυνατότητα άμεσης μετάδοσης των δεδομένων από τους πύργους ελέγχου στον κέντρο ελέγχου αλλά και της άμεσης επικοινωνίας μεταξύ του συντονιστή των προσπαθειών κατάσβεσης με τις δυνάμεις κατάσβεσης.

Η ύπαρξη αξιόπιστου συστήματος επικοινωνίας είναι ο θεμέλιος λίθος της αποτελεσματικότητας της στρατηγικής που προτείνεται για την ανίχνευση των πυρκαγιών στο δάσος του Ταϋγέτου.



Η μορφολογία της περιοχής, οι απαιτούμενες υποδομές (παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, τηλεφωνικών γραμμών) συνιστούν τις παραμέτρους του προβλήματος που πρέπει να αντιμετωπισθούν προκειμένου να λειτουργήσει το σύστημα ανίχνευσης των πυρκαγιών.

Η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος στους πύργους ελέγχου μπορεί να γίνει με την χρησιμοποίηση γεννητριών οι οποίες θα ελέγχονται και θα συντηρούνται ανά τακτά χρονικά διαστήματα ενώ θα υπάρχει πάντοτε και εφεδρική που θα τίθεται αυτομάτως σε ισχύ σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης.

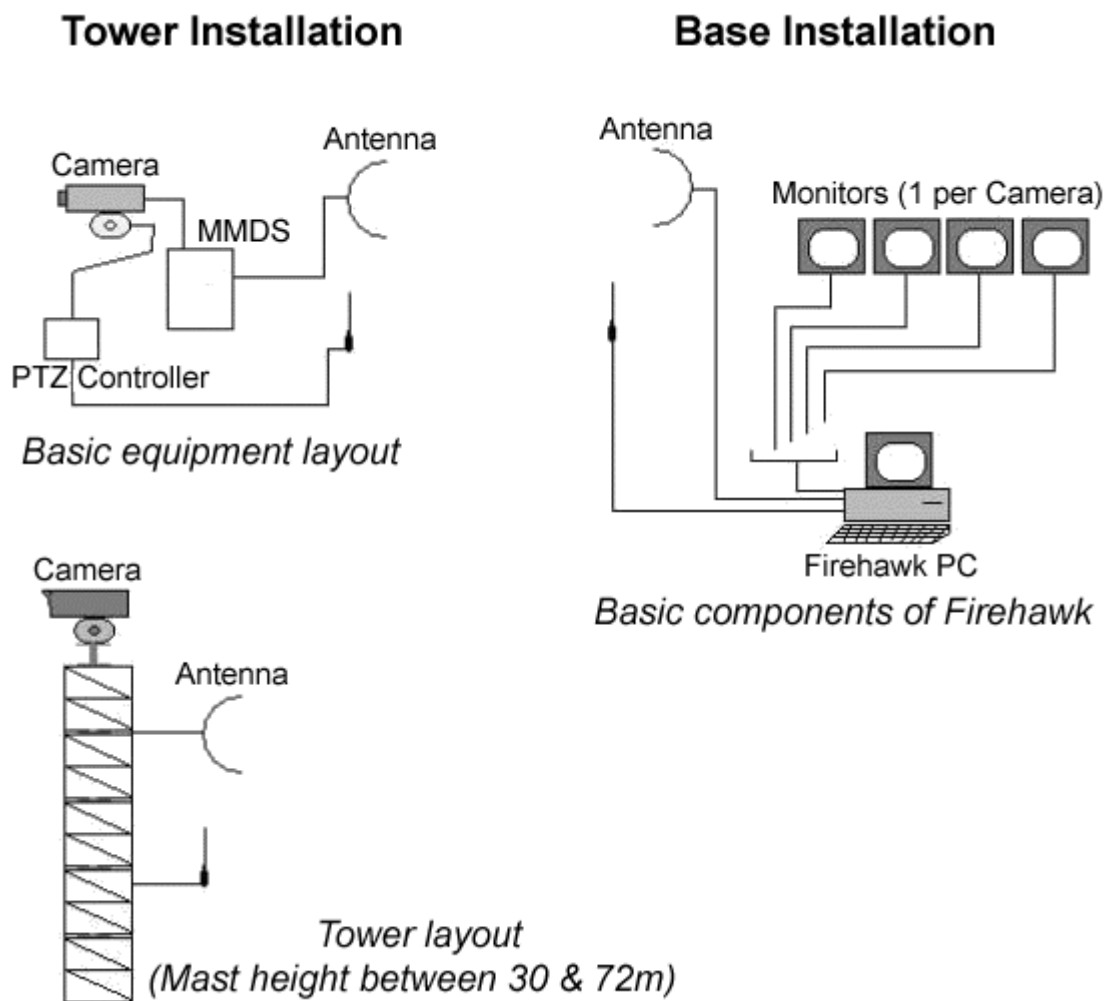
Το θέμα της επικοινωνίας μπορεί να αντιμετωπισθεί με την δημιουργία ραδιο ζεύξεων σε κατάλληλες συχνότητες όπου αφενός μεν θα εξασφαλίζεται η συνεχής παροχή δεδομένων και αφετέρου δεν θα υπάρχει παρεμπόδιση των υπόλοιπων επικοινωνιακών διαύλων. Για να αποφευχθεί το τελευταίο πρέπει να εξασφαλιστεί ειδική άδεια από τα αρμόδια υπουργεία και οργανισμούς όπως για παράδειγμα οι υπηρεσίες Πολιτικής Προστασίας, οι Διευθύνσεις Δασών, τα τοπικά Πυροσβεστικά κλιμάκια, το Υπουργείο Εσωτερικών κ.ά.

Η υλοποίηση του συστήματος επικοινωνίας πρέπει να γίνει από ειδικό τεχνικό προσωπικό ώστε να διασφαλιστεί η συνεχής και απρόσκοπτη λειτουργία του, ενώ στην ομάδα παρακολούθησης του όλου συστήματος ανίχνευσης των δασικών πυρκαγιών κρίνεται απαραίτητη η συμμετοχή ενός, τουλάχιστον, υπεύθυνου για την συνεχή λειτουργία του δικτύου επικοινωνίας.

### **3.6. Τεχνικοοικονομικά Στοιχεία**

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια εκτίμηση του κόστους δημιουργίας ενός αξιόπιστου συστήματος ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών με την ίδρυση πύργων παρατήρησης, μη επανδρωμένων αλλά εφοδιασμένων με ειδικές κάμερες και την δημιουργία ενός δικτύου επικοινωνίας μεταξύ των πύργων παρατήρησης και του κέντρου ελέγχου.

Στο Σχήμα 3.16 παρουσιάζεται η δομή του συστήματος FireHawk:



Σχήμα 3.16. Η δομή του συστήματος FireHawk.

Το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του ολοκληρωμένου συστήματος (χωρίς το κόστος κατασκευής των πύργων ελέγχου) FireHawk ανέρχεται στο ποσό των 85.000 € ανά μονάδα εάν γίνει προμήθεια μέχρι 3 μονάδων (που μπορούν να καλύπτουν 24 κάμερες) δηλαδή συνολικό κόστος 255.000 € ή στην περίπτωση παραγγελίας 5 μονάδων (που μπορούν να καλύπτουν 40 κάμερες) το κόστος μειώνεται σε 75.000€ ανά μονάδα ή συνολικό κόστος 375.000 €.

Το ποσό αυτό ίσως φαίνεται μεγάλο αλλά αν αναλογιστεί κανείς τις δυνατότητες του συστήματος και τα οφέλη που θα υπάρξουν από, την σωστή, λειτουργία του πιστεύουμε πως δεν πρόκειται για υψηλό κόστος.

Στην περίπτωση που αποφασιστεί η χρησιμοποίηση εναέριας τεχνικής προτείνεται η χρησιμοποίηση του συστήματος FireMapper το οποίο ως καθαρή αξία κτήσης του οργάνου είναι αρκετά φθηνό, περίπου 350€, αλλά στο συνολικό κόστος λειτουργίας και ενσωμάτωσής του στο σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών θα πρέπει να συνυπολογιστεί το κόστος

πραγματοποίησης της πτήσης, κάτι το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από τα διαθέσιμα μέσα.

Εξαρτάται δηλαδή από το εάν ο φορέας διαχείρισης του συστήματος θα υποχρεωθεί να αγοράσει ή να μισθώσει αεροπλάνα για την πραγματοποίηση των εναέριων περιπολιών οπότε και το κόστος συντήρησης ενός τέτοιου συστήματος αυξάνεται σημαντικά ή εάν διαθέτει ήδη στην κατοχή του αεροπλάνα ή ελικόπτερα οπότε τότε η ανίχνευση με εναέριες τεχνικές φαντάζει αρκετά καλή και από οικονομικά κριτήρια.

## ***Κεφάλαιο 4- Χαρτογράφηση Καμένων Εκτάσεων***

Στα προηγούμενα κεφάλαια έχουν παρουσιαστεί και αναλυθεί οι διάφορες τεχνικές προετοιμασίας και ανίχνευσης των δασικών πυρκαγιών. Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τον τρόπο με τον οποίο είναι δυνατή η αποτίμηση της καταστροφής που προήλθε από μια δασική πυρκαγιά, η χαρτογράφηση της καμένης έκτασης και συνεπώς την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του όλου συστήματος πρόβλεψης της διάδοσης αλλά και των τεχνικών κατάσβεσης.

### **4.1. Εισαγωγή**

Ο πρωταρχικός σκοπός ενός συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών είναι η πρόληψη και η άμεση και επιτυχής αντιμετώπιση του φαινομένου. Για τον σκοπό αυτό έχει αναπτυχθεί πληθώρα τεχνικών και συστημάτων τόσο αναφορικά με την προετοιμασία όσο και για την άμεση ανίχνευση των δασικών πυρκαγιών. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

Στο Κεφάλαιο που αφορά την προετοιμασία και την συλλογή δεδομένων για την δημιουργία του συστήματος διαχείρισης παρατηρήθηκε πως μια σημαντική παράμετρος είναι η γνώση του ιστορικού της περιοχής μελέτης (τοπικό επίπεδο) ή της χώρας (εθνικό επίπεδο). Αυτό σημαίνει πως μετά την εκδήλωση μια δασικής πυρκαγιάς το σύστημα πρόβλεψης πρέπει να ενημερώνεται ώστε

να ανταποκρίνεται στις καινούργιες συνθήκες και στα δεδομένα που προέκυψαν μετά την εκδηλωθείσα φυσική καταστροφή.

Για να γίνει αυτό με σωστό και αποτελεσματικό τρόπο πρέπει να γίνει χαρτογράφηση της καμένης έκτασης και να γίνει εξαγωγή όσο το δυνατόν περισσότερων στοιχείων που θα χρησιμεύσουν στην ενημέρωση του συστήματος πρόβλεψης της διάδοσης των δασικών πυρκαγιών.

Η χαρτογράφηση της καμένης έκτασης επιβάλλεται να γίνει και για έναν ακόμη λόγο: Η εκδήλωση μιας πυρκαγιάς μπορεί να οφείλεται σε φυσικά αίτια αλλά αρκετά συχνά γίνεται εσκεμμένα είτε για την καλλιέργεια της καμένης έκτασης είτε για την δημιουργία οικισμών στην περιοχή. Η ακριβής καταγραφή της επιφάνειας που καταλαμβάνει επομένως η καμένη έκταση συνδράμει στην απομόνωση της καθώς επίσης και στην επιλογή των μεθόδων αναδάσωσης που μπορούν να εφαρμοστούν.

Περισσότερο ειδικές πληροφορίες για την καμένη έκταση (επίπεδα χλωροφύλλης, μορφή) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να γίνει επαναπροσδιορισμός των τεχνικών ανίχνευσης (σε πόσο χρόνο έγινε αντιληπτή η πυρκαγιά;) αλλά και να γίνει εκτίμηση των μεθόδων κατάσβεσης που έχουν προταθεί.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται παρουσίαση των τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί για την χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων.

## **4.2. Τεχνικές Χαρτογράφησης Καμένων Εκτάσεων**

Η αποτύπωση της καμένης έκτασης μπορεί να γίνει τόσο με παραδοσιακές τεχνικές (χρήση ταχυμέτρου) όσο και με σύγχρονες τεχνικές αποτυπώσεων (αεροφωτογραφίες, τηλεπισκόπηση). Οι παραδοσιακές τεχνικές ενώ εμφανίζουν το πλεονέκτημα της απλότητας και εύκολης εφαρμογής λόγω της ύπαρξης πληθώρας ειδικευμένου προσωπικού έχουν το μειονέκτημα του μεγάλου χρόνου αποπεράτωσης της εργασίας, της αδυναμίας εφαρμογής τους σε εργασίες μεγάλης κλίμακας και του, σε τελική ανάλυση, μεγάλου κόστους.

Η επιλογή της τεχνικής που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να γίνει μεταξύ των εναέριων και των δορυφορικών τεχνικών οι οποίες και αναλύονται στην συνέχεια του κεφαλαίου. Όπως και στην περίπτωση των τεχνικών ανίχνευσης έτσι και στις τεχνικές χαρτογράφησης των καμένων εκτάσεων οι αρχές λειτουργίας μεταξύ των εναέριων και των δορυφορικών τεχνικών είναι, σε γενικές γραμμές, οι ίδιες. Για τον λόγο αυτό η παρουσίασή τους δεν γίνεται με βάση το εάν

χρησιμοποιούνται από αεροπλάνο ή από δορυφόρο αλλά ανάλογα με την αρχή λειτουργίας κάθε τεχνικής.

#### **4.2.1. Αεροφωτογραφίες στο Οπτικό**

Η λήψη αεροφωτογραφιών μετά την εκδήλωση μιας δασικής πυρκαγιάς δίνει την δυνατότητα στους αναλυτές να έχουν μια σαφή και εποπτική εικόνα της καμένης έκτασης. Στη συνέχεια οι εικόνες που λαμβάνονται πρέπει να συνδυαστούν με κάποιον χάρτη ώστε να προσδιοριστεί με ακρίβεια η έκταση της καμένης έκτασης.

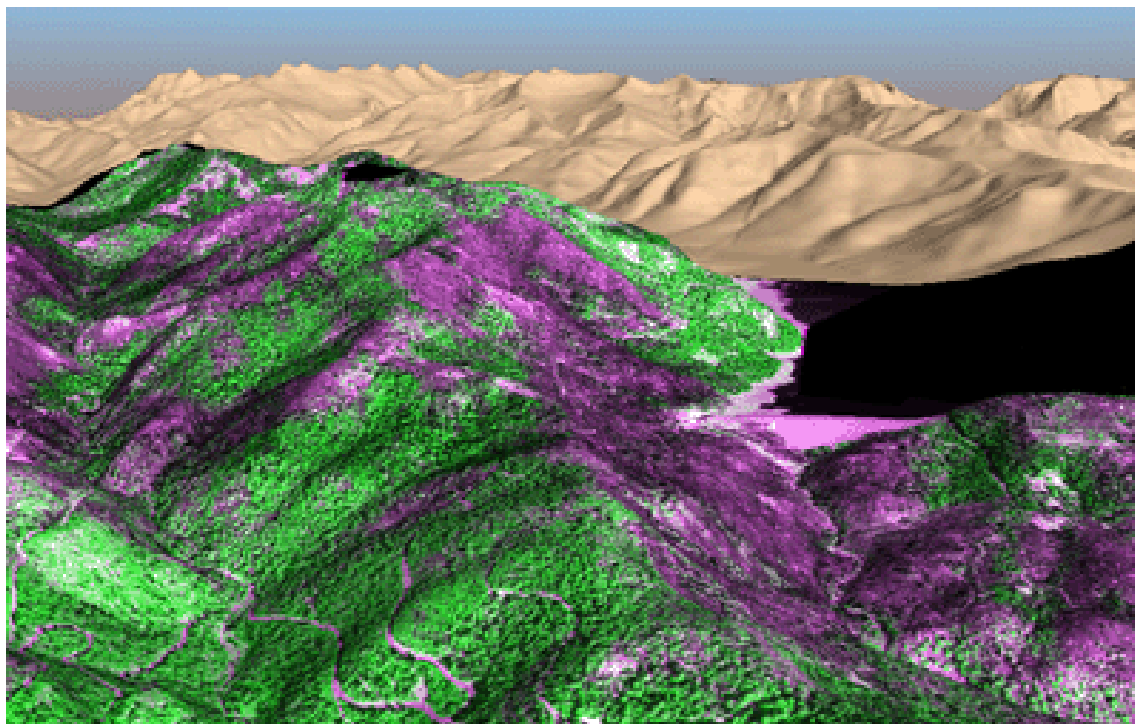
Ο συνδυασμός των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ) και του συστήματος GPS είναι ιδανικός σε εφαρμογές επεξεργασίας εικόνων περιοχών που έχουν πληγεί από κάποια φυσική καταστροφή. Με την χρησιμοποίηση των αεροφωτογραφιών μπορεί να δημιουργηθεί ένας χάρτης του ιστορικού της περιοχής, να εκτιμηθεί το μέγεθος της καμένης έκτασης, να καθορισθεί το κόστος της καταστροφής, να εκτιμηθούν οι προσπάθειες κατάσβεσης κ.ά.

Προκειμένου να δημιουργηθεί ο χάρτης αυτός πρέπει οι συντεταγμένες των εικόνων να μετατραπούν σε συντεταγμένες συμβατές με το σύστημα GPS και έτσι υπάρχει ένα σημείο αναφοράς. Αυτές οι εικόνες στην συνέχεια ενώνονται (δημιουργία μωσαϊκού) σε ένα πρόγραμμα ΓΣΠ και με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένας ηλεκτρονικός χάρτης ακριβείας της καμένης έκτασης αλλά και της ευρύτερης περιοχής.

#### **4.2.2. Αεροφωτογραφίες στο υπέρυθρο**

Τα περισσότερα εναέρια συστήματα που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των πυρκαγιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και μετά την εκδήλωση του φαινομένου για την εκτίμηση της κατάστασης.

Για παράδειγμα το σύστημα FireMapper που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον σκοπό αυτό. Έτσι, για την περίπτωση της πυρκαγιάς στο Εθνικό Πάρκο του Eldorado, στις 29 Αυγούστου 2001, που παρουσιάστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο (Σχήματα 3.9 – 3.12).



*Σχήμα 4.1. Μωσαϊκό αεροφωτογραφιών μετά την κατάσβεση της πυρκαγιάς στις 29/09/2001.*

Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο μωσαϊκό, μετά την κατάσβεση της πυρκαγιάς, ψηφιακών αεροφωτογραφιών με το ανακλώμενο κόκκινο φως να εμφανίζεται με το βιολετί (magenta) χρώμα, και το ανακλώμενο εγγύς υπέρυθρο με πράσινο χρώμα.

Στο Σχήμα αυτό παρουσιάζεται η στάχτη ως επακόλουθο της πυρκαγιάς (με την χαμηλή ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο-βιολετί χρώμα) καθώς επίσης και οι περιοχές του δάσους που δεν επηρεάστηκαν από την πυρκαγιά (έντονη ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο-πράσινο χρώμα). Δεδομένα σαν αυτή την εικόνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις προσπάθειες αναδάσωσης των καμένων εκτάσεων.

#### **4.2.3. Ταξινόμηση Καμένων Εκτάσεων με δεδομένα Landsat TM**

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί το παράδειγμα εφαρμογής δεδομένων Τηλεπισκόπησης για την ταξινόμηση των εκτάσεων μετά από την εκδήλωση δασικής πυρκαγιάς.

Στο Εθνικό Πάρκο Mae Wong της Ταϊλάνδης, εκδηλώνονται πυρκαγιές σχεδόν κάθε χρόνο κατά την διάρκεια των ξηρών περιόδων. Την περίοδο από τις 8 Ιανουαρίου μέχρι τις 16 Απριλίου του

1999 εκτιμάται ότι κάηκαν περίπου 3000 km<sup>2</sup> δάσικών εκτάσεων που αντιστοιχεί στο 0,57% της συνολικής έκτασης της χώρας.

Οι αρμόδιες υπηρεσίες της χώρας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν δεδομένα Τηλεπισκόπησης και γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (ΓΣΠ) με σκοπό να παρακολουθήσουν την συμπεριφορά των δασικών εκτάσεων μετά τις πυρκαγιές.

Συγκεκριμένα σκοπός της έρευνας ήταν:

- η ανίχνευση των καμένων εκτάσεων χρησιμοποιώντας δεδομένα του δορυφόρου Landsat,
- η ανίχνευση της ικανότητας των δασικών εκτάσεων να επουλώνουν τις πληγές τους μετά τις πυρκαγιές και να ξαναδημιουργούνται,
- να ερευνήσουν τη σχέση μεταξύ της ικανότητας αυτής των δασικών εκτάσεων και του τοπογραφικού αναγλύφου: υψόμετρο, κλίση προσανατολισμός με την χρησιμοποίηση και εφαρμογή τεχνικών ΓΣΠ,
- να ερευνήσουν ποια είδη βλάστησης είναι περισσότερο δεκτικά στην επαναδημιουργία τους μέσα από τις στάχτες,
- η στατιστική συσχέτιση μεταξύ της επαναδημιουργίας του δάσους και των τοπογραφικών παραμέτρων με τη χρησιμοποίηση δεδομένων που ελήφθασαν από δειγματοληψία επί τόπου.

Για τον σκοπό της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν δύο εικόνες Landsat TM με ημερομηνίες λήψης η μία στις 20/3/1999 δηλαδή αμέσως μετά την πυρκαγιά και η δεύτερη στις 3/2/2000 περίπου ένα χρόνο μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν τοπογραφικοί χάρτες κλίμακας 1:50.000 της αρμόδιας, κρατικής υπηρεσίας χαρτογραφήσεων ως το απαιτούμενο χαρτογραφικό υπόβαθρο για τη δημιουργία ενός Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (ΨΜΥ).

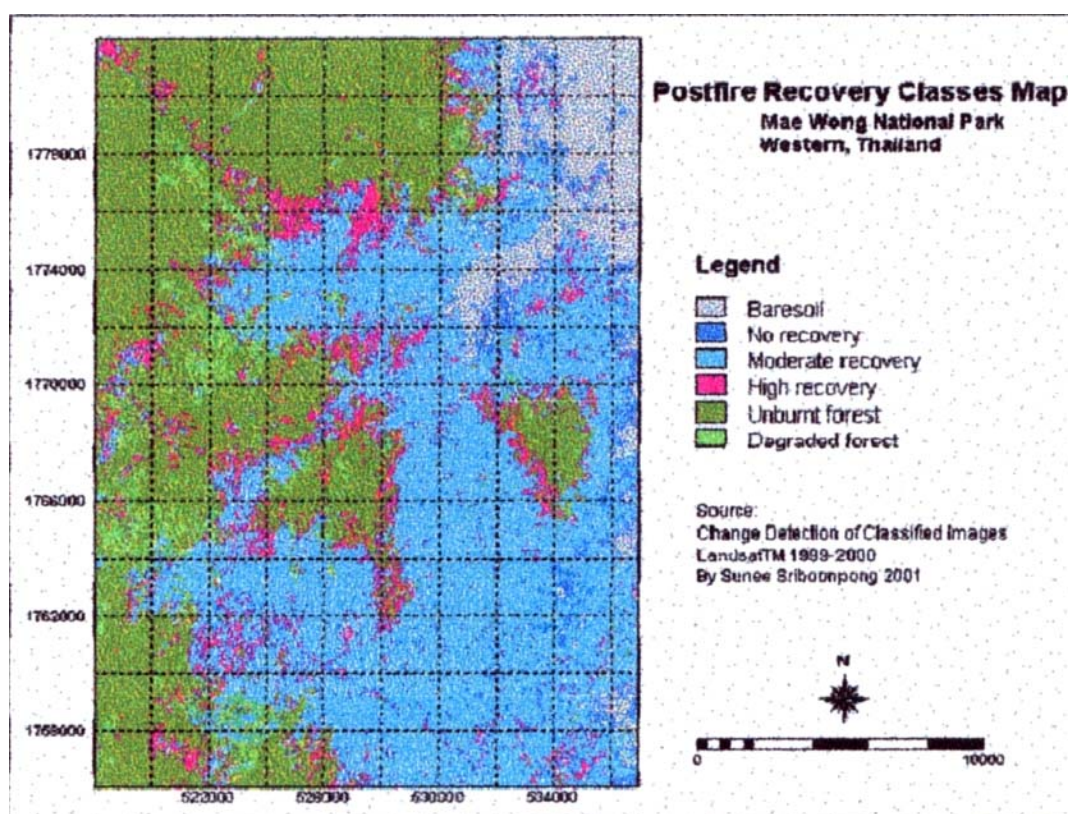
Αρχικά, οι εικόνες LandSat χρησιμοποιήθηκαν για οπτική ερμηνεία και μια πρώτη, χονδροειδής ταξινόμηση έτσι ώστε να δημιουργηθούν οι αρχικοί χάρτες της καμένης έκτασης του 1999 και των επιπτώσεων της αναδάσωσης το 2000. Στη συνέχεια, επιλέχθηκαν θέσεις για επί τόπου δειγματοληψία, με βάση την αρχική ταξινόμηση, με σκοπό να επιβεβαιωθεί και διορθωθεί η πρωταρχική ταξινόμηση.

Μετά τη συλλογή των επί τόπου δεδομένων πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των εικόνων που περιελάμβανε ταξινόμηση των εικόνων και προσδιορισμό των αλλαγών στην τιμή φωτεινότητας δηλαδή στο είδος της εδαφικής κάλυψης. Η σύγκριση μεταξύ των φασματικών ταυτοτήτων των



διαφορετικών τύπων εδαφικής κάλυψης, όπως καμένη έκταση, υγιής δασική έκταση και επαναδημιουργημένη δασική έκταση μεταξύ των δύο εικόνων LandSat, πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε να διαπιστωθεί εάν είναι δυνατός ο εντοπισμός τους με αυτά τα τηλεπισκοπικά δεδομένα.

Μετά την ανεξάρτητη ταξινόμηση των δύο εικόνων σε τρεις θεματικές ομάδες: καμένη έκταση, δασική έκταση και χερσαίο (χωρίς καμμία φυτική κάλυψη) έδαφος, οι δύο εικόνες χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό των διαφορών μεταξύ των χρονικών διαστημάτων λήψης τους. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ο χάρτης εναναδημιουργίας δασικών εκτάσεων, όπως αυτός προέκυψε από τον χάρτη εντοπισμού διαφορών από τις δύο εικόνες του 1999 και του 2000.



Σχήμα 4.2. Χάρτης επαναδημιουργίας της βλάστησης.

#### 4.2.4. Χαρακτηρισμός Καμένων Εκτάσεων με δεδομένα Spot VGT

Εκτός από την ταξινόμηση των καμένων εκτάσεων ιδιαίτερα χρήσιμη για τις αρμόδιες υπηρεσίες (π.χ. Δασική υπηρεσία, Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας κτλ) είναι ο χαρακτηρισμός των εκτάσεων αυτών ανάλογα με το μέγεθος που έχουν επηρεαστεί από μια δασική πυρκαγιά.

Ο δορυφόρος SPOT με τον δέκτη VGT (ακρωνύμιο της αγγλικής λέξης Vegetation – βλάστηση) τέθηκε σε τροχιά το 1998 έχει τις ακόλουθες φασματικές ζώνες: 0,43-0,47  $\mu\text{m}$  (ιώδες), 0,61-0,68  $\mu\text{m}$  (ερυθρό), 0,78-0,89  $\mu\text{m}$  (εγγύς υπέρυθρο), and 1.58-1.75  $\mu\text{m}$  (SWIR).

Η πυρκαγιά που εκδηλώθηκε στα κωνοφόρα δάση στην επαρχία Alberta, του Καναδά τον Μαΐο του 1998 χρησιμοποιήθηκε ως πεδίο έρευνας για τη δυνατότητα των εικόνων του δέκτη VGT να ανιχνεύσουν δασικές πυρκαγιές και να ταξινομήσουν τις καμένες εκτάσεις.

Στις 3 Μαΐου του 1998, εκδηλώθηκε πυρκαγιά, στην περιοχή μελέτης, η οποία εξαπλώθηκε με ταχύτατους ρυθμούς εξαιτίας των δυσμενών καιρικών συνθηκών που επικρατούσαν στην περιοχή. Οι αρμόδιοι εκτίμησαν πως η πυρκαγιά κατέστρεψε περίπου 1500  $\text{km}^2$  δασικής έκτασης κυρίως κατά την διάρκεια του διημέρου 4 – 5 Μαΐου 1998.

Για την έρευνα χρησιμοποιήθηκαν εικόνες SPOT VGT σε επιλεγμένες τροχιές που κάλυπταν τον κεντρικό Καναδά μεταξύ 30 Απριλίου και 31 Ιουνίου καθώς επίσης και όλες τις εικόνες, όλων των τροχιών μεταξύ 1 Ιουλίου και 31 Αυγούστου 1998.

Στις εικόνες πραγματοποιήθηκε γεωμετρική διόρθωση και τελικά επιλέχθηκαν:

- μία εικόνα πριν την εκδήλωση της πυρκαγιάς (2 Μαΐου),
- δύο εικόνες κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς (5 και 8 Μαΐου) και,
- 10 εικόνες μετά την κατάσβεση της πυρκαγιάς (10 Μαΐου με 30 Αυγούστου) οι οποίες παρείχαν την απεικόνιση της περιοχής μελέτης χωρίς νεφοκάλυψη.

Προκειμένου να συγκριθεί η ικανότητα του AVHRR με αυτήν του SPOT VGT για την ανίχνευση των πυρκαγιών έγινε γεωμετρική διόρθωση και σε μια εικόνα του NOAA-14/AVHRR με ημερομηνία λήψης την 5 Μαΐου 1998. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν τρεις εικόνες του LandSat TM της περιοχής μελέτης με ημερομηνίες λήψης: 30 Απριλίου, 10 Ιουνίου και 30 Αυγούστου του 1998.

Ψευδοχρωματικές εικόνες του TM χρησιμοποιήθηκαν για την ερμηνεία των, πριν την πυρκαγιά, ειδών βλάστησης και τον καθορισμό των περιοχών ελέγχου των δυνατοτήτων των εικόνων VGT.

Στο Σχήμα 4.3α παρουσιάζεται μια ψευδοχρωματική εικόνα TM (SWIR, NIR, Κόκκινο = RGB) με ημερομηνία λήψης την 10<sup>η</sup> Ιουνίου, στην οποία με έντονο κόκκινο χρώμα εμφανίζεται η καμένη έκταση και με τις αποχρώσεις του πράσινου οι υφιστάμενες δασικές εκτάσεις.

Στο Σχήμα 4.3β παρουσιάζεται μια εικόνα VGT της ίδιας ημερομηνίας και με ανάλογες φασματικές ζώνες απεικόνισης. Γίνεται αντιληπτό ότι στην εικόνα VGT είναι πολύ καλύτερος ο διαχωρισμός μεταξύ των περιοχών που εμφανίζουν διαφορετικά φασματικά χαρακτηριστικά. Είναι επομένως πιο εύκολο για τον αναλυτή των εικόνων αυτών να θέσει τις διαχωριστικές γραμμές μεταξύ των ζωνών που εμφανίζουν διαφορετικές φασματικές ιδιότητες.

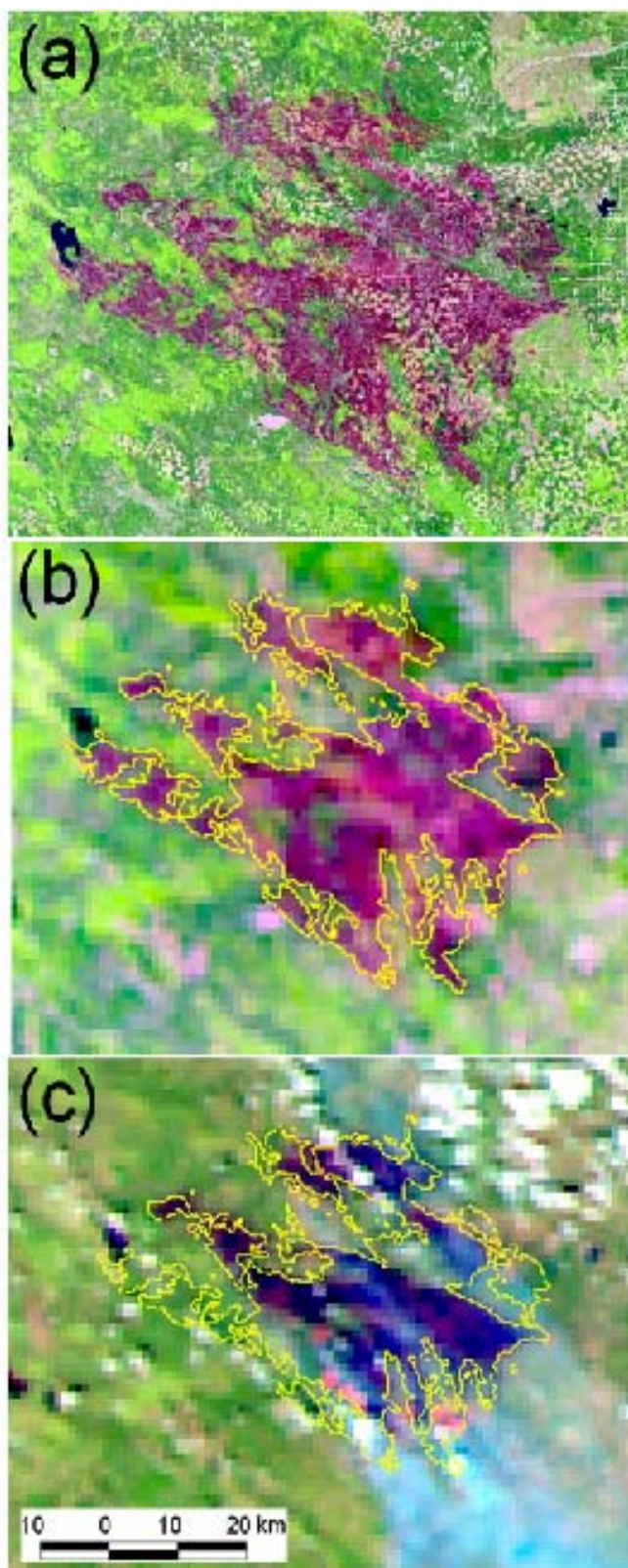
Στο Σχήμα 4.3γ οι ενεργές πυρκαγιές εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα λόγω των θερμικών εκπομπών που προκαλούν στο κανάλι SWIR. Οι περιοχές που έχουν ήδη καεί παρουσιάζουν μειωμένη ανακλαστικότητα σε όλα τα κανάλια και έτσι εμφανίζονται με μαύρο χρώμα. Η εξωτερική περίμετρος των καμένων εκτάσεων όπως προέκυψαν από την επεξεργασία των εικόνων LandSat έχουν υπερτεθεί τόσο στο Σχήμα 4.3β όσο και στο Σχήμα 4.3γ.

Προκειμένου να διερευνηθεί η φασματική απόκριση του δέκτη VGT στις κατεστραμένες, από την πυρκαγιά, εκτάσεις, οι ερευνητές δημιούργησαν 80 πολύγωνα που περιείχαν την καμένη έκταση και άλλα 80 πολύγωνα τα οποία περιείχαν τις δασικές εκτάσεις που έμειναν ανεπηρέαστες από την πυρκαγιά, και οι οποίες βρίσκονταν πλησίον των καμένων εκτάσεων.

Οι εικόνες VGT και TM με προγενέστερη της πυρκαγιάς ημερομηνία λήψης βοήθησαν στο να επιλεχθούν πολύγωνα ανεπηρέαστης δασικής έκτασης που περιλαμβάνουν παρόμοια είδη βλάστησης με αυτά που υπήρχαν πριν την εκδήλωση της πυρκαγιάς και τα οποία καταστράφηκαν από αυτήν.

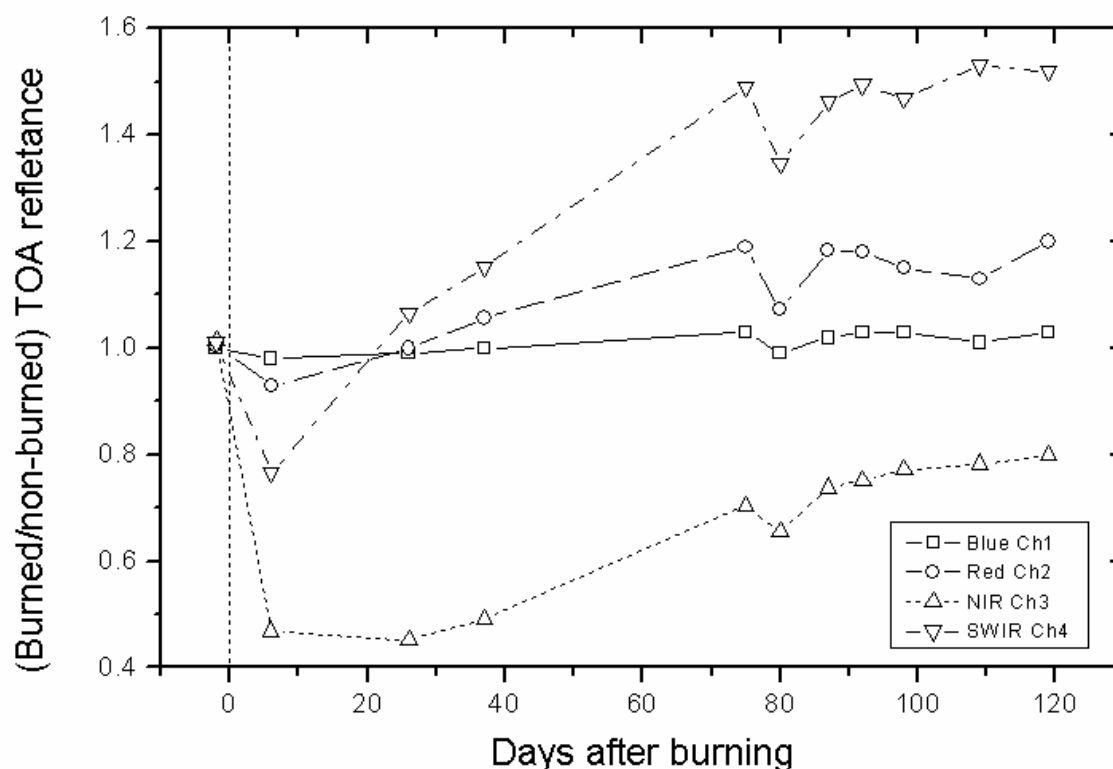
Σε κάθε εικόνα VGT εφαρμόστηκε μια “μάσκα” για την απομάκρυνση της νεφοκάλυψης από τα εικονοστοιχεία εκείνα που επηρεάζοταν από αυτήν. Στο Σχήμα 4.4. παρουσιάζεται το πηλίκο της ανακλαστικότητας που εμφανίζει η καμένη έκταση προς την ανακλαστικότητα που εμφανίζει η περιοχή η οποία δεν επηρεάστηκε από την πυρκαγιά.

Figure 1



**Σχήμα 4.3** Η πυρκαγιά στους λόφους της Virginia στις 10 Ιουνία 1998 όπως απεικονίστηκε από α) Landsat TM (5,4,3=RGB, (β) SPOT VGT (4,3,2=RGB) και (γ) ενεργές πυρκαγιές από τον δέκτη SPOT VGT.

Figure 2



**Σχήμα 4.4.** Ο λόγος της ανακλαστικότητας των καμένων με των ανεπηρέαστων δασικών εκτάσεων.

Από το Σχήμα 4.4 παρατηρείται ότι το μπλε κανάλι (ch1) είναι αρκετά ευαίσθητο στα αέρια της ατμόσφαιρας με αποτέλεσμα να παρέχει λίγες χρήσιμες πληροφορίες για τις καμένες εκτάσεις. Η ανακλαστικότητα στο κόκκινο κανάλι (ch2) καταρχήν μειώνεται σε σχέση με τις ανεπηρέαστες δασικές εκτάσεις εξ' αιτίας της ισχυρής απορρόφησης από την στάχτη. Στην συνέχεια αυξάνεται σταδιακά καθώς η στάχτη μετακινείται και έτσι υπάρχει μικρή απορρόφηση χλωροφύλλης στο μήκος κύματος του κόκκινου σε σχέση πάντα με την ανεπηρέαστη, από την πυρκαγιά, δασική έκταση (Σχήμα 4.3γ).

Το κανάλι του εγγύς υπέρυθρου (NIR – ch3) εμφανίζει την μεγαλύτερη αρχική αλλαγή, με πτώση της ανακλαστικότητας σε λιγότερο από 50% σε σχέση με αυτήν της ανεπηρέαστης βλάστησης. Η ανακλαστικότητα στο NIR αυξάνει ταχύτητα μετά το πέρας της καύσης εξ' αιτίας της βλάστησης, στην καμένη έκταση, νέων φυτών.

Η ερμηνεία της απόκρισης στο κανάλι SWIR (ch4) είναι πιο δύσκολη από ότι στα προηγούμενα κανάλια καθώς αυτή συνεχώς αλλάζει διεύθυνση. Αμέσως μετά την πυρκαγιά, το SWIR μειώνεται εξ' αιτίας της ισχυρής απορρόφησης από την στάχτη. Καθώς το σήμα από τα παράγωγα της αποσύνθεσης γίνεται λιγότερο ισχυρό λόγω της επαναδημιουργίας βλάστησης και των

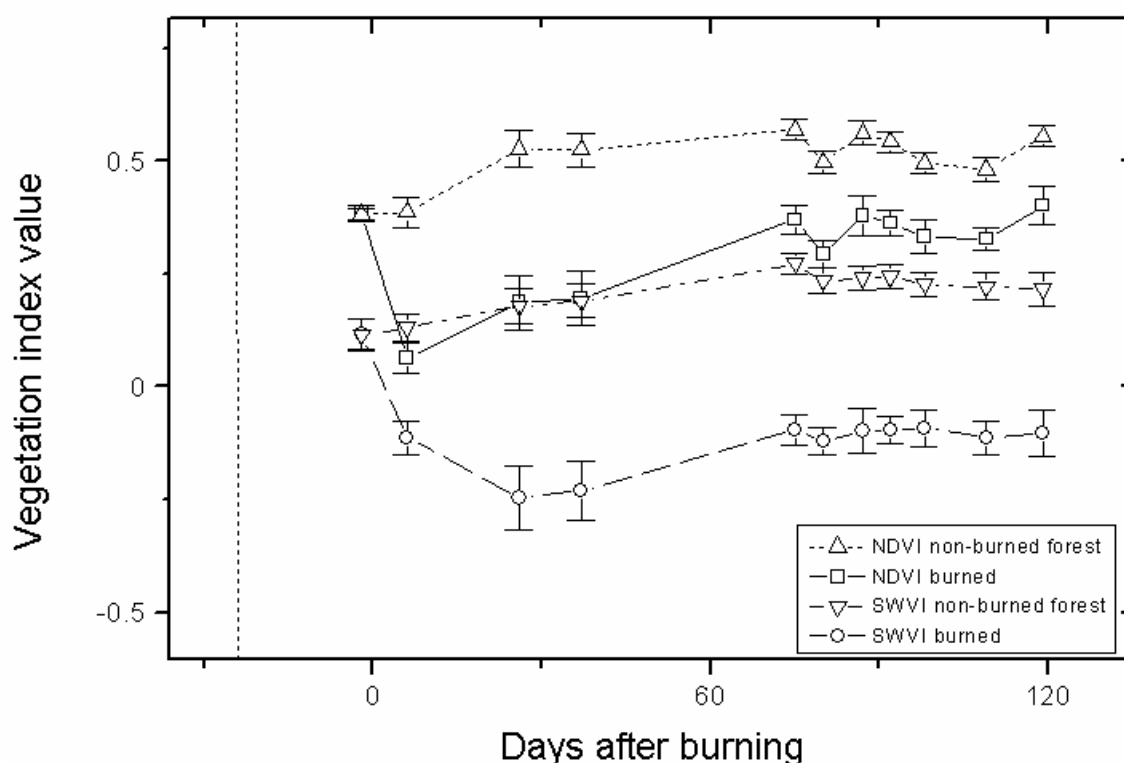
βροχοπτώσεων το SWIR αυξάνεται παρουσιάζοντας σε τελική ανάλυση την μεγαλύτερη διαφορά σε σχέση με τα υπόλοιπα κανάλια του VGT.

Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου η ανακλαστικότητα στο SWIR των καμένων δασικών εκτάσεων γίνεται μεγαλύτερη καθώς υπάρχει μικρό ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας στην βλάστηση η οποία απορροφά ισχυρά την ακτινοβολία SWIR στις γειτονικές, πυκνές ανεπηρέαστες δασικές εκτάσεις.

Ο δείκτης NDVI όπως υπολογίστηκε από την ανακλαστικότητες ( $ch3 - ch2 / ch3 + ch2$ ) παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5 τόσο για τις καμένες όσο και για τις ανεπηρέαστες δασικές εκτάσεις.

Όπως και στην περίπτωση του εγγύς υπέρυθρου (NIR), ο δείκτης NDVI παρέχει τον μεγαλύτερο δυνατό διαχωρισμό αμέσως μετά την πυρκαγιά και σταδιακά, με το πέρασμα του χρόνου, συνεχώς μειώνεται.

Figure 3



Σχήμα 4.5. Οι δείκτες NDVI και SWVI σε σχέση με τον χρόνο μετά την πυρκαγιά.

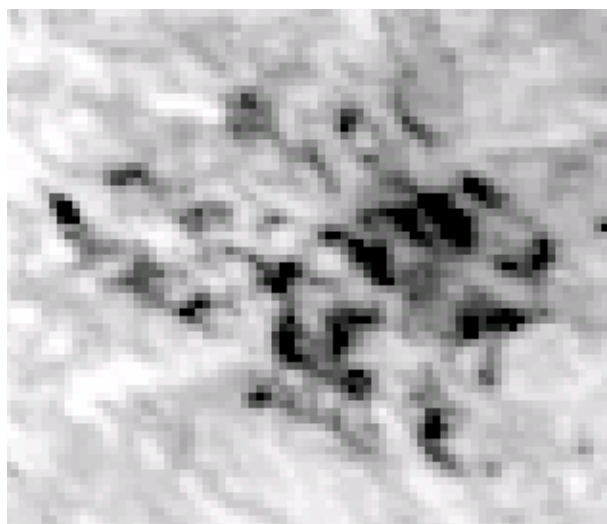
Εκμεταλλευόμενοι την μεγάλη απόκριση του SWIR στην καύση, μπορεί να δημιουργηθεί ένας δείκτης SWVI (Short-Wave Vegetation Index) χρησιμοποιώντας τον λόγο των καναλιών ( $ch3 - ch4 /$



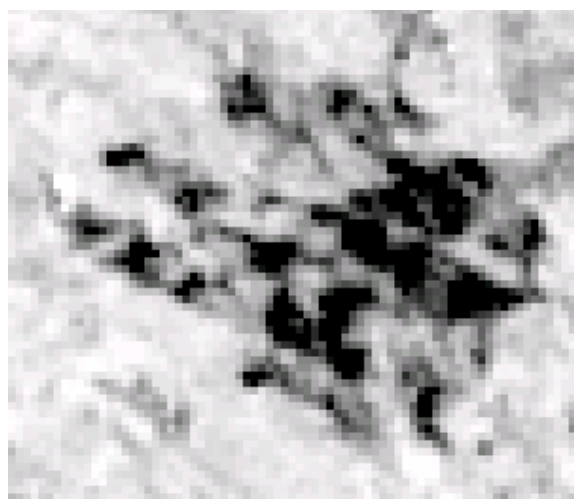
ch3+ch4). Ο δείκτης αυτός είναι ανάλογος με τον δείκτη VI3 του AVHRR και σε δείκτες οι οποίοι έχουν κατά καιρούς προταθεί για τα δεδομένα LandSat TM.

Από το Σχήμα 4.5 παρατηρείται ότι η σχετική διαφορά του SWVI μεταξύ των καμένων και των ανεπηρέαστων δασικών εκτάσεων είναι μεγαλύτερη από ότι αυτή του δείκτη NDVI για την ημέρα αμέσως μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς.

Αυτό καταδεικνύεται επίσης στο Σχήμα 4.6 όπου παρουσιάζονται οι εικόνες του NDVI και του SWVI της πυρκαγιάς της περιοχής Swan Hills όπως αυτοί υπολογίστηκαν από τα δεδομένα της εικόνας VGT της 3 Αυγούστου 1998. Η μεγαλύτερη διαφορά αιτιολογείται από την ίδια, αλλά ισχυρότερη απόκριση του SWIR σε σχέση με το κανάλι του κόκκινου μετά την πυρκαγιά (Σχήμα 4.4).



Σχήμα 4.6. Εικόνες των δεικτών NDVI (α)



και SWVI (β)

Αντικαθιστώντας το κόκκινο κανάλι με το SWIR, ο δείκτης SWVI έχει το πλεονέκτημα του να είναι λιγότερο ευαίσθητος στην περιεκτικότητα των δεδομένων σε καπνό καθώς το SWIR δεν επηρεάζεται, σχετικά, από την ύπαρξη των σωματιδίων της ατμόσφαιρας. Σε γενικές γραμμές τα μήκη κύματος NIR/MIR είναι τα πλέον αποτελεσματικά για τον διαχωρισμό μεγάλου πλήθους τύπων βλάστησης.

#### 4.2.5. Χαρτογράφηση Καμένων Εκτάσεων με δεδομένα MODIS VCC

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί η δυνατότητα του δέκτη MODIS, που βρίσκεται στον δορυφόρο Terra να απεικονίζει μεταβολές στο είδος και στην ποσότητα της βλάστησης σε διάφορες περιοχές του πλανήτη σε μηνιαία βάση.

Για τον σκοπό αυτό πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος VCC (Vegetative Cover Conversion) ο οποίος χρησιμοποιεί τις φασματικές ζώνες του δέκτη MODIS, με γεωμετρική διαχωριστική ικανότητα 250m X 250m. Οι φασματικές αυτές ζώνες ανιχνεύουν την ακτινοβολία στο κόκκινο και στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Η ανίχνευση με τον αλγόριθμο VCC βασίζεται σε δύο χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας στο κόκκινο και στο εγγύς υπέρυθρο τμήμα του φάσματος που η γη αντανακλά στους ανιχνευτές του MODIS: την φωτεινότητα και την 'ένταση του πρασίνου' (greenness).

Η φωτεινότητα της ακτινοβολίας που ανακλάται από ένα γυμνό έδαφος είναι υψηλή καθώς δεν υπάρχει τίποτα που να μπορεί να την απορροφήσει. Αντίθετα, ένα πυκνό δάσος απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της 'κόκκινης' ακτινοβολίας και έτσι η φωτεινότητά του είναι χαμηλή. Η ακτινοβολία που ένα πυκνό δάσος δεν μπορεί να απορροφήσει είναι αυτή του υπέρυθρου με συνέπεια οι περιοχές με πυκνή βλάστηση να ανακλούν το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας στο υπέρυθρο. Ο συνδυασμός της χαμηλής ανακλαστικότητας στο κόκκινο και της υψηλής στο υπέρυθρο ονομάζεται 'ένταση στο πράσινο' (greenness).

Ο αλγόριθμος VCC έχει την δυνατότητα ταξινόμησης πέντε (5) ειδών εδαφικής κάλυψης, βάση των διαφορετικών συνδυασμών της φωτεινότητας και της έντασης του πρασίνου:

1. δασική έκταση
2. μη δασική έκταση
3. γυμνό έδαφος
4. πλημμύρα
5. καμένη έκταση

Μια δασική έκταση παρουσιάζει χαμηλή φωτεινότητα και υψηλή ένταση του πρασίνου.

Όταν μια δασική περιοχή καθαριστεί για αγροτική καλλιέργεια ή αστική ανάπτυξη παρουσιάζει την υψηλή φωτεινότητα και χαμηλή ένταση του πρασίνου, όπως και το γυμνό έδαφος.

Το ερώτημα που γεννάται είναι ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατή η εφαρμογή του αλγορίθμου VCC για την ανίχνευση προσφάτων καμένων δασικών εκτάσεων, όπως στην περιοχή των συνόρων Idaho/Montana, στις Η.Π.Α, που παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.7-4.9.

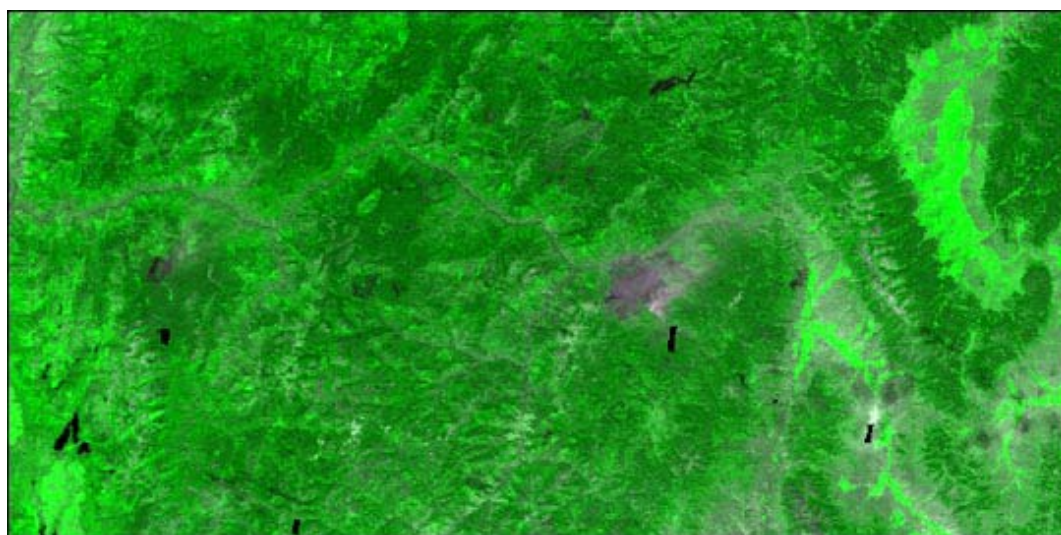
Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα είναι σχετικά απλή καθώς ο εντοπισμός, από το MODIS, ενός σημείου στο έδαφος το οποίο από χαμηλή φωτεινότητα / υψηλή ένταση του πρασίνου μετατρέπεται (στο διάστημα του ενός μηνός που αναφέρθηκε παραπάνω) σε σημείο χαμηλής φωτεινότητας /



χαμηλής έντασης του πρασίνου μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το σημείο αυτό είναι καμένη δασική έκταση που αντικατέστησε την υγιή βλάστηση.

Με τέτοιου είδους απεικονίσεις, ο αλγόριθμος VCC, μπορεί να αναγνωρίσει αρκετά συχνά, καμένες εκτάσεις που έρχονται σε αντίθεση με την εντονότερο πράσινο της υγιούς βλάστησης.

Στο Σχήμα 4.7α παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης πριν την εκδήλωση των πυρκαγιών (Ιούλιος 2000), στο Σχήμα 4.7β η ίδια περιοχή μετά την εκδήλωση των πυρκαγιών (Σεπτέμβριος 2000). Στο Σχήμα 4.7γ παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της εφαρμογής του αλγόριθμου VCC.



July, 2000



September, 2000



Burned Area

Scale (km)  
0 25

*Σχήμα 4.7. Η περιοχή μελέτης (α) πριν τις πυρκαγιές, (β) μετά την εδήλωση των πυρκαγιών και (γ) η εφαρμογή του αλγορίθμου VCC.*

#### 4.2.6 Εντοπισμός Αλλαγών Χρήσης Γης μετά από Πυρκαγιές με δεδομένα SAR

Στην παράγραφο αυτή περιγράφεται η διαδικασία εκτίμησης της αλλαγής χρήσης της γης με τη χρησιμοποίηση δεδομένων των δορυφόρων ERS 1-2. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στην Ινδονησία, έχει έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο ενώ για την πραγματοποίηση της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν 9 εικόνες πριν την εκδήλωση της πυρκαγιάς, 2 κατά την διάρκειά της και 1 εικόνα μετά την κατάσβεση της πυρκαγιάς (πίνακας 4.1):

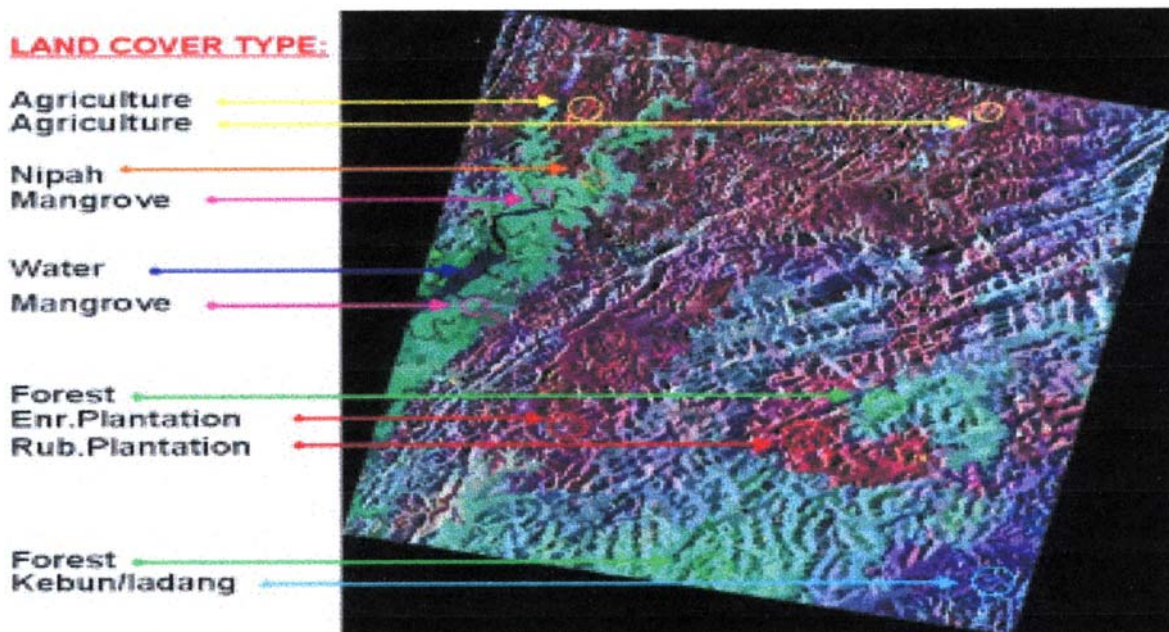
**Πίνακας 4.1.** Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την έρευνα.

A/A	Δορυφόρος	Ημερομηνία Λήψης	Παρατηρήσεις
1	ERS –1	22 Οκτωβρίου 1993	Πριν την πυρκαγιά
2	ERS –1	26 Νοεμβρίου 1993	Πριν την πυρκαγιά
3	ERS –1	10 Σεπτεμβρίου 1995	Πριν την πυρκαγιά
4	ERS –2	07 Απριλίου 1996	Πριν την πυρκαγιά
5	ERS –2	13 Μαΐου 1996	Πριν την πυρκαγιά
6	ERS –2	22 Ιουλίου 1996	Πριν την πυρκαγιά
7	ERS –2	30 Σεπτεμβρίου 1996	Πριν την πυρκαγιά
8	ERS –2	04 Νοεμβρίου 1996	Πριν την πυρκαγιά
9	ERS –2	17 Φεβρουαρίου 1997	Πριν την πυρκαγιά
10	ERS –2	02 Ιουνίου 1997	Κατά την διάρκεια
11	ERS –2	13 Απριλίου 1998	Κατά την διάρκεια
12	ERS –2	18 Μαΐου 1998	Μετά την κατάσβεση

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται η περιοχή μελέτης με τους κυριότερους τύπους εδαφικής κάλυψης.

Οι εικόνες 1 έως 9 έχουν όλες ημερομηνίες λήψης προγενέστερες της εκδήλωσης της πυρκαγιάς. Πολυφασματικές συνθέσεις (συνδυασμοί) των εικόνων αυτών δείχνουν ότι το ποσό της ακτινοβολίας που επανασκεδάζεται δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές επομένως μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχουν έντονες αλλαγές στην χρήση γης ή στην υγρασία του εδάφους.





Σχήμα 4.8 Οι κυριότεροι τύποι εδαφικής κάλυψης πριν την πυρκαγιά.

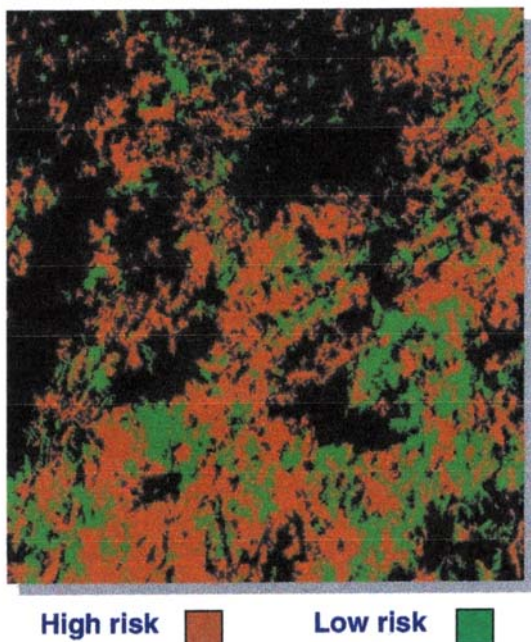
Το Σχήμα 11 (Απρίλιος 1998) έχει ληφθεί λίγο πριν το τέλος της περιόδου των πυρκαγιών και έτσι δείχνει την μεγαλύτερη καταστροφή στη βλάστηση με συνέπεια η σκέδαση του Radar να παρουσιάζει την μικρότερη τιμή. Η εικόνα 12 (Μάιος 1998) έχει ληφθεί μετά την έναρξη των βροχοπτώσεων και την κατάσβεση των πυρκαγιών. Σε αντίθεση με την προηγούμενη εικόνα, στην εικόνα 12 το έδαφος έχει ανακτήσει ποσοστό της υγρασίας του.

Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η εξής:

- διαχωρισμός τμημάτων σε όλα τα φάσματα
- εργασίες στο πεδίο (περιοχή 18kmx20km) που περιλαμβάνουν πτήσεις με ελικόπτερο, μετρήσεις με GPS (ακρίβειας 20-40m), εντοπισμός των δρόμων και των ποταμών
- Ταξινόμηση των εικόνων

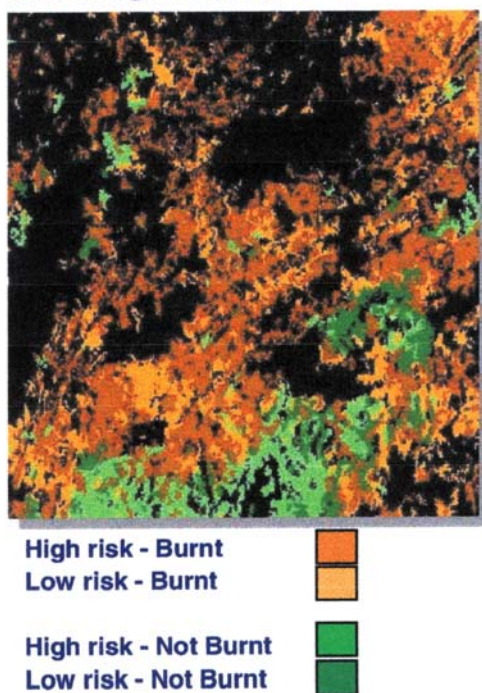
Ακολουθώντας διάφορα στάδια ελέγχου της ταξινόμησης δημιουργήθηκε ο χάρτης επικινδυνότητας των πυρκαγιών (Σχήμα 4.9) αλλά και ο χάρτης αποτίμησης της καταστροφής (Σχήμα 4.10).

**Forest fire risk 1995**



*Σχήμα 4.9. Ο χάρτης επικινδυνότητας της περιοχής μελέτης*

**Fire damage evaluation 1998**



*Σχήμα 4.10. Αποτίμηση της καμένης έκτασης*

### 4.3. Τεχνικοοικονομικά Στοιχεία

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε παρουσίαση των κυριότερων μεθόδων χαρτογράφησης και αποτίμησης της καταστροφής που προκαλεί μια φυσική καταστροφή όπως η πυρκαγιά. Η ύπαρξη πληθώρας τεχνικών και διαφορετικών δεκτών που μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις της έρευνας κάνουν τη δουλειά του αναλυτή πιο δύσκολη καθώς έχει να επιλέξει από σχεδόν ισάξιες (από άποψη πληροφοριών) πηγές.

Τα κριτήρια επιλογής επομένως θα πρέπει να βασίζονται, κατά κύριο λόγο, σε οικονομικά στοιχεία. Όπως έχει φανεί από την μέχρι τώρα ανάλυση για την πληρέστερη αποτίμηση των συνεπειών της πυρκαγιάς είναι απαραίτητη η ύπαρξη δεδομένων πριν την πυρκαγιά ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των φασματικών ταυτοτήτων πριν και μετά την εκδήλωση του φαινομένου.

Αυτά τα δεδομένα όμως, στα πλαίσια ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης πυρκαγιών, πρέπει ήδη να βρίσκονται στη διάθεση του αναλυτή από το στάδιο της εκτίμησης της επικινδυνότητας της πυρκαγιάς και της δημιουργίας των ανάλογων χαρτών (που έχουν παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2).

Ο αναλυτής επομένως θα πρέπει να λάβει υπόψη του την διπλή εφαρμογή των στοιχείων πριν την πυρκαγιά δηλαδή τόσο για την δημιουργία χάρτη επικινδυνότητας όσο και για αποτίμηση της καταστροφής που η πυρκαγιά επέφερε.

Τα δορυφορικά δεδομένα που έχουν την δυνατότητα περισσότερων εφαρμογών, είναι ήδη δοκιμασμένα και το κόστος τους δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο, είναι αυτά των δορυφόρων LandSat και SPOT αφού ειδικά για τα δεδομένα αυτών των δεκτών έχουν προταθεί κατά καιρούς διάφοροι δείκτες βλάστησης ενώ και η γεωμετρική, φασματική και ραδιομετρική διακριτική τους ικανότητα είναι τέτοια που επιτρέπει την εφαρμογή τους σε μια περιοχή μελέτης όπως η έκταση που καταλαμβάνουν συνήθως τα ελληνικά δάση και για παράδειγμα το δάσος του Ταυγέτου. Το κόστος λοιπόν προμήθειας δορυφορικών εικόνων Landsat και Spot ημερομηνίας λήψης μεταγενέστερης από την κατάσβεση της πυρκαγιάς ανέρχεται στο ποσό των **3.500 €**.

## **Κεφάλαιο 5- Μελέτη Εφαρμογής σε Ελληνική Έκταση**

Όπως έχει αναφερθεί από το πρώτο κιόλας Κεφάλαιο, σκοπός της παρούσας διατριβής είναι η παρουσίαση των βημάτων και των τεχνικών που μπορούν να εφαρμοστούν ώστε να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών. Στο Κεφάλαιο αυτό γίνεται κωδικοποιημένη περιγραφή της, κατά την άποψη του γράφοντα, βέλτιστης μεθοδολογίας και επιλογής τεχνικών που πρέπει να γίνει για τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών στην περίπτωση του δάσους του Ταϋγέτου, Περιφέρεια Πελοποννήσου.

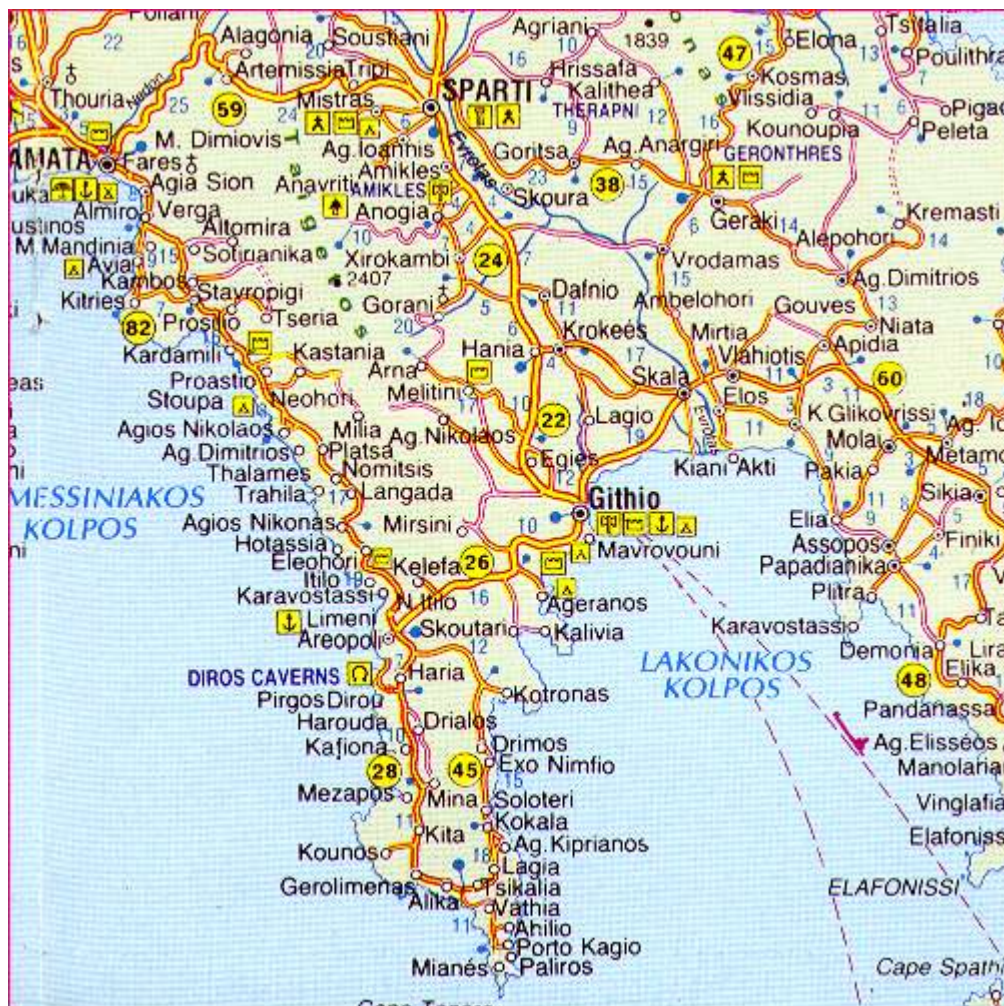
### **5.1. Το δάσος του Ταϋγέτου**

Η επιλογή του δάσους του Ταϋγέτου ως εξέταση της δυνατότητας εφαρμογής και δημιουργίας χάρτη εκτίμησης επικινδυνότητας και μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης πυρκαγιών δεν έγινε τυχαία.

Το δάσος του Ταϋγέτου βρίσκεται στο νοτιότερο άκρο της ηπειρωτικής Ελλάδας, στην Πελοπόννησο (Σχήμα 5.1), νότια της Σπάρτης. Πρόκειται για το σημαντικότερο δάσος της Ελλάδας και έχει προταθεί ως Ειδική Προστατευόμενη περιοχή στο δίκτυο της Ευρωπαϊκής Ένωσης Natura 2000.



Η βιοδιαθεσιμότητα του Ταϋγету, περιλαμβάνει πάνω από εκατό είδη φυτών που δεν υπάρχουν σε άλλη χώρα πέραν της Ελλάδας ενώ δώδεκα από αυτά, όπως το *Anthionema calenbergii* υπάρχουν μόνο στην περιοχή. Τμήμα αυτής της αρκετά σημαντικής χλωρίδας εντοπίζεται στην εποχή των Παγετώνων καθώς η Ελλάδα δεν ήταν καλυμμένη με πάγους, πολλά είδη διασώθηκαν σε αυτό το καταφύγιο. Μετά την αποχώρηση των πάγων, τα είδη αυτά κινήθηκαν πάλι προς τα βόρεια αλλά στο σχηματισμένο καταφύγιο διατηρήθηκαν είδη εξαιρετικής ποιότητας και αντοχής. Ωστόσο, ο κυριότερος λόγος με τον οποίο εξηγείται αυτή η ποικιλία ειδών, είναι η μεγάλη διαφοροποίηση στις ζώνες βλάστησης που είναι αποτέλεσμα του είδους του εδάφους και των ιδιαίτερων κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής.



Σχήμα 5.1. Η ευρύτερη περιοχή της Πελοποννήσου όπου βρίσκεται το δάσος του Ταϋγету

Σε αυτήν την περιοχή των 500km<sup>2</sup> μπορούν να διακριθούν τουλάχιστον 7 ζώνες βλάστησης:

- η ζώνη phrygana/garigue (το phrygana είναι ένα ετήσιο φυτό που ανθεί το καλοκαίρι)
- η ζώνη maquis (θάμνοι)
- η ζώνη πεύκων Aleppo



- η ζώνη βελανιδιών
- η ζώνη Αυστριακού πεύκου και Ελληνικού έλατου
- η ψευδοαλπική ζώνη
- η παρόχθια ζώνη (κατά μήκος ρεμάτων)

Η πανίδα του δάσους του Ταϋγέτου, ενώ δεν είναι ιδιαίτερα εντυπωσιακή από πληθυσμιακής άποψης, περιλαμβάνει έναν αριθμό ξεχωριστών ειδών, ιδιαίτερα ερπετών. Τουλάχιστον πέντε είδη ερπετών που ζουν στην περιοχή απειλούνται με αφανισμό: το *Mauremys caspica*, το *Testudo hermanni*, το *Testudo marginata*, το *Elaphe quatuorlineata* καθώς επίσης και το *Elaphe sicaula*. Επίσης, υπάρχουν τρία είδη ερπετών τα οποία ζουν μόνο στην Πελοπόννησο.

Επιπλέον, στον Ταϋγετο μπορεί να δει κανείς μερικά πολύ όμορφα είδη πεταλούδας ενώ λόγω της γεωγραφικής του θέσης, αποτελεί καταφύγιο πολλών αποδημητικών πουλιών κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Στο δάσος του Ταϋγέτου βρίσκεται και το σκαθάρι της οικογένειας *Lucanidae* που είναι το μεγαλύτερο σκαθάρι της Ευρώπης και το οποίο ξεχωρίζει από τα κερατοειδή του σαγόνια και προστατεύεται από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία. Θηλαστικά στην περιοχή του Ταϋγέτου περιλαμβάνουν αγριόγατες, τσακάλια και τυφλοπόντικες.

Αρκετές από τις απειλές στο δάσος του Ταϋγέτου είναι χαρακτηριστικές των περισσότερων Μεσογειακών δασών. Κατά την διάρκεια της τελευταίας πενταετίας δύο μεγάλες πυρκαγιές κατέστρεψαν τμήματα των πεύκων *Aleppo* και των μαύρων πεύκων. Αν και ο πληθυσμός των ορεινών χωριών ελαττώθηκε κατά την διάρκεια των τελευταίων τριάντα χρόνων, η εκτεταμένη βοσκή αιγοπροβάτων επέδρασε αρνητικά στην ποιότητα του εδάφους καθώς με την βοσκή καταστρέφεται μεγάλο μέρος της χλωρίδας της περιοχής.

Το παράνομο κυνήγι, κυρίως από ντόπιους κτηνοτρόφους, αποτελεί συνεχή απειλή για την πανίδα της περιοχής. Η πιο ορατή καταστροφή στο δάσος του Ταϋγέτου είναι μέσω της συνεχούς και άσχημα σχεδιασμένης κατασκευής έργων υποδομής και σπιτιών. Ενώ οι κατοικίες έχουν επίπτωση κυρίως στην αισθητική του τοπίου, οι δρόμοι τεμαχίζουν το οικοσύστημα και αυξάνουν τον κίνδυνο εκδήλωσης πυρκαγιάς.

Διάφορες οικολογικές οργανώσεις έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον για το δάσος του Ταϋγέτου αναγνωρίζοντας την σπουδαιότητά του στο περιβάλλον. Το παράρτημα του Wildlife Worldwide Fund (WWF) στην Ελλάδα επισημαίνει ([http://passport.panda.org/search\\_results.cfm](http://passport.panda.org/search_results.cfm)) την απουσία Εθνικού Χάρτη Δασών στην Ελλάδα και συμπεραίνει ότι αυτό οδηγεί σε σύγχυση καθώς δεν

μπορούν να καθοριστούν τα όρια μεταξύ δασικών, αγροτικών και αστικών εκτάσεων. Το γεγονός αυτό το εκμεταλλεύονται διάφοροι καταπατητές και συστηματικά επεκτείνουν τους οικισμούς εντός καμένων δασικών εκτάσεων. Η απουσία επομένως Εθνικού Χάρτη Δασών οδηγεί στην υποβάθμιση των δασών στην Ελλάδα.

Το δάσος του Ταυγέτου αποτελεί σημαντικό πνεύμονα όχι μόνο για την περιοχή της Πελοποννήσου αλλά και για την υπόλοιπη Ελλάδα. Είναι επομένως θέμα άμεσης προτεραιότητας η δημιουργία ενός αναπτυξιακού συστήματος αντιμετώπισης πυρκαγιών στην περιοχή. Στη συνέχεια του Κεφαλαίου παρουσιάζονται τα στάδια δημιουργίας ενός τέτοιου συστήματος και οι τεχνικές που θεωρούμε ότι είναι οι βέλτιστες.

## **5.2. Στάδιο προετοιμασίας**

### **5.2.1. Δημιουργία χάρτη επικινδυνότητας**

Για την δημιουργία του χάρτη επικινδυνότητας της περιοχής μελέτης πρέπει, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, να γίνει συλλογή ενός πλήθους δεδομένων. Τα κυριότερα από τα αυτά αλλά και οι τεχνικές ανάκτησής τους παρουσιάζονται στην συνέχεια.

- **Τοπογραφία**

Η δημιουργία ενός ΨΜΥ γεωμετρικής ανάλυσης τουλάχιστον 20m είναι ουσιαστική για τη δημιουργία του χάρτη επικινδυνότητας. Το ΨΜΥ αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την ψηφιοποίηση των ανάλογων χαρτών της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού ενώ υπάρχει και η δυνατότητα προμήθειάς του από εξειδικευμένες εταιρείες και οργανισμούς. Προτείνεται η δημιουργία του από τον χρήστη έτσι ώστε να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα στην ακρίβεια και την αξιοπιστία των έτοιμων ΨΜΥ. Η χρησιμοποίηση τεχνικών συμβολομετρίας εξασφαλίζει μεγαλύτερη ακρίβεια στο ΨΜΥ αλλά το κόστος κτήσης και επεξεργασίας των δεδομένων αυτών είναι ιδιαίτερα μεγάλο οπότε και η εφαρμογή τεχνικών συμβολομετρίας απορρίπτεται.

- **Μετεωρολογικά δεδομένα**

Όπως έχει προαναφερθεί υπάρχουν δύο μεθοδολογίες: αυτή της ίδρυσης μετεωρολογικών σταθμών και η συλλογή των δεδομένων της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Η ίδρυση μετεωρολογικών σταθμών στην περιοχή μελέτης είναι προτιμότερη πάλι από άποψη αξιοπιστίας των δεδομένων. Οι σταθμοί αυτοί θα πρέπει να έχουν την δυνατότητα να αντέχουν σε περίπτωση πυρκαγιάς, να παρέχουν όλα τα απαιτούμενα από το μοντέλο πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς στοιχεία και φυσικά να έχουν την δυνατότητα μετάδοσης των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

- **Ταξινόμηση της βλάστησης**

Η ταξινόμηση της βλάστησης μπορεί να γίνει είτε με επί τόπου μετρήσεις και αξιοποίηση των δεδομένων της Δασικής Υπηρεσίας είτε με την χρησιμοποίηση δορυφορικών εικόνων από δέκτες όπως ο θεματικός χαρτογράφος (TM) του δορυφόρου Landsat ή ο δέκτης Vegetation (VGT) του δορυφόρου SPOT. Η ταξινόμηση με τις δορυφορικές εικόνες είναι μια σχετικά φθηνή τεχνική ενώ οι εικόνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παρακολούθηση της καταστροφής μετά από μια ενδεχόμενη πυρκαγιά στην περιοχή μελέτης. Για την εφαρμογή στο δάσος του Ταυγέτου προτείνεται η χρησιμοποίηση και των δύο τεχνικών ώστε να είναι δυνατή και η σύγκριση των αποτελεσμάτων που δίνουν.

- **Μοντέλο καύσιμης ύλης**

Για την επιλογή του μοντέλου της καύσιμης ύλης πρέπει να υπάρχει πολύ καλή γνώση της ποιότητας της βλάστησης στην περιοχή μελέτης. Με αυτό ως δεδομένο υπάρχουν δύο εναλλακτικές λύσεις, για την επιλογή της οποίας σημαντικό ρόλο παίζει το μοντέλο πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς που θα χρησιμοποιηθεί.

Μερικά μοντέλα δεν δέχονται τροποποιήσεις στα μοντέλα καύσιμης ύλης που περιέχουν, οπότε η μία λύση είναι η ύπαρξη αντιστοιχίας μεταξύ των δεδομένων της καύσιμης ύλης της περιοχής μελέτης και κάποιου μοντέλου καύσιμης ύλης (π.χ. Anderson).

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί περισσότερο ευέλικτο μοντέλο πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς είναι δυνατή η δημιουργία ειδικού μοντέλου καύσιμης ύλης για την περιοχή μελέτης και η ενσωμάτωση του μοντέλου αυτού στο μοντέλο πρόβλεψης της διάδοσης.

Η επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου καύσιμης ύλης εξαρτάται από τον χρήστη και τις διαθέσιμες οικονομικές δυνατότητες. Προτείνεται η προσαρμογή του μοντέλου του Anderson στις συνθήκες του δάσους του Ταυγέτου καθώς το μοντέλο αυτό είναι συμβατό και με το μοντέλο πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς που θα χρησιμοποιηθεί (βλ. Ενότητα 5.2.2)

- **Διάφορα στοιχεία**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η χρησιμοποίηση ΓΣΠ προσφέρει το πλεονέκτημα της ταυτόχρονης διαχείρισης δεδομένων από διαφορετικές πηγές. Το πλήθος των δεδομένων αυτών εξαρτάται από τον χρήστη. Στην περίπτωση του δάσους του Ταυγέτου τα στοιχεία που πρέπει να περιλαμβάνει το ΓΣΠ είναι: γεωλογικός χάρτης της περιοχής, υδρογεωλογία της περιοχής,

χάρτης χρήσης γης, θέσεις των οικισμών, βάση δεδομένων με το ιστορικό εκδήλωσης πυρκαγιών στην ευρύτερη περιοχή του δάσους του Ταυγέτου, το οδικό δίκτυο, τα διαθέσιμα μέσα πυρόσβεσης.

- *Προτεινόμενες μέθοδοι κατάσβεσης*

Με τα στοιχεία που έχουν ήδη αναφερθεί είναι δυνατή η δημιουργία ενός χάρτη στον οποίο θα απεικονίζονται οι περιοχές ανάλογα με το δυναμικό που εμφανίζουν για εκδήλωση πυρκαγιάς. Το ουσιώδες για την αξιοπιστία του χάρτη αυτού, είναι η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου καύσιμης ύλης και η συνεκτίμηση των μετεωρολογικών δεδομένων.

Πέραν όμως αυτού, η χρησιμοποίηση ΓΣΠ παρέχει στον χρήστη τη δυνατότητα να προτείνει μεθόδους πυρόσβεσης καθώς μπορεί να βρει μέσω του ΓΣΠ, τις βέλτιστες θέσεις στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν τα όποια μέσα κατάσβεσης. Επίσης, θα μπορεί να προτείνει εναλλακτικές μεθόδους κατάσβεσης (π.χ. ειδικά χημικά μέσα) τα οποία θα δρουν συμπληρωματικά ή αυτόνομα, των ήδη γνωστών μέσων κατάσβεσης π.χ. αντλίες, αεροπλάνα).

### 5.2.2 Δημιουργία μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης πυρκαγιάς

Από την στιγμή που έχουν πραγματοποιηθεί οι διαδικασίες που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα το πρόβλημα μεταπίπτει στην επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς.

Επειδή η προηγηθείσα διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή ενός αρκετά λεπτομερούς ΓΣΠ, το καταλληλότερο μοντέλο είναι το **Farsite** αφού του μοναδικό του μειονέκτημα έναντι των υπολοίπων είναι το ότι απαιτεί την υποστήριξη ενός συστήματος ΓΣΠ. Επίσης, το Farsite είναι ένα μοντέλο για το οποίο έχει ήδη πραγματοποιηθεί έλεγχος της αξιοπιστίας του σε διάφορα περιστατικά δασικών πυρκαγιών ανά τον κόσμο και θεωρείται από τους αρμόδιους φορείς ως το πλέον αξιόπιστο μοντέλο. Βέβαια είναι πάντα δυνατή η σύγκριση μεταξύ των διάφορων τύπων μοντέλων. Για παράδειγμα θα μπορούσε χωρίς ιδιαίτερο οικονομικό κόστος να δημιουργηθεί και ένα μοντέλο πιθανοτήτων όπως αυτό που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο Κεφάλαιο. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται η αξιοπιστία του επιλεγθέντος μοντέλου.

Στην περίπτωση που υπάρχει η οικονομική δυνατότητα δεν πρέπει να αποκλειστεί η πιθανότητα δημιουργίας ενός μοντέλου από την αρχή, προσαρμοσμένου στις ιδιαίτερες συνθήκες του δάσους του Ταυγέτου. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό και το μοναδικό, ουσιαστικά, κρίσιμο ερώτημα είναι η επιλογή της μεθόδου με την οποία θα γίνεται η διάδοση της πυρκαγιάς (π.χ. μοντέλο Rothermel,

αρχή του Huygens) κάτι όμως που θα γίνει και στην προηγούμενη περίπτωση (της αποδοχής ενός ήδη υπάρχοντος μοντέλου πρόβλεψης της πυρκαγιάς).

### 5.3. Στάδιο ανίχνευσης – διαχείρισης της κρίσης

Σε μια περιοχή όπως το δάσος του Ταϋγέτου για να θεωρηθεί ένα σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών πρέπει ο χρόνος μεταξύ της έναρξης του φαινομένου και του εντοπισμού του να μην είναι μεγαλύτερος των 10-15 min.

Για να γίνει αυτό εφικτό θα πρέπει να αποκλειστούν οι δορυφορικές τεχνικές ανίχνευσης, γιατί εκτός από το αρκετά υψηλό κόστος τους, είναι αρκετά δύσκολο να επιτευχθεί ο παραπάνω χρόνος ανίχνευσης.

Επομένως, η επιλογή θα πρέπει να γίνει μεταξύ των εναέριων και των επίγειων τεχνικών ανίχνευσης ή πιθανόν να χρησιμοποιηθεί κάποιος συνδυασμός τους. Ο **συνδυασμός επίγειων και εναέριων τεχνικών**, θεωρείται ότι είναι ο πλέον αποτελεσματικός αναλογιζόμενοι πάντα και το κόστος εφαρμογής τους, ειδικά σε σχέση με τις δορυφορικές τεχνικές.

Έτσι, προτείνουμε καταρχήν τη δημιουργία του κέντρου ελέγχου του όλου συστήματος το οποίο θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα του δάσους για να μην μεγιστοποιηθεί η δαπάνη εξοπλισμού των συστημάτων επικοινωνίας. Φυσικά σε ασφαλή τοποθεσία για να μην κινδυνεύσει το ίδιο το κέντρο ελέγχου σε ενδεχόμενη πυρκαγιά!

Στο κέντρο ελέγχου θα βρίσκεται ο πυρήνας του συστήματος διαχείρισης και σε αυτό θα βρίσκεται η βάση δεδομένων που θα έχει δημιουργηθεί από το στάδιο της προετοιμασίας με τον χάρτη επικινδυνότητας, το μοντέλο πρόβλεψης και όλα τα υπόλοιπα στοιχεία που θα περιέχονται σε αυτήν. Επίσης, στο κέντρο ελέγχου θα βρίσκονται τα συστήματα ραδιο-επικοινωνίας έτσι ώστε η βάση δεδομένων να λαμβάνει τα στοιχεία από το σύστημα ανίχνευσης. Στο κέντρο ελέγχου θα υπάρχει και ειδικό λογισμικό με το οποίο θα ενισχύεται η διαδικασία λήψης αποφάσεων για την διαχείριση πιθανής κρίσης.

Στο κέντρο αυτό θα βρίσκεται το απαραίτητο τεχνικό και επιτελικό προσωπικό ώστε αφενός μεν, κατά την εκδήλωση της πυρκαγιάς, να γίνεται συνεχής ενημέρωση της βάσης δεδομένων και αφετέρου να δίνεται από τον/τους αρμόδιους ο συντονισμός των προσπάθειών κατάσβεσης.

Μετά τη δημιουργία του κέντρου ελέγχου επόμενο βήμα είναι η ίδρυση πύργων ελέγχου. Οι πύργοι αυτοί θα είναι μη επανδρωμένοι αλλά θα έχουν τοποθετηθεί σε αυτούς ψηφιακά συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιών όπως το AWIS ή το FireHawk που λειτουργούν με κάμερες. Επειδή το σύστημα FireHawk έχει από μόνο του την δυνατότητα άμεσης μετάδοσης των δεδομένων πιστεύουμε ότι θα είναι πιο αξιόπιστο ενώ και θα μπορεί να αρχίσει την λειτουργία του αμέσως μετά τη τοποθέτησή του στους πύργους ελέγχου χωρίς καθυστερήσεις.

Εξ' αιτίας της απαίτησης για άμεσης μετάδοσης των δεδομένων από τον πύργο ελέγχου στο κέντρο ελέγχου του συστήματος είναι προφανές πως οι πύργοι θα πρέπει να κατασκευαστούν σε τέτοια σημεία όπου και θα έχουν για παρατήρηση του μεγαλύτερου δυνατού οπτικού πεδίου αλλά και θα είναι εφικτή η ραδιοζεύξη μεταξύ αυτών και του κέντρου ελέγχου.

Για την επιλογή των βέλτιστων θέσεων ίδρυσης πύργων ελέγχου είναι απαραίτητο να ληφθούν επομένως υπόψη ένα πλήθος παραγόντων, όπως το τοπογραφικό ανάγλυφο, οι δυνατότητες των πομπών, η γωνία κάλυψης κάθε δέκτη FireHawk κ.ά. Σημαντικό ρόλο, αν όχι τον σπουδαιότερο, για την επιλογή των θέσεων αυτών θα διαδραματίσει το ΓΣΠ, που έχει ήδη δημιουργηθεί από το στάδιο της προετοιμασίας, καθώς με αυτό γίνεται απλούστερη η διαδικασία επιλογής.

Εκτός όμως από την ίδρυση και λειτουργία μη επανδρωμένων πύργων ελέγχου, η από αέρος επιτήρηση της περιοχής του δάσους θεωρείται απαραίτητη καθώς με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα παρατήρησης πολύ μεγαλύτερης περιοχής. Οι περιπολίες αυτές θα πρέπει να γίνονται μόνο κατά την διάρκεια των κρίσιμων περιόδων, καλοκαιρινοί μήνες, έτσι ώστε να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος διαχείρισης. Επίσης, από την στιγμή που οι πύργοι ελέγχου θα είναι εφοδιασμένοι με όργανα υψηλής τεχνολογίας προτείνεται, πάλι για την εξοικονόμηση πόρων, οι περιπολίες αυτές να είναι επανδρωμένες με έμπειρους πυροσβέστες που να γνωρίζουν αρκετά καλά την περιοχή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο Κεφάλαιο 2, κατά το στάδιο της προετοιμασίας, με την βοήθεια του ΓΣΠ της περιοχής μελέτης έχουν επιλεγεί και δημιουργηθεί οι ζώνες αντιπυρικής προστασίας, έχουν τοποθετηθεί σε κατάλληλα σημεία πυροσβεστικοί κρουνοί, έχει δημιουργηθεί τέτοιο οδικό δίκτυο ώστε να είναι προσβάσιμη η μεγαλύτερη έκταση του δάσους.

Το ερώτημα που τίθεται σε αυτό το σημείο είναι το πώς θα λειτουργήσει το σύστημα από την στιγμή που θα εντοπισθεί μια εστία πυρκαγιάς. Το κέντρο ελέγχου λαμβάνει επομένως τις εικόνες από τους πύργους ελέγχου και ο ειδικός αναλυτής εντοπίζει την εστία. Αμέσως ενεργοποιείται ο

μηχανισμός κατάσβεσης και ειδοποιείται να προσέλθει στο κέντρο ελέγχου, αν δεν βρίσκεται ήδη εκεί, ο υπεύθυνος συντονιστής των δυνάμεων κατάσβεσης.

Οι αναλυτές λαμβάνοντας συνεχώς νέα δεδομένα από τις κάμερες και με βάση τα επικρατούντα καιρικά φαινόμενα τροποποιούν το μοντέλο πρόβλεψης της διάδοσης ανάλογα και ειδοποιούν τους πυροσβέστες που ήδη, σε χρόνο το πολύ 15min, πρέπει να βρίσκονται στην εστία.

## 5.4. Στάδιο Αποτίμησης

Μετά την κατάσβεση της πυρκαγιάς πρέπει να γίνει σε σύντομο χρονικό διάστημα μια αποτίμηση του μεγέθους της καταστροφής ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα καταπατήσεων αλλά και να σχεδιαστεί ο τρόπος επαναφοράς, στο βαθμό που αυτό είναι δυνατό, του δάσους στην αρχική του κατάσταση.

Κύριο μέλημα, επίσης, των μετά την κατάσβεση της πυρκαγιάς, ερευνών είναι να γίνει αποτίμηση του τρόπου αντιμετώπισης της κρίσης (μέσα πυρόσβεσης, θέσεις πύργων ελέγχου, αποτελεσματικότητα τεχνικών ανίχνευσης, συντονισμός ομάδων κατάσβεσης κ.ά.).

Το πρώτο επομένως βήμα είναι η χαρτογράφηση της καμένης έκτασης με δορυφορικά δεδομένα LandSat ή Spot. Στην συνέχεια ελέγχεται *ο τρόπος ανίχνευσης* (λειτουργήσαν άμεσα και σωστά οι κάμερες; σε πόσο χρόνο έγινε αντιληπτή η πυρκαγιά;), *το μοντέλο πρόβλεψης της διάδοσης* (ποια ήταν η σχέση της κίνησης της πυρκαγιάς βάση μοντέλου σε σχέση με την πραγματικότητα;), *ο συντονισμός των ομάδων κατάσβεσης* (ήταν δυνατή η επικοινωνία του κέντρου ελέγχου με τις ομάδες κατάσβεσης; ήταν ορθή η αντιμετώπιση της κρίσης;), *τα μέσα κατάσβεσης* που χρησιμοποιήθηκαν και οι θέσεις όπου αυτά είναι διασκορπισμένα (ποια ήταν η αποτελεσματικότητα των υλικών κατάσβεσης; ήταν η θέση τους εύκολα προσβάσιμη την ώρα της κρίσης;).

Μετά την απάντηση όλων αυτών των ερωτημάτων πρέπει να γίνουν όλες οι απαραίτητες διορθωτικές κινήσεις ώστε, στην περίπτωση επανάληψης του φαινομένου, να μειωθούν σε μεγάλο βαθμό οι επιπτώσεις της πυρκαγιάς.

Όπως έχει προαναφερθεί μια από τις σκοπιμότητες της μετά την πυρκαγιά έρευνας είναι η αποτροπή φαινομένων καταπατήσεων. Για να γίνει όμως αυτό εφικτό θα πρέπει, πέραν της άμεσης χαρτογράφησης της καμένης έκτασης και οριοθέτησης αυτής, να γίνεται συστηματική παρακολούθηση της με δορυφορικά δεδομένα. Ο λόγος για τον οποίο επιλέγονται τα δορυφορικά δεδομένα είναι γιατί αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την παρατήρηση της πανίδας της ευρύτερης περιοχής αλλά και της προόδου, των ενδεχόμενων, προσπαθειών αναδάσωσης.



## 5.5. Χρονικός προγραμματισμός – κοστολόγιο Εργασιών

Η ενότητα αυτή αποτελεί το θεμέλιο λίθο της δημιουργίας ενός επιχειρησιακού συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών καθώς περιλαμβάνει τόσο τα εκτιμώμενα κόστη κάθε εργασίας όσο και τον απαιτούμενο χρόνο υλοποίησής τους.

Δεν είναι δυνατόν να γίνεται λόγος για ένα τέτοιο σύστημα, και να προτείνεται η εφαρμογή του, εάν δεν δοθεί μια εικόνα στον ενδιαφερόμενο (πολιτεία, δήμοι, οργανισμοί ανάπτυξης, περιβαλλοντικές οργανώσεις) για το κόστος και τον χρόνο που απαιτείται για την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών.

### 5.5.1. Στάδιο Προετοιμασίας

Έχουμε ήδη αναφέρει πως κατά το στάδιο της προετοιμασίας, το οποίο θεωρείται ότι είναι και το σπουδαιότερο καθώς η πρόληψη είναι πάντα καλύτερη της καταστολής, χρειάζεται πλήθος δεδομένων τα οποία θα ενσωματωθούν σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών. Το πρώτο μέλημα επομένως είναι η επιλογή του ΓΣΠ αλλά και του προγράμματος επεξεργασίας εικόνας που θα χρησιμοποιηθεί.

Από τα διάφορα πακέτα ΓΣΠ που κυκλοφορούν στην αγορά το πλέον γνωστό είναι το ArcView με κόστος κτήσης **30.000 €** ενώ τα δημοφιλέστερα εμπορικά προγράμματα επεξεργασίας εικόνας όπως για παράδειγμα το ERDAS ή το ErMapper κοστίζουν περίπου **15.000 €**. Το πιο πρόγραμμα θα αγορασθεί, πέραν των δυνατοτήτων που το καθένα έχει, θα εξαρτηθεί και από την σύνθεση της ομάδας ελέγχου που θα το χρησιμοποιεί. Έτσι, εάν στην ομάδα ελέγχου υπάρχει κάποιος αναλυτής με εμπειρία στο ένα ή στο άλλο πρόγραμμα θα προτιμηθεί αυτό του οποίου είναι γνώστης καθώς με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η περίοδος προσαρμογής και εκπαίδευσής του σε αυτό. Με δεδομένα επομένως τα προγράμματα ΓΣΠ και επεξεργασίας εικόνας, ο υπεύθυνος δημιουργίας του συστήματος πρέπει να αρχίσει την συλλογή δεδομένων:

Για την δημιουργία του *Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους* σε μια περιοχή όπως το δάσος του Ταυγέτου, προτείνεται η ψηφιοποίηση των χαρτών, κλίμακας 1:50.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού. Η αγορά ψηφιοποιητή μπορεί να αποφευχθεί καθώς η διαδικασία της ψηφιοποίησης μπορεί να γίνει σε συνεργασία με κάποιο εκπαιδευτικό ίδρυμα. Για να καλυφθεί η περιοχή του δάσους του Ταυγέτου απαιτούνται 1-2 φύλλα χάρτη κλίμακας 1:50.000 η αγορά των οποίων στοιχίζει **3,00 €** ανά φύλλο. Για την ψηφιοποίησή τους, με δεδομένο ότι από αυτά θα προέλθουν τα στοιχεία για τις ισούψείς καμπύλες, το πρωτεύον και δευτερεύον οδικό δίκτυο και οι θέσεις των οικισμών, απαιτείται χρόνος 3 εβδομάδων. Στην περίπτωση που το χρονικό αυτό διάστημα κριθεί μεγάλο

υπάρχει η δυνατότητα προμήθειας των έτοιμων ΨΜΥ είτε από δορυφορικά δεδομένα (Spot P) είτε πάλι από ψηφιοποίηση από χάρτες

Για την περιοχή του δάσους του Ταυγέτου απαιτείται η ίδρυση ενός *μετεωρολογικού σταθμού* το κόστος του οποίου ανέρχεται στο ποσό των **3.000 €** ενώ απαιτείται χρονικό διάστημα ίσο με 4 μήνες για την ίδρυση και λειτουργία του. Ο μετεωρολογικός αυτός σταθμός θα πρέπει να έχει την δυνατότητα καταγραφής δεδομένων για την θερμοκρασία του αέρα, την υγρασία, την διεύθυνση του ανέμου και την ακτιβολία ενώ θα πρέπει να έχει την δυνατότητα αυτόματης αποστολής των δεδομένων στο κέντρο ελέγχου.

Προκειμένου να γίνει η *ταξινόμηση της βλάστησης* απαιτείται η προμήθεια δορυφορικών εικόνων LandSat ή SPOT, επεξεργασία τους και δημιουργία ομάδων βλάστησης. Την ταξινόμηση αυτή θα ακολουθήσει εργασία πεδίου για συλλογή πληροφοριών και βελτιστοποίηση των ομάδων που θα έχουν προκύψει από την αρχική ταξινόμηση. Το κόστος προμήθειας μιας δορυφορικής εικόνας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως το πλήθος των φασματικών ζωνών, η ημερομηνία λήψης καθώς επίσης και το εάν ο χρήστης επιθυμεί τα αρχικά δεδομένα ή αυτά που θα προέλθουν κατόπιν γεωμετρική διόρθωσης και επεξεργασίας τους από την εταιρεία προμήθειας των εικόνων.

Αναφορικά με την ημερομηνία λήψης των εικόνων, στο στάδιο της προετοιμασίας, χρονικό διάστημα δύο χρόνων πριν την έναρξη λειτουργίας του συστήματος καλύπτει τις απαιτήσεις του συστήματος. Σχετικά με το είδος των εικόνων, σε πρώτη φάση πρέπει να αγορασθούν μια εικόνα LandSat TM και μία εικόνα Spot VGT. Στη συνέχεια του προγράμματος και ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι πόρων μπορούν να αγορασθούν και άλλες εικόνες, από διαφορετικούς δέκτες ώστε να είναι δυνατή και η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους. Το κόστος για τις δύο εικόνες που προαναφέραμε (μία LandSat και μία Spot) ανέρχεται στο ποσό των **2.400 €** με χρόνο παράδοσης 3 εβδομάδων από την παραγγελία. Οι εικόνες αυτές μετά την παραλαβή τους θα πρέπει να διορθωθούν γεωμετρικά έτσι ώστε να τοποθετηθούν στο ΓΣΠ και να έχουμε επομένως ένα σύστημα αναφοράς, αυτό των χαρτών της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, δηλαδή το ΕΓΣΑ 87. Για να γίνει η γεωμετρική διόρθωση είναι πολύ πιθανόν να χρειαστούν και μετρήσεις στο πεδίο, κατά προτίμηση με δέκτες GPS, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Στην περίπτωση ύπαρξης πόρων τα δορυφορικά δεδομένα μπορούν να εισάγονται στο σύστημα γεωμετρικά διορθωμένα από την εταιρεία προμήθειάς τους.

Η ακρίβεια δημιουργίας των χαρτών και του συστήματος αναφοράς στο οποίο θα λειτουργεί το ΓΣΠ είναι προφανές πως είναι από τις πλέον σημαντικές απαιτήσεις καθώς από αυτούς τους χάρτες

θα γίνεται, σε περίπτωση εκδήλωσης του φαινομένου, η καθοδήγηση των ομάδων πυρόσβεσης. Προκειμένου να πραγματοποιηθούν μετρήσεις με GPS, της επιθυμητής ακρίβειας απαιτούνται περίπου **30.000 €** ενώ απαραίτητη προϋπόθεση είναι, η πραγματοποίηση των μετρήσεων, που μπορεί να κρατήσουν για περίπου 3 εβδομάδες, να γίνει από εξειδικευμένη και έμπειρη στο συγκεκριμένο σύστημα ομάδα ανθρώπων ώστε να γίνει εξοικονόμηση χρόνου (και κατ' επέκταση χρημάτων) αλλά και οι μετρήσεις να είναι πραγματικά αξιόπιστες. Οι μετρήσεις στο πεδίο με δέκτες GPS κρίνεται απαραίτητο να γίνουν ακόμα και εάν οι δορυφορικές εικόνες αγορασθούν γεωμετρικώς διορθωμένες έτσι ώστε να μπορεί να γίνει έλεγχος της αξιοπιστίας των εικόνων αυτών.

Το επόμενο βήμα στην υλοποίηση του συστήματος διαχείρισης πυρκαγιών στο δάσος του Ταυγέτου είναι η επιλογή του μοντέλου πρόβλεψης της διάδοσης της πυρκαγιάς. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το μοντέλο που προτείνεται είναι το FarSite τόσο γιατί πρόκειται για ένα μοντέλο πρόβλεψης που έχει χρησιμοποιηθεί πολλές φορές στο παρελθόν, με αρκετά καλή επιτυχία, όσο και γιατί η προμήθειά του μπορεί να γίνει χωρίς κόστος καθώς η διακίνησή του γίνεται ελεύθερα στο Διαδίκτυο.

Στο δεύτερο Κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, αναφέρθηκε ότι το μοντέλο πρόβλεψης FarSite χρησιμοποιεί ως μοντέλο καύσιμης ύλης αυτό του Anderson. Αυτό σημαίνει πως θα πρέπει να γίνουν επί τόπου παρατηρήσεις της βλάστησης, ειδικές μετρήσεις από εξειδικευμένο προσωπικό (κατά πάσα πιθανότητα βιολόγους ή βοτανολόγους) έτσι ώστε να είναι εφικτός ο συσχετισμός της βλάστησης του δάσους του Ταυγέτου με το μοντέλο Anderson στον μεγαλύτερο δυνατό βαθμό. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό, ή εάν στην πορεία εξέλιξης του όλου συστήματος υπάρχει η δυνατότητα, είναι δυνατόν, με την βοήθεια προγραμματιστών, να δημιουργηθεί μέσα στο FarSite το μοντέλο καύσιμης ύλης που ανταποκρίνεται πλήρως στο δάσος της περιοχής ενδιαφέροντος.

Από βιβλιογραφική έρευνα μπορεί να δημιουργηθεί και ο χάρτης του ιστορικού των πυρκαγιών στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος αλλά και να συγκεντρωθούν όλα τα υπόλοιπα στοιχεία (γεωλογική δομή υπεδάφους, θέσεις ποταμών, χάρτης χρήσης γης ώστε να ενσωματωθούν στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών του κέντρου ελέγχου. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται τόσο για συλλογή των παραπάνω δεδομένων όσο και για την σύγκριση μοντέλου καύσιμης ύλης με πραγματικά δεδομένα είναι περίπου δύο μήνες.

Με τη δημιουργία ενός ΓΣΠ που θα περιέχει όλα τα στοιχεία που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα ουσιαστικά ξεκινάει η δεύτερη φάση της υλοποίησης του συστήματος διαχείρισης δασικών

πυρκαγιών το στάδιο δηλαδή της άμεσης ανίχνευσης, του σχεδίου αντιμετώπισης της κρίσης και της επιλογής των κατάλληλων μέσων κατάσβεσης.

### 5.5.2. Στάδιο ανίχνευσης

Η πρώτη ουσιαστική εφαρμογή του ΓΣΠ είναι να παράσχει στους αναλυτές τις βέλτιστες θέσεις ίδρυσης πύργων ελέγχου σε σχέση με το οπτικό πεδίο των καμερών που αυτοί θα έχουν, την δυνατότητα ραδιοζεύξης κ.ά.

Το σύστημα που προτείνεται να χρησιμοποιηθεί είναι το σύστημα FireHawk γιατί παρέχει από μόνο του την δυνατότητα μετάδοσης των δεδομένων στο κέντρο ελέγχου. Το όλο σύστημα θα λειτουργεί ως εξής: Στους πύργους ελέγχου θα τοποθετηθούν κάμερες οι οποίες λειτουργούν με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες (η φόρτισή τους γίνεται είτε με ηλιακούς συλλέκτες είτε με ανεμογεννήτριες). Κάθε κάμερα μπορεί να καλύπτει περιοχή 6 έως 8 km αλλά, εάν η ορατότητα είναι καλή, μπορεί να ανιχνεύσει την πυρκαγιά και σε απόσταση 20 km.

Οι εικόνες video που λαμβάνονται στέλνονται με μικροκύματα στο κέντρο ελέγχου σε πραγματικό χρόνο. Το κέντρο ελέγχου μπορεί να βρίσκεται σε απόσταση 65 χιλιομέτρων μακριά. Με αυτόματο αλγόριθμο γίνεται η ανάλυση των εικόνων και εάν εντοπιστεί πυρκαγιά σημαίνει συναγερμός.

Το σύστημα FireHawk κοστίζει **85.000€** το κάθε κομμάτι (που περιλαμβάνει έναν επεξεργαστή ο οποίος συνδέεται με 8 κάμερες). Γίνεται σαφές ότι η επιλογή, μέσω του ΓΣΠ, των θέσεων όπου πρέπει να ιδρυθούν πύργοι ελέγχου λαμβάνει ακόμα μεγαλύτερη σημασία καθώς είναι ο μοναδικός τρόπος με τον οποίο θα ιδρυθούν οι λιγότεροι δυνατοί πύργοι (άρα θα τοποθετηθούν οι λιγότερες κάμερες) χωρίς φυσικά να αφήνεται καμμία περιοχή του δάσους ακάλυπτη. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι το σύστημα FireHawk, με 4-5 επεξεργαστές και τις αντίστοιχες κάμερες (32 – 40), κοστίζει **375.000 €** (η εταιρεία όσο αυξάνεται το μέγεθος της παραγγελίας μειώνει την τιμή μονάδας). Ο χρόνος παράδοσης και εκπαίδευσης του προσωπικού στην χρήση του συστήματος είναι περίπου 3 μήνες. Μεγάλος είναι και ο χρόνος που απαιτείται για την κατασκευή των πύργων ελέγχου (περίπου 3 μήνες εάν πρόκειται να κατασκευαστούν 40 πύργοι) ενώ το κόστος κατασκευής τους δεν μπορεί να προβλεφθεί λόγω πολλών αστάθμητων παραγόντων (υλικά κατασκευής, καιρικές συνθήκες, δυνατότητα ταυτόχρονης κατασκευής κ.ά.).

Από τη στιγμή που τοποθετηθεί και ελεγχθεί το σύστημα ανίχνευσης, πάλι με την βοήθεια του ΓΣΠ, επιλέγονται τα σημεία στα οποία θα τοποθετηθούν πυρήνες των μέσων κατάσβεσης ώστε να, κατά την διάρκεια της κρίσης, να μην υπάρχει απώλεια χρόνου. Το είδος των διαθέσιμων μέσων

πυρόσβεσης (αεροπλάνα, πυροσβεστικά οχήματα, πυροσβεστικοί κρουνοί κ.ά) δεν είναι δυνατόν να προβλεφθούν από τώρα αλλά κάτι τέτοιο μπορεί να γίνει μετά από συνενόηση και συνεργασία με τις αρμόδιες αρχές (πυροσβεστική υπηρεσία, δασική υπηρεσία).

Σημαντικό ρόλο στην υλοποίηση του συστήματος, διαδραματίζει η επικοινωνία τόσο του συστήματος ανίχνευσης με το κέντρο ελέγχου (αυτό διασφαλίζεται με την χρησιμοποίηση του FireHawk) όσο και του κέντρου ελέγχου με τις ομάδες κατάσβεσης. Το τελευταίο μπορεί να επιτευχθεί με την χρησιμοποίηση ασυρμάτων μέσω των οποίων θα δίνονται οι κατευθυντήριες γραμμές από τον υπεύθυνο συντονιστή στους επικεφαλείς κάθε ομάδας κατάσβεσης.

### **5.5.3. Στάδιο αποτίμησης της καταστροφής**

Μετά την εκδήλωση μιας πυρκαγιάς και την κατάσβεσή της, γίνεται προμήθεια δορυφορικών εικόνων LandSat ή Spot (ανάλογα με το είδος των αρχικών δεδομένων) έτσι ώστε να γίνει χαρτογράφηση της καμένης έκτασης. Οι εικόνες αυτές θα πρέπει να έχουν ημερομηνία λήψης όσο το δυνατόν πλησιέστερη με την ημέρα κατάσβεσης της πυρκαγιάς επομένως το κόστος προμήθειάς τους αυξάνεται και έτσι μια εικόνα LandSat στοιχίζει **1.400 €** και μια εικόνα Spot **2.150 €**.

Ταυτόχρονα με τη χαρτογράφηση της καμένης έκτασης γίνεται και η αποτίμηση της λειτουργίας του συστήματος και τίθενται οι στόχοι για την συνέχεια. Έτσι, μεταβάλλεται, εάν είναι απαραίτητο το μοντέλο πρόβλεψης της διάδοσης, γίνεται επαναπροσδιορισμός των θέσεων των πύργων ελέγχου (μερικοί μπορεί μετά την πυρκαγιά να έχουν στο οπτικό τους πεδίο μόνο καμένη έκταση οπότε μπορούν οι αντίστοιχες κάμερες να μεταφερθούν αλλού), των μέσων πυρόσβεσης και γενικά γίνεται μια επανάκριση του συστήματος και προγραμματισμός των δράσεων έτσι ώστε στην επόμενη πυρκαγιά, να μην επαναληφθούν τα ίδια λάθη.

## **5.6. Συγκεντρωτικά Στοιχεία**

Η παράγραφος αυτή περιλαμβάνει την διοικητική δομή (οργανόγραμμα) ενός συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών, το κόστος υλοποίησής του (σύμφωνα με τα στοιχεία της προηγούμενης παραγράφου) καθώς επίσης και ένα πιθανό χρονοδιάγραμμα της διαδικασίας υλοποίησης.

### 5.6.1. Οργανόγραμμα

Η αποτελεσματικότητα ενός επιχειρησιακού συστήματος διαχείρισης κρίνεται σε μεγάλο βαθμό όχι μόνο από τη σωστή λειτουργία των διαθέσιμων εργαλείων αλλά και από την σωστή κατανομή αρμοδιοτήτων μεταξύ των μελών της ομάδας διαχείρισης.

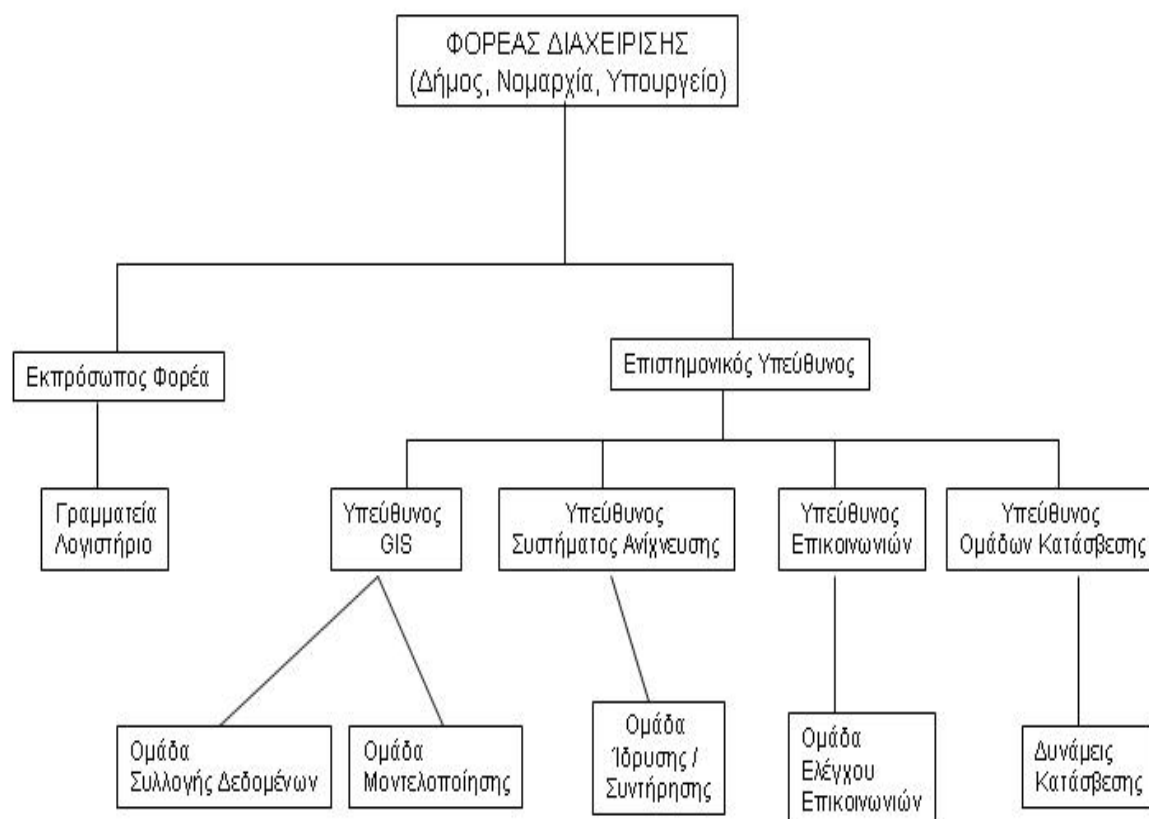
Τα άτομα που θα συμμετέχουν σε ένα τέτοιο σύστημα μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις κυρίως ομάδες: το διοικητικό προσωπικό, το τεχνικό - επιστημονικό προσωπικό και τις δυνάμεις κατάσβεσης. Αρμοδιότητα του διοικητικού προσωπικού είναι η λήψη αποφάσεων, ο συντονισμός των υπολοίπων μελών του συστήματος και ο καθορισμός των στόχων του συστήματος σε τακτά χρονικά διαστήματα. Στη λήψη των αποφάσεων θα πρέπει να μετέχει τουλάχιστον ένας εκπρόσωπος του φορέα διαχείρισης του συστήματος (δήμος, νομαρχία, υπουργείο) ο οποίος θα είναι άλλωστε υπεύθυνος για την χρηματοδότηση του έργου.

Το τεχνικό και επιστημονικό προσωπικό θα είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία και αναβάθμιση των χαρτών επικινδυνότητας, του μοντέλου πρόβλεψης, την ίδρυση και λειτουργία του συστήματος ανίχνευσης, της λειτουργικότητας των συστημάτων επικοινωνίας και γενικά στόχος του θα είναι η συνεχής βελτίωση της λειτουργικότητας και αποτελεσματικότητας του συστήματος.

Τέλος, το προσωπικό των ομάδων κατάσβεσης θα έχει την ευθύνη της όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερης και αμεσότερης κατάσβεσης της πυρκαγιάς, ενώ θα μπορεί να εκφέρει άποψη και να προτείνει μέσα κατάσβεσης ενώ, ο επικεφαλής του, θα συμμετέχει στη διαδικασία απόφασης του σχεδίου διαχείρισης της κρίσης.

Στο Σχήμα 5.1. παρουσιάζεται μια εκδοχή για το πώς πρέπει να είναι δομημένο ένα ολοκληρωμένο επιχειρησιακό σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών. Στο οργανόγραμμα αυτό δεν εμφανίζονται τα διάφορα άτομα που κατά την διάρκεια της υλοποίησης του έργου θα εργασθούν (π.χ. κατά την κατασκευή των πύργων ελέγχου) ή οι διάφοροι εξωτερικού συνεργάτες (π.χ. βοτανολόγοι για την συλλογή δεδομένων καύσιμης ύλης) για αυτό. Στην αρμοδιότητα του υπευθύνου κάθε τμήματος είναι και η επιλογή των εξωτερικών συνεργατών.

Για τον καλύτερο συντονισμό των εργασιών προτείνουμε μια εβδομαδιαία σύσκεψη μεταξύ των υπευθύνων των διάφορων τμημάτων και του επιστημονικού υπευθύνου ενώ σε τακτά χρονικά διαστήματα (π.χ. σε μηνιαία βάση) θα πρέπει να γίνεται ενημέρωση του εκπροσώπου του φορέα διαχείρισης τόσο για την εξέλιξη του έργου όσο και για τον καθορισμό των στόχων του επόμενου μήνα.



Σχήμα 5.1. Οργανόγραμμα συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών.

### 5.6.2 Κοστολόγιο Εργασιών

Στην ενότητα αυτή γίνεται μια εκτίμηση του συνολικού κόστους της υλοποίησης ενός επιχειρησιακού συστήματος δασικών πυρκαγιών. Στον Πίνακα 5.1. παρουσιάζονται οι κυριότερες δαπάνες της διαδικασίας υλοποίησης του συστήματος:

**Πίνακας 5.1.** Κοστολόγιο υλοποίησης συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών.

A/A	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	ΔΑΠΑΝΗ (€)
<b>A.</b>	<b>ΣΤΑΔΙΟ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ</b>	
A.1	Λογισμικό ΓΣΠ (ArcInfo)	30.000
A.2	Λογισμικό επεξεργασίας εικόνas (ERDAS)	15.000
A.3	Αγορά Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους από Spot P (ακρίβεια 20μ)	1.680
A.4	Αγορά εικόνas Spot XS παλαιάς ημερομηνίας λήψης (γεωμετρικά διορθωμένης)	1.200
A.5	Αγορά εικόνas LandSat TM5 παλαιάς ημερομηνίας λήψης (γεωμετρικά διορθωμένης)	1.200
A.6	Κατασκευή Μετεωρολογικού Σταθμού	3.000
<b>B</b>	<b>ΣΤΑΔΙΟ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ</b>	
B.1	Κατασκευή πύργων ελέγχου (40 μεταλλικοί πύργοι)	75.000
B.2.	Αγορά συστήματος FireHawk (5 προγράμματα με 40 κάμερες)	375.000
<b>Γ</b>	<b>ΣΤΑΔΙΟ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ</b>	
Γ.1	Αγορά εικόνas Spot XS ημερομηνίας λήψης μετά την κατάσβεση (γεωμετρικά διορθωμένης)	2.150
Γ.2	Αγορά εικόνas LandSat TM7 ημερομηνίας λήψης μετά την κατάσβεση (γεωμετρικά διορθωμένης)	1.400
	<b>ΣΥΝΟΛΟ:</b>	<b>505.630</b>

Αυτό που γίνεται αμέσως αντιληπτό μελετώντας τον Πίνακα 5.1. είναι πως υπάρχουν πολλοί παράγοντες οι οποίοι δεν έχουν υπολογισθεί σε αυτόν όπως το κόστος της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων από εξωτερικούς συνεργάτες αλλά και η μηνιαία αποζημίωση των ανθρώπων που θα έχουν την ευθύνη υλοποίησης του συστήματος.

Δεν είναι δυνατή μια ρεαλιστική εκτίμηση των ανωτέρω οικονομικών μεγεθών αφού, για παράδειγμα, η ποσότητα των δεδομένων που πρέπει να συλλεχθούν από εξωτερικούς συνεργάτες (π.χ. καύσιμη ύλη – βοτανολόγοι) εξαρτάται από τα διαθέσιμα στοιχεία τα οποία, με τη σειρά τους μεταβάλλονται ανάλογα με την περιοχή μελέτης.



Οι εργασίες, τα οικονομικά μεγέθη των οποίων, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 είναι αυτές που είναι απολύτως απαραίτητες να γίνουν σε κάθε σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών ανεξάρτητα με την περιοχή εφαρμογής.

### 5.6.3 Χρονοδιάγραμμα Εργασιών

Για να θεωρηθεί μια τεχνική έκθεση και η παρουσίαση ενός επιχειρησιακού σχεδίου ολοκληρωμένη, πρέπει να συνοδεύεται από ένα χρονοδιάγραμμα εργασιών, το οποίο θα αναθεωρείται ανά τακτά χρονικά διαστήματα ανάλογα με την πρόοδο των εργασιών.

Στην παρούσα διατριβή επειδή αναφερόμαστε σε σύστημα διαχείρισης δασικών πυρκαγιών και επειδή η χρονική περίοδος υψηλής επικινδυνότητας αρχίζει, παραδοσιακά, το καλοκαίρι κατά τη διάρκεια του χρονικού προγραμματισμού των εργασιών πρέπει το γεγονός αυτό να ληφθεί σοβαρά υπόψη ώστε το σύστημα να είναι έτοιμο για λειτουργία την αμέσως επόμενη κρίσιμη περίοδο.

Από τη στιγμή που παρθεί η απόφαση για την υλοποίηση ενός συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών και σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα γίνεται σαφές πως απαιτείται χρονικό διάστημα 18 με 24 μηνών ώστε το σύστημα να είναι έτοιμο για επιχειρησιακή χρήση. Αυτό σημαίνει πως εάν η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος αρχίσει, για παράδειγμα, στις αρχές του 2004 θα μπορεί να εφαρμοστεί κατά την καλοκαιρινή περίοδο του 2005.

Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το χρονοδιάγραμμα εργασιών υλοποίησης ενός επιχειρησιακού συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών. Παρατηρείται ότι απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα από την κατάθεση της προμελέτης μέχρι την έναρξη των χρηματοδοτήσεων. Η υπόθεση αυτή εργασίας έγινε με γνώμονα τους αργούς ρυθμούς λειτουργίας των μηχανισμών έγκρισης και λήψης αποφάσεων στο Ελληνικό Δημόσιο το οποίο με την μία ή την άλλη του μορφή (Δήμος, Νομαρχία, Υπουργείο) θα είναι ο φορέας διαχείρισης του συστήματος.

Η εμπειρία δείχνει πως η πιστή τήρηση ενός χρονοδιαγράμματος κατά την διάρκεια εκτέλεσης ενός, οποιουδήποτε, έργου εξαρτάται από πλήθος παραγόντων που άλλοτε σχετίζονται άμεσα με το σύστημα και άλλοτε όχι. Έτσι, για παράδειγμα, οι καιρικές συνθήκες διαδραματίζουν μεγάλο ρόλο κατά την φάση της προετοιμασίας (συλλογή δεδομένων, κατασκευή πύργων ελέγχου κ.ά) ενώ και η σωστή δημιουργία του αρχικού χρονοδιαγράμματος είναι βασική και για την δημιουργία του πρέπει να συνεργαστούν διάφοροι άνθρωποι που με την εμπειρία που θα έχει ο καθένας στον τομέα του θα μπορεί να κάνει μια ορθή εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου υλοποίησης της κάθε εργασίας.

Εργασία	ΕΤΟΣ 1		ΕΤΟΣ 2	
	1ο εξάμηνο	2ο εξάμηνο	1ο εξάμηνο	2ο εξάμηνο
Έγκριση Μελέτης Εφαρμογής				
<b>ΣΤΑΔΙΟ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑΣ</b>				
Κατασκευή Κέντρου Ελέγχου				
Προμήθεια Λογισμικών Πακέτων				
Προμήθεια Δορυφορικών Δεδομένων				
Συλλογή Δεδομένων επί τόπου				
Δημιουργία Χάρτη Επικινδυνότητας				
Δημιουργία Μοντέλου Πρόβλεψης				
Ολοκλήρωση Δημιουργίας GIS				
Επιλογή θέσεων / Κατασκευή πύργων ελέγχου				
<b>ΣΤΑΔΙΟ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ</b>				
Εγκατάσταση συστήματος ανίχνευσης				
Επιλογή μέσων πυρόσβεσης				
Δημιουργία συστήματος επικοινωνίας				
<b>ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ</b>				
Δοκιμές				

Σχήμα 5.2. Χρονοδιάγραμμα Εργασιών

## **Κεφάλαιο 6- Συμπεράσματα και Προτάσεις**

### **6.1 Συμπεράσματα**

Στην παρούσα διατριβή παρουσιάστηκε μια ολοκληρωμένη πρόταση αναφορικά με την δημιουργία ενός επιχειρησιακού συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα. Σκοπός της διατριβής ήταν να δώσει μια ρεαλιστική εκτίμηση για το κόστος ανάπτυξης ενός τέτοιου συστήματος σε μια περιοχή μελέτης στην Ελλάδα.

Στην εισαγωγή της παρούσας διατριβής αναδείχθηκε το μέγεθος του προβλήματος των δασικών πυρκαγιών με την παράθεση τόσο στατιστικών στοιχείων όσο και οικονομικών μεγεθών. Ακολούθησε η παρουσίαση των διάφορων τεχνικών που έχουν αναπτυχθεί για την υλοποίηση ενός ολοκληρωμένου επιχειρησιακού συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών ξεκινώντας από το στάδιο της προετοιμασίας και καταλήγοντας στις διαδικασίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν μετά την κατάσβεση μιας δασικής πυρκαγιάς.

Το τελευταίο Κεφάλαιο αποτελεί ουσιαστικά μια τεχνική έκθεση στην οποία αναλύεται η οργανωτική δομή ενός τέτοιου συστήματος (Σχήμα 5.1), παρουσιάζεται το ενδεικτικό κόστος υλοποίησής του (Πίνακας 5.1) ενώ παρατίθεται και χρονοδιάγραμμα εργασιών από το οποίο γίνεται αντιληπτό το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ολοκλήρωση της υλοποίησης (Σχήμα 5.2).

Από τα παραπάνω καταδεικνύεται η αναγκαιότητα δημιουργίας ενός συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών ενώ μετά την παράθεση των οικονομοτεχνικών στοιχείων διαπιστώνεται πως η δαπάνη υλοποίησής του είναι σχετικά μικρή σε σχέση με τα οφέλη που υπάρχουν από την επιτυχή λειτουργία και εφαρμογή του.

## **6.2. Προτάσεις**

Στην περίπτωση που κάποιος φορέας διαχείρισης ενδιαφερθεί για περαιτέρω μελέτη, σε κάποια συγκεκριμένη περιοχή, υπάρχουν πλήθος παραγόντων που δεν έχουν παρουσιαστεί στην διατριβή (κυρίως οικονομικά) καθώς αυτά εξαρτώνται άμεσα από την περιοχή μελέτης. Έτσι, δεν έχει υπολογιστεί επακριβώς η δαπάνη συλλογής δεδομένων επί τόπου από εξωτερικούς συνεργάτες, όπως βέβαια δεν έχει γίνει εκτίμηση της μηνιαίας δαπάνης αποζημίωσης των συμμετεχόντων στο σύστημα (μισθοί, λειτουργικά έξοδα).

Πάντως, η διατριβή αυτή μπορεί να δώσει το έναυσμα για την υλοποίηση ενός συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών στους αρμόδιους φορείς έτσι ώστε να μειωθούν όσο το δυνατόν περισσότερο οι καταστροφικές συνέπειες ύπαρξης του φαινομένου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Μερτίκας Σ (1999), *“Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας”*, Εκδόσεις ‘ΙΩΝ’, Αθήνα.
- Τριπολιτσιώτης Αχ, (1998), *“Μελέτη και αξιολόγηση γεωμετρικών διορθώσεων σε δορυφορικές εικόνες”*, Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης
- Alexander M.D, Stocks B.J, Lawson B.D (1996), *“The Canadian Forest Fire Danger Rating System”*, <http://www.aeronautique.bombardier.com/htmen/C6Q.htm>.
- Anderson, H.E. 1982. *“Aids to determining fuel models for estimating fire behavior”*. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. INT-122. 22 p
- Buongiorno A, Arino O et al, *“ERS-2 monitors exceptional fire event in south-east Asia”*, EOQ No 56-57, December 1997
- Burgan R, Klaver R, Klaver J, (2000), *“Fuel Models and Fire Potential from Satellite and Surface Observations”*, <http://www.fs.fed.us/land/wfas/firepot/fpipap.htm>
- Campell J.B., (1987), *“Introduction to Remote Sensing”*, The Guilford Press, New York.
- CEOS Group (1997), *“Report of the Fire Hazard Team”*, <http://disaster.ceos.org/progress/reports/fire.html>.
- Cheney P, (1992) *“A National Fire Danger Rating System for Australia”*, [http://www.uni-freiburg/fireglobe/iffn/country/au/au\\_4.htm](http://www.uni-freiburg/fireglobe/iffn/country/au/au_4.htm)
- Englefield P, Lee B, Suddary R (2000), *“Spatial Fire Management System”* <http://www.esri.com/library/userconf/proc00/professional/papers/PAP489/p489.htm>.
- Finney M, Sapsis D, Bahro B (1996), *“Use of FARSITE for Simulating Fire Suppression and Analyzing Fuel Treatment Economics”*, [http://frap.cdf.ca.gov/projects/farsite/farsite\\_econ.html](http://frap.cdf.ca.gov/projects/farsite/farsite_econ.html)
- Fogarty L, Pearce G (1995), *“Forest and rural fire research in New Zealand”*, Fire Technology Transfer Notes, N° 6, Oct, 1995.
- Fujioka F, (1996), *“Simulating Fire Spread as Spatial Stochastic Process”*, <http://met.rfl.psw.fs.fed.us/pub/doc/pub.html>.
- GMES Partnership Working Groups, (2001) *“Forest Fires”*
- Goldammer G.J, (1997), *“Report on Early Warning for Fire and Other Environmental Hazards”*, <http://www.idndr.org/docs/early/fire/fire.htm>
- Goldammer J, (1999), *“The Contribution of the Global Fire Monitoring Center (CFMC) for Early Warning and Management of Wildfires”*, <http://www.uni-freiburg/fireglobe/intro/gfmc.htm>
- Goncalves P.P, Diogo P.M. (1994), *“Geographic Information Systems And Cellular Automata: A New Approach to Forest Fire Simulation”*, <http://www.odyssey.maine.edu/ΓΣΠweb/spatdb/εΓΣΠ/eg94080.html>.

Hoffmann A, Schindler L, Goldammer (1999), *“Aspects of a Fire Information System for East Kalimantan, Indonesia”*, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Asian Tropical Forest Management, 1999.

Hussin, Yousif Ali, Sharma, Neeraj (1995), *“Forest Fire Modelling Using Remote Sensing and ΓΣΠ: A Case Study From Northeast India”*, <http://www.metla.fi/conf/iufro95abs/d4pap71.htm>.

Inggs M.R, Lord R.T, *“Applications of satellite imaging Radar”*, <http://rrsg.ee.uct.ac.za/applications/application.html>

Knapp L, Andrews P et al , *“Image navigation for wildland fire location mapping”*, NCGIA Conference on ΓΣΠ and Environmental Modelling, January 21-24, 1996, Santa Fe, New Mexico

Kuntz S, M. Karteris (1993), *“Fire Risk Modelling Based on Satellite Remote Sensing and ΓΣΠ”*, <http://www.kayser-threde.de/ceo/fire/fireart.htm>.

Lobao X, Sempere J et al, (1998), *“AFFIRM. A system for autonomous early and reliable forest fire detectuion”*, III International Conference on forest fire research 14<sup>th</sup> conference on fire and forest meteorology VOL II, pp 1989-2001, Luso, 16/20 November 1998

Marsden-Smedley J, Rudman T, Pyrke A, Catchpole W (1999), *“Buttongrass moorland fire behaviour prediction system”*, Australian Bushfire Conference, Albury, July 1999.

McCarthy M.A, Gill A.M, (1997), *“Fire modelling and Bioversity”*, [http:// life.csu.edu.au/esa/esa97/papers/mccarthy/mccarthy.htm](http://life.csu.edu.au/esa/esa97/papers/mccarthy/mccarthy.htm).

NASA News Archive (2001), *“Remotely piloted aircraft to provide images on internet for firefighters”*, <http://earthobservatory.nasa.gov/newsroom>

Oertel D, Zhukov B et al *“Autonomous spaceborne fire detection”* The Joint fire science conference and workshop.

Oosthuizen J, *“FIREHAWK: Electronic Forest Fire Detection and Management System”*, [http://www.zfps.co.za/Fire\\_hawk\\_detection.htm](http://www.zfps.co.za/Fire_hawk_detection.htm)

Rowell A, Moore P (2000) *“Global Review of Forest Fires”*, [http://www.panda.org/forests4life/fires/report\\_download.cfm?image=img5](http://www.panda.org/forests4life/fires/report_download.cfm?image=img5).

Sabins F.F., (1997), *“Remote Sensing: Principles and Interpretation”*, W.H. Freeman and Company, New York.

Sriboonpong S, Hussin Y.A, Gier A, (2001) *“Assessment of forest recovery after fire using Landsat TM images and ΓΣΠ techniques: A case study of Mae Wong National Park, Tailand”*, <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/017sribii.pdf>

Surdiman Ruandha (1999), *“Land Cover Change and Fire Damage Monitoring using ERS-1/2 SAR multitemporal datasets in East-Kalimantan, Indonesia”*, <http://www.sarvision.com/backgr/paper2.pdf>.

United Nations (2000), *“Implementation of an intergrated, space-based global natural disaster management system”*, Committee on the peaceful uses of outer space.

Weinstein D, Green K, Cambell J, Finney M (1995), *“Fire Growth Modeling in an Integrated ΓΣΠ Environment”*, <http://www.esri.com/library/userconf/proc95/to100/p092.html>.

Xanthopoulos G (2000), *“Fire Situation in Greece”*, IFFN No 23, December 2000 pp76-84.

### Ιστοσελίδες

<http://fire.org/perl/tools.cgi?BEHAVE=detailed>

<http://www.huntana.com/behave/behave.html>

[http://fms.nofc.cfs.nrcan.gc.ca/sfms/docs/info\\_e.html](http://fms.nofc.cfs.nrcan.gc.ca/sfms/docs/info_e.html)

[http://www.panda.org/forests4life/hotspots/fom/forest\\_ofmonth\\_nov99.html](http://www.panda.org/forests4life/hotspots/fom/forest_ofmonth_nov99.html)

[http://www.enn.com/enn-news-archive/1999/07/071399/meditforest\\_4277.asp](http://www.enn.com/enn-news-archive/1999/07/071399/meditforest_4277.asp)

[http://www.time.com/time/reports/environment/heroes/map/0,2967,map\\_forests\\_script,00.html](http://www.time.com/time/reports/environment/heroes/map/0,2967,map_forests_script,00.html)

<http://www.seawfo.noaa.gov/fire/olm/nfdrs.htm>

<http://www.fire.org/perl/tools.cgi>

[http://www-laep.ced.berkeley.edu/classes/radke\\_materials/materials/221-98hi/la221-ay/final/conclusion/Metadata.html#RP5](http://www-laep.ced.berkeley.edu/classes/radke_materials/materials/221-98hi/la221-ay/final/conclusion/Metadata.html#RP5)

<http://fire.org/cgi-bin/nav.cgi?pages=behave&mode=1>

<http://www.ucfpl.ucop.edu/Prefire/chpVIII.htm>

[http://www.icess.ucsb.edu/resac/fuels\\_home.html](http://www.icess.ucsb.edu/resac/fuels_home.html)

<http://www.huntana.com/farsite/farsite.html>

<http://www.nationalpark.ch/ΓΣΠ/projekte/waldbrand.html>

<http://www.cira.colostate.edu/smoke/farsite.htm>

<http://research.esd.ornl.gov/EMBYR/embyr.html>

[http://whyfires.org/018forest\\_fire/model2.html](http://whyfires.org/018forest_fire/model2.html)

<http://gasa.dcea.fct.unl.pt/pedro/fireΓΣΠ/>

[http://www.nps.gov/ΓΣΠ/apps/samo/samo\\_fmo.html](http://www.nps.gov/ΓΣΠ/apps/samo/samo_fmo.html)

[http://www.uni-freiburg.de/fireglobe/se\\_asia\\_projects/eu.html](http://www.uni-freiburg.de/fireglobe/se_asia_projects/eu.html)

[http://www.ruf.uni-freiburg.de/fireglobe/iffn/country/za/za\\_11.htm](http://www.ruf.uni-freiburg.de/fireglobe/iffn/country/za/za_11.htm)

[http://www.ruf.uni-freiburg.de/fireglobe/iffn/country/fi/fi\\_3.htm](http://www.ruf.uni-freiburg.de/fireglobe/iffn/country/fi/fi_3.htm)

<http://www.unescap.org/enrd/space/resap/met/metre98.htm>

<http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/fmrt/FireIndn/EWDSys/ewdsbody.htm>

<http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/viewrecord?2325>

<http://www.iis.gr/asterismos/imag.htm>  
<http://www.gpsinnovations.com/gps/services/daifore.html>  
<http://ss.ffa.affrc.go.jp/labs/fmrt/fireIndn/EWDSys/ewdsbody.htm>  
[http://www.ΓΣΠdevelopment.net/application/natural\\_hazards/fire/nhf0001a.htm](http://www.ΓΣΠdevelopment.net/application/natural_hazards/fire/nhf0001a.htm)  
<http://www.metla.fi/conf/iufro95abs/d4pap71.htm>  
<http://www.vtt.fi/aut/rs/proj/fire>  
[http://www.sai.jrc.it/natural\\_hazards.htm](http://www.sai.jrc.it/natural_hazards.htm)  
<http://www.fao.org/sd/eidirect/Eire0074.htm>  
<http://www.cti.gr/RD3/ΓΣΠ/eirini.html>  
<http://www.nri.org/NRMD/Fireweb/English.html>  
[http://asd-www.larc.nasa.gov/biomass\\_burn/firesat.html](http://asd-www.larc.nasa.gov/biomass_burn/firesat.html)  
<http://www.frw.ruu.nl:80/fg/demon.html>  
[http://henry.pha.jhu.edu/ssip/asat\\_int/volcfire.html](http://henry.pha.jhu.edu/ssip/asat_int/volcfire.html)  
<http://www.iffm.or.id/NOAA.html>  
[http://www.uni-freiburg.de/fireglobe/iffn/tech/tech\\_6.htm](http://www.uni-freiburg.de/fireglobe/iffn/tech/tech_6.htm)  
<http://www.wwf.or.id/forestfires/DOUGMICH.html>  
<http://www.fas.org/spp/guide/india/earth/irs.htm>  
<http://www.ba.dlr.de/NE-WS/ws5/irs-p3.html>  
[http://shark1.esrin.esa.it/ionia/FIRE/BS/ATSR/atsr\\_pd.html](http://shark1.esrin.esa.it/ionia/FIRE/BS/ATSR/atsr_pd.html)  
<http://www.ucfpl.ucop.edu/prefire/chpVIII.htm>  
[http://www.icess.ucsb.edu/resac/fuels\\_home.html](http://www.icess.ucsb.edu/resac/fuels_home.html)  
<http://rfl.psw.fs.fed.us/pub/doc/pub.html>  
[http://www.firewise.org/pubs/fwl/ows\\_05.html](http://www.firewise.org/pubs/fwl/ows_05.html)  
<http://www.unescap.org/enrd/space/resap/met/metrep98.htm>  
<http://www.idndr.org/docs/early/fire/fire.html>  
<http://www.tno.nl/instit/fel/div4/awis2.html>