



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΠΥΡΟ-ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΚΑΙ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ**

**ΗΛΙΟΠΟΥΛΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ
ΦΥΣΙΚΟΣ-ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΟΣ**

**ΜΥΤΙΛΗΝΗ
ΜΑΡΤΙΟΣ 2013**

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ευκαιρία της ολοκλήρωσης της Διδακτορικής μου Διατριβής και της Έρευνας για την Πυρο – μετεωρολογία, τις Πυρκαγιές και την Κλιματική Αλλαγή στην Ελλάδα θα ήθελα να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους που με βοήθησαν στα διάφορα στάδια ανάπτυξης της διατριβής μου.

Πρώτα θα ήθελα να εκφράσω τη χαρά μου που γνώρισα τον άνθρωπο, το δάσκαλο, τον επιστήμονα και επιβλέποντα Αν. Καθηγητή της διδακτορικής μου διατριβής κύριο Κώστα Καλαμποκίδη. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω από καρδιάς γιατί με στήριξε πολύπλευρα και με ιδιαίτερη ευαισθησία. Οι συμβουλές του, οι διορθώσεις και οι παραινέσεις του ήταν πολύ χρήσιμες για την πρόοδο και για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Επίσης θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την ευκαιρία που μου έδωσε να βοηθήσω στην προσπάθεια της εμβάθυνσης της γνώσης στο αντικείμενο της μετεωρολογίας της δασικής πυρκαγιάς, στο βιβλίο με τίτλο «ΠΥΡΟ-ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΚΛΙΜΑ».

Οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερος τον Καθηγητή Γεώργιο Κάλλο για τη συμμετοχή του στην τριμελή και επταμελή επιτροπή, την υποστήριξη και τις σημαντικές παρατηρήσεις και υποδείξεις του, καθοριστικές για την ποιοτική αναβάθμιση της παρουσίασης της διατριβής. Στον Τομέα Φυσικής Περιβάλλοντος και Μετεωρολογίας, το Εργαστήριο Αριθμητικών Μοντέλων, το οποίο διευθύνει, αποτέλεσε την αφετηρία της ερευνητικής μου πορείας και με την ευκαιρία, ευχαριστώ θερμά και τους τότε συνεργάτες-συνοδοιπόρους-ερευνητές για την εποικοδομητική συνεργασία.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή Χαράλαμπο Φείδα για τη συμμετοχή του στην τριμελή και επταμελή επιτροπή, την υποστήριξη και τις πολύτιμες επισημάνσεις του, οι οποίες έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση της διδακτορικής μου διατριβής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τόσο τα μέλη της τριμελούς όσο και της επταμελούς επιτροπής που με τίμησαν με τη συμμετοχή και συμβολή τους, με υποστήριξαν και έδειξαν ενδιαφέρον και εμπιστοσύνη στην προσπάθειά μου αυτή.

Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δασοπόνο, Αξιωματικό του Π.Σ. και Υποψήφιο Διδάκτορα Αλέξανδρο Μαλούνη για την υπερπολίτιμη βοήθειά του στο κομμάτι των

Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, η οποία ήταν καθοριστική για την ολοκλήρωση της Διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την σύζυγό μου Γαρυφαλλιά Κοτοπούλη για τη φιλολογική επιμέλεια της διατριβής, την υπομονή και τη βοήθειά της και για τις ώρες που της στέρησα για την συγγραφή της διδακτορικής μου διατριβής.

Νικόλαος Χ. Ηλιόπουλος
Μάρτιος 2013

Αφιερωμένο στους γονείς μου

Χρήστο και Βασιλική

**καθώς και
στη συνοδοιπόρο της ζωής μου**

Γαρυφαλλιά

**“Οι ευφυείς άνθρωποι λύνουν τα προβλήματα. Οι μεγαλοφυείς τα προβλέπουν”
-Albert Einstein**

Η έγκριση διδακτορικής διατριβής από το Τμήμα Γεωγραφίας του Πανεπιστημίου Αιγαίου, δεν υποδηλώνει την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, άρθρο 202 παράγραφος 2)

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	ii
ΑΦΙΕΡΩΣΗ.....	iv
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ.....	v
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	ix
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xi
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	xvi
ABSTRACT.....	xviii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 ΤΟ ΚΙΝΗΤΡΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	1
1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ.....	3
1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΥΡΟ-ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ.....	7
2.1 ΑΝΕΜΟΣ.....	7
2.1.1 Άνεμοι Θερμού και Ψυχρού Μετώπου.....	8
2.1.2 Επικλινείς Άνεμοι.....	9
2.1.3 Άνεμοι Foehn (ΦΕΝ).....	10
2.1.4 Ημερήσιοι Άνεμοι.....	10
2.1.5 Ετησίες (Μελέμια).....	11
2.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ – ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ.....	11
2.3 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ.....	14
2.4 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΑΣΙΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ.....	18
3.1 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ.....	18
3.2 ΦΥΤΙΚΗ ΚΑΥΣΙΜΗ ΥΛΗ.....	19
3.3 ΚΑΥΣΗ.....	20
3.3.1 Ανατομία Πυρκαγιάς.....	21
3.4 ΠΥΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ.....	22
3.4.1 Θερμική Ένταση και Εξάπλωση Πυρκαγιάς.....	22
3.4.2 Διάγραμμα Χαρακτηριστικών Πυρκαγιάς.....	24
3.4.3 Κατηγορίες Πυρκαγιών.....	26

3.4.4	Ακραία και Επικίνδυνη Συμπεριφορά Πυρκαγιάς.....	29
3.5	ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....		32
4.1	ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ.....	32
4.2	ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	34
4.3	ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΛ ΝΙΝΙΟ (EL NINO).....	35
4.3.1	Φυσιολογικές Συνθήκες.....	35
4.3.2	Συνθήκες Ελ Νίνιο.....	36
4.4	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	37
4.5	ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ.....		41
5.1	ΑΝΕΜΟΙ.....	42
5.1.1	Γενικοί και Τοπικοί Άνεμοι.....	42
5.1.2	Άνεμοι Ιδιαίτερης Σημασίας για τους Πυροσβέστες.....	43
5.1.2.1	<i>Καθοδικά Ρεύματα Καταιγίδων (Thunderstorm Downdrafts)</i>	43
5.1.2.2	<i>Στροβιλώδεις Άνεμοι (Whirlwinds)</i>	44
5.1.3	Σχέση Μεταξύ Γενικών, Τοπικών, Επιφανειακών και Μέσης-Φλόγας Ανέμων.....	45
5.1.3.1	<i>Συνδυάζοντας Γενικούς και Τοπικούς Ανέμους</i>	45
5.1.3.2	<i>Άνεμος στο Μέσο Ύψος της Φλόγας (Mid-flame Wind)</i>	45
5.2	ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ.....	46
5.2.1	Ευσταθείς και Ασταθείς Ατμοσφαιρικές Συνθήκες και η Σημασία τους στη Συμπεριφορά των Πυρκαγιών.....	46
5.2.1.1	<i>Θερμοβαθμίδες (Lapse Rates)</i>	46
5.2.1.2	<i>Συνθήκες Ευστάθειας και Αστάθειας της Ατμόσφαιρας</i>	47
5.2.1.3	<i>Η Επιρροή του Ασταθούς Αέρα στη Συμπεριφορά της Πυρκαγιάς</i>	48
5.2.2	Οι Τρεις Τύποι Αναστροφών και οι Επιδράσεις τους στη Συμπεριφορά των Δασικών Πυρκαγιών.....	48
5.2.3	Θερμική Ζώνη και η Σημασία της στη Συμπεριφορά των Πυρκαγιών.....	49
5.2.3.1	<i>Πώς Επηρεάζει η Θερμική Ζώνη τη Συμπεριφορά της Πυρκαγιάς</i>	50
5.3	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΗΣ ΎΛΗΣ.....	50
5.3.1	Τα Επτά (7) Χαρακτηριστικά της Καύσιμης Ύλης που Επηρεάζουν τη Συμπεριφορά της Δασικής Πυρκαγιάς.....	50
5.3.2	Ποσότητα ή Φορτίο Καύσιμης Ύλης ανά Τάξη Μεγέθους.....	51
5.3.3	Το Μέγεθος και το Σχήμα της Καύσιμης Ύλης.....	52
5.3.4	Η Συμπαγότητα της Καύσιμης Ύλης (Compactness) και Βάθος ή Ύψος Στρώματος Καύσιμης Ύλης – Προσανατολισμός.....	52
5.3.5	Οριζόντια συνέχεια – Κατακόρυφη Διάταξη και Σύσταση.....	53
5.4	ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΙΜΗΣ ΎΛΗΣ.....	54
5.4.1	Τα Πέντε Στάδια Φυτικής Ανάπτυξης της Ζωντανής Καύσιμης Ύλης σε Αντιστοιχία με τις Περιεχόμενες Υγρασίες τους.....	55

5.4.2 Σχέση Σχετικής Υγρασίας- Ανέμου και Περιεχόμενης Υγρασίας Λεπτής και Χονδρής (Μεγάλης) Καύσιμης Ύλης.....	56
5.4.2.1 Ανταλλαγή Υγρασίας Μεταξύ Καύσιμης Ύλης και Ατμόσφαιρας.....	56
5.4.2.2 Περιεχόμενη Υγρασία Ισορροπίας ή Ισοζυγίου (ΠΥΙ).....	56
5.4.2.3 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες που Επηρεάζουν την Υγρασία της Καύσιμης Ύλης.....	57
5.4.3 Επίδραση των Κατακρημνίσεων και της Εδαφικής Υγρασίας στην Περιεχόμενη Υγρασία των Καυσίμων.....	58
5.4.4 Η Έννοια και η Σημασία της Χρονικής Υστέρησης για την Υγρασία της Καύσιμης Ύλης και τους Πυροσβέστες.....	59
5.4.5 Υγρασία Σβησίματος (Moisture of Extinction).....	61
5.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΙΜΗΣ ΎΛΗΣ.....	61
5.5.1 Επίδραση της Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας και Νυχτερινή Απώλεια από διάφορες Επιφάνειες.....	61
5.5.1.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν τις Θερμοκρασίες στην Επιφάνεια.....	61
5.5.1.2 Πώς οι Ιδιότητες της Επιφάνειας Επηρεάζουν τις Επιφανειακές Θερμοκρασίες.....	62
5.5.1.3 Απώλεια Θερμότητας τη Νύχτα.....	63
5.5.2 Τυπικές Ημερήσιες Αλλαγές στη Θερμοκρασία.....	63
5.5.3 Επίδρασεις του Ανάγλυφου, της Βλάστησης, του Ανέμου και των Νεφών στη Θερμοκρασία.....	64
5.5.3.1 Ανάγλυφο.....	64
5.5.3.2 Βλάστηση.....	64
5.5.3.3 Άνεμος.....	65
5.5.3.4 Σύννεφα.....	65
5.6 ΑΝΑΓΛΥΦΟ.....	65
5.6.1 Η Επίδραση της Τοπογραφίας στην Καύσιμη Ύλη και στην Καύση της.....	65
5.6.1.1 Υψόμετρο Πάνω από το Επίπεδο της Θάλασσας.....	65
5.6.1.2 Θέση της Πλαγιάς- Έκθεση.....	66
5.6.2 Επίδραση της Τοπογραφίας στη Διεύθυνση και στην Ταχύτητα Εξάπλωσης των Δασικών Πυρκαγιών.....	66
5.6.3 Πώς οι Αλλαγές στην Καύσιμη Ύλη και την Τοπογραφία Εμποδίζουν Ολικά ή Μερικά την Εξάπλωση μιας Πυρκαγιάς.....	67
5.6.4 Το “Φαινόμενο της Καμινάδας” στην Τοπογραφία Φαραγγιού.....	68
5.7 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ.....	68
5.7.1 Προβληματική Συμπεριφορά Πυρκαγιάς.....	68
5.7.2 Δείκτες Συμπεριφοράς της Πυρκαγιάς.....	69

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ.....70

6.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	70
6.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ.....	72
6.2.1 Κλιματικές Συνθήκες – Βλάστηση – Ιστορική Αναδρομή Πυρκαγιών.....	72
6.2.2 Μετεωρολογικό Μοντέλο RAMS.....	77

6.2.2.1 Παράμετροι για την εφαρμογή του Μέσης Κλίμακας Μοντέλου RAMS.....	78
6.2.3 Μοντέλο Πυρκαγιάς FARSITE (Fire Area Simulator).....	81
6.2.3.1 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης Περιοχής Μελέτης.....	91
6.2.4 Κλιματικό Μοντέλο MAGICC-SCENGEN.....	94
6.2.4.1 Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change (MAGICC).....	95
6.2.4.2 SCENario GENerator (SCENGEN).....	95

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....97

7.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ RAMS.....	97
7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MAGICC-SCENGEN.....	108
7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ FARSITE.....	115
7.3.1 Προσομοίωση Πυρκαγιών με τη Βλάστηση του 1991.....	115
7.3.2 Προσομοίωση Πυρκαγιών στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα Σύμφωνα με τα 2,7,8 και 10 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης – Τεστ 1.....	122
7.3.3 Προσομοίωση Πυρκαγιών στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα Σύμφωνα με τα 8, 122, 161 και 164 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης – Τεστ 2.....	126
7.3.4 Προσομοίωση Πυρκαγιών στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα Σύμφωνα με τα 2, 7, 8, και 10 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης – Τεστ Corine.....	129
7.3.5 Προσομοίωση Πυρκαγιών στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα Σύμφωνα με τις Κλιματικές Τάσεις των Αποτελεσμάτων του Κλιματικού Μοντέλου MAGICC-SCENGEN.....	136
7.3.6 Προσομοιώσεις (4 ωρών) των Πυρκαγιών στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα Σύμφωνα με Πιθανές Μεταβολές της Βλάστησης, των Μετεωρολογικών Παραγόντων και της Τοπογραφίας.....	145

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....172

8.1 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ....	172
8.2 ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ.....	178
8.3 ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΗΣ ΓΝΩΣΗΣ.....	179
8.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ.....	180

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....182

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Χωροχρονικές κλίμακες των ατμοσφαιρικών διαδικασιών	16
Πίνακας 3.1: Αντιστοίχιση των τιμών του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες καταστολής μιας πυρκαγιάς.....	25
Πίνακας 5.1: Συντελεστές προσαρμογής της ταχύτητας επιφανειακού ανέμου στο μέσο ύψος φλόγας, ανάλογα με την κάλυψη και τα 13 πρότυπα μοντέλα καύσιμης ύλης.....	46
Πίνακας 5.2: Τα πέντε (5) στάδια φυτικής ανάπτυξης της ζωντανής καύσιμης ύλης σε αντιστοίχιση με τις περιεχόμενες υγρασίες τους.....	55
Πίνακας 6.1: Αντιστοίχιση της βλάστησης του ορθοφωτοχάρτη των χρήσεων γης του 1991 με τα μοντέλα καύσιμης ύλης.....	86
Πίνακας 6.2: Αντιστοίχιση κάλυψης φυλλοστρώματος μεταξύ ορθοφωτοχαρτών διακριτικής ικανότητας 1:20000 και FARSITE.....	87
Πίνακας 6.3: Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE.....	91
Πίνακας 6.4: Τα μοντέλα καύσιμης ύλης που αναπτύχθηκαν για το σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς BEHAVE και η προσαρμογή τους στις συνθήκες της ελληνικής βλάστησης.....	93
Πίνακας 6.5: Η αντιστοίχιση των μοντέλων καύσιμης ύλης που χρησιμοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης με τις συνθήκες της Ελληνικής βλάστησης.....	93
Πίνακας 6.6: Αντιστοίχιση των τύπων χρήσεων γης του CORINE με τα μοντέλα καύσιμης ύλης του BEHAVE.....	94
Πίνακας 7.1: Οι υγρασίες (%) της νεκρής καύσιμης ύλης (1h, 10h, 100h), της ζωντανής ποώδους (LH) και της ζωντανής ξυλώδους (LW) για κάθε ένα από τα μοντέλα καύσιμης ύλης της περιοχής ενδιαφέροντος.....	116
Πίνακας 7.2: Τα αρχείο καιρού από τις 26-30 Ιουλίου του 2005 όπου παρουσιάζονται ο μήνας, η ημέρα, η βροχόπτωση (mm), η τοπική ώρα της ελάχιστης θερμοκρασίας, η τοπική ώρα της μέγιστης θερμοκρασίας, η ελάχιστη θερμοκρασία (Φαρενάιτ), η μέγιστη θερμοκρασία (Φαρενάιτ), η μέγιστη σχετική υγρασία (%), η ελάχιστη σχετική υγρασία και το υψόμετρο (ft). Τα μετεωρολογικά στοιχεία προέρχονται από τον Μετεωρολογικό Σταθμό του Ελ. Βενιζέλου και είναι στις μονάδες που απαιτούνται για την εισαγωγή τους στο FARSITE.....	116
Πίνακας 7.3: Τα αρχείο ανέμου όπου παρουσιάζονται ο μήνας, η ημέρα, η τοπική ώρα, η Ταχύτητα του ανέμου (km/h), η διεύθυνση του ανέμου (μοίρες) και η νεφοκάλυψη (%) από τον Μετεωρολογικό Σταθμό του Ελ. Βενιζέλου.....	117
Πίνακας 7.4: Αντιστοίχιση βλάστησης της περιοχής μελέτης με μοντέλα καύσιμης ύλης –Τεστ 1.....	122
Πίνακας 7.5: Αντιστοίχιση βλάστησης της περιοχής μελέτης με μοντέλα καύσιμης ύλης –Τεστ 2.....	127
Πίνακας 7.6: Αντιστοίχιση βλάστησης της περιοχής μελέτης με μοντέλα καύσιμης ύλης –Τεστ CORINE.....	130

Πίνακας 7.7: Υπολογισμός του στατιστικού δείκτη Sorensen για τα Τεστ 1,2 και Corine για την πυρκαγιά στη Ραφήνα.....	135
Πίνακας 7.8: Υπολογισμός του στατιστικού δείκτη Sorensen για τα Τεστ 1,2 και Corine για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά.....	136
Πίνακας 8.1: Δημοσιευμένες εργασίες που αποτελούν τμήματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής	180

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Μεταβολές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας με το χρόνο.....	12
Σχήμα 2.2: Η σχετική υγρασία του αέρα είναι μικρότερη στις νότιες εκθέσεις σε σχέση με τις βόρειες, ενώ σε μεγάλα υψόμετρα δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα λόγω της καλής μίξης.....	12
Σχήμα 3.1: Η ανατομία μιας δασικής πυρκαγιάς.....	22
Σχήμα 3.2: Μεταβολή της ταχύτητας εξάπλωσης ανάλογα με την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας -- κατηγορίες ανάλογα με τις ενέργειες καταστολής του Πίνακα 3.1.....	26
Σχήμα 3.3: Οι τρεις βασικοί τύποι συμπεριφοράς πυρκαγιών: υπόγεια ή πυρκαγιά εδάφους, έρπουσα ή πυρκαγιά επιφανείας και επικόρυφη ή πυρκαγιά κόμης.....	28
Σχήμα 4.1: Φυσιολογικό Πρότυπο του Ειρηνικού.....	36
Σχήμα 4.2: Συνθήκες El Nino.....	37
Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης που επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας Πυρκαγιάς.....	51
Σχήμα 6.1: α) Περιοχή της Αττικής – Νέος Βουτζάς και Ραφήνα β) Ελλάδα και η περιοχή της Αττικής στο τετράγωνο.....	70
Σχήμα 6.2: Μετεωρολογικό ιστορικό της 28 Ιουλίου 2005 από τον μετεωρολογικό σταθμό του Ελ. Βενιζέλου.....	74
Σχήμα 6.3: Οριογραμμή καμμένων περιοχών και σημεία ενδιαφέροντος με αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:40000 από την Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, των πυρκαγιών στο Νέου Βουτζά και στη Ραφήνα στις 28 Ιουλίου του 2005.....	75
Σχήμα 6.4: Η καμένη έκταση της πυρκαγιάς της Ραφήνας. Φαίνεται ο οικισμός της Αγίας Τριάδας και στο βάθος η Καλλιτεχνούπολη.....	76
Σχήμα 6.5: Η καμένη έκταση στον οικισμό του Νέου Βουτζά και η κατεύθυνση του ανέμου.....	76
Σχήμα 6.6: Σχηματική παρουσίαση των τεσσάρων πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές προσομοιώσεις- Από το μεγαλύτερο πλέγμα προς το μικρότερο με χρωματισμούς μαύρο, πορτοκαλί, θαλασσί και κίτρινο αντίστοιχα.....	80
Σχήμα 6.7: Απεικόνιση της αρχής του Huygens χρησιμοποιώντας μικρά ελλειπτικά κύματα: (α) σε σταθερές συνθήκες τα μικρά κύματα σταθερού μήκους και μεγέθους διατηρούν το ελλειπτικό σχήμα της φωτιάς στο χρόνο, (β) σε μεταβαλλόμενες συνθήκες το μικρό κύμα εξαρτάται από το μοντέλο καύσιμης ύλης και το διάνυσμα του ανέμου - υπάρχει διαφοροποίηση του ελλειπτικού σχήματος.....	81
Σχήμα 6.8: Χωρικά δεδομένα που απαιτούνται για προσομοίωση στο FARSITE.....	82
Σχήμα 6.9: Η περιοχή ενδιαφέροντος σε σχέση με τα φύλλα χάρτου 1:50.000 της ΓΥΣ.....	84
Σχήμα 6.10: Υψομετρική πληροφορία της περιοχής μελέτης από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους μεγέθους pixel 25x25 m με χρήση του Manifold System GIS.....	85
Σχήμα 6.11: Πληροφορία έκθεσης της περιοχής μελέτης από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους μεγέθους pixel 25x25 m με χρήση του Manifold System GIS.....	85
Σχήμα 6.12: Πληροφορία κλίσης της περιοχής μελέτης από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους μεγέθους pixel 25x25 m με χρήση του Manifold System GIS.....	86
Σχήμα 6.13: Λεπτομέρεια της εικόνας Quickbird του 2004 στην οποία βασίστηκε η φωτοερμηνεία.....	87
Σχήμα 6.14: Περιοχή μελέτης και Δείκτης NDVI>0.2. Οι πράσινες, οι κίτρινες και οι κόκκινες τιμές καταδεικνύουν περιοχές με βλάστηση και έντονη κλίση με έκθεση Α-Δ, Β-ΒΔ και Β-ΒΑ αντίστοιχα, ενώ οι μπλε καταδεικνύουν περιοχές με βλάστηση και ήπια κλίση.....	89
Σχήμα 6.15: Πολύγωνα χωρικού διαχωρισμού μοντέλων καύσιμης ύλης και πίνακας περιγραφής.....	89
Σχήμα 7.1: Χάρτες επιφανείας για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου όπου παρουσιάζεται ισχυρή βαροβαθμίδα μεγέθους 15 hPa από τις 26 έως τις 29 Ιουλίου 2005. Τα BRISCA και ANNETTE είναι ονόματα των συστημάτων που δίνονται από το Μετεωρολογικό Κέντρο του Βερολίνου όταν αυτά περνούν τον Ατλαντικό Ωκεανό.....	100
Σχήμα 7.2: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 27 Ιουλίου 2005.....	101
Σχήμα 7.3: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 27 Ιουλίου 2005.....	101
Σχήμα 7.4: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 07:00 UTC 28 Ιουλίου 2005.....	102

Σχήμα 7.5: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 07:00 UTC 28 Ιουλίου 2005.....	102
Σχήμα 7.6: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 10:00 UTC 28 Ιουλίου 2005.....	103
Σχήμα 7.7: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 10:00 UTC 28 Ιουλίου 2005.....	103
Σχήμα 7.8: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 28 Ιουλίου 2005.....	104
Σχήμα 7.9: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 28 Ιουλίου 2005.....	104
Σχήμα 7.10: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 18:00 UTC 28 Ιουλίου 2005.....	105
Σχήμα 7.11: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 18:00 UTC 28 Ιουλίου 2005.....	105
Σχήμα 7.12: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 00:00 UTC 29 Ιουλίου 2005.....	106
Σχήμα 7.13: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 00:00 UTC 29 Ιουλίου 2005.....	106
Σχήμα 7.14: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 29 Ιουλίου 2005.....	107
Σχήμα 7.15: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 29 Ιουλίου 2005.....	107
Σχήμα 7.16: Κλιματικό σενάριο IS92A που αφορά στις αναμενόμενες αυξήσεις των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά τα επόμενα 100 χρόνια. Από αριστερά προς τα δεξιά εμφανίζονται ο άνθρακας (C) που προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα και από τις χρήσεις γης, το μεθάνιο (CH ₄), το μονοξείδιο του αζώτου (N ₂ O), και το διοξείδιο του θείου (SO ₂) στη βόρεια Αμερική και Ευρώπη, στην Ασία και στον υπόλοιπο κόσμο.....	110
Σχήμα 7.17: Κλιματικό σενάριο IS92C που αφορά στις αναμενόμενες αυξήσεις των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά τα επόμενα 100 χρόνια. Από αριστερά προς τα δεξιά εμφανίζονται ο άνθρακας (C) που προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα και από τις χρήσεις γης, το μεθάνιο (CH ₄), το μονοξείδιο του αζώτου (N ₂ O), και το διοξείδιο του θείου (SO ₂) στη βόρεια Αμερική και Ευρώπη, στην Ασία και στον υπόλοιπο κόσμο.....	110
Σχήμα 7.18: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας της θερινής περιόδου, που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92A με μέση ευαισθησία κλίματος.....	111
Σχήμα 7.19: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας της θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92A με υψηλή ευαισθησία κλίματος.....	111
Σχήμα 7.20: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας της θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92A με μέση ευαισθησία κλίματος.....	112
Σχήμα 7.21: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας της θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92C με μέση ευαισθησία κλίματος.....	112
Σχήμα 7.22: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής του μέσου ανέμου θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92A με μέση ευαισθησία κλίματος.....	113
Σχήμα 7.23: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής του μέσου ανέμου θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92C με μέση ευαισθησία κλίματος.....	113

Σχήμα 7.24: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης βροχόπτωσης θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92A με μέση ευαισθησία κλίματος.....	114
Σχήμα 7.25: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης βροχόπτωσης θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92C με μέση ευαισθησία κλίματος.....	114
Σχήμα 7.26: Το αρχείο περιγραφής τοπίου της περιοχής ενδιαφέροντος με τη βλάστηση του 1991.....	115
Σχήμα 7.27: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς της Ραφήνας με τη βλάστηση του 1991 και ο πίνακας καμένης έκτασης (εκτάρια) / οριογραμμή πραγματικής καμένης έκτασης (μαύρη γραμμή) και σημεία έναρξης πυρκαγιών (κόκκινα σημεία).....	119
Σχήμα 7.28: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς της Ραφήνας με τη βλάστηση του 1991 και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m ²).....	120
Σχήμα 7.29: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς του Νέου Βουτζά με τη βλάστηση του 1991 και καμένη έκταση (ha), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m ²).....	121
Σχήμα 7.30: Μοντέλα καύσιμης ύλης περιοχής μελέτης (αποχρώσεις του πράσινου), σημεία έναρξης πυρκαγιών (κόκκινα σημεία) και πραγματικές καμένες εκτάσεις (μαύρη γραμμή) για το Τεστ 1. Τα επιπλέον κόκκινα σημεία εκτός των καμένων περιοχών είναι τοποθεσίες που εντοπίστηκαν εμπνηστικοί μηχανισμοί αλλά δεν υπήρξε πυρκαγιά.....	124
Σχήμα 7.31α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για το Τεστ 1.....	125
Σχήμα 7.31β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά για το Τεστ 1.....	125
Σχήμα 7.32α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για το Τεστ 1.....	126
Σχήμα 7.32β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στη Ραφήνα για το Τεστ 1.....	126
Σχήμα 7.33: Μοντέλα καύσιμης ύλης περιοχής μελέτης (πράσινη απόχρωση), σημεία έναρξης πυρκαγιών(κόκκινα σημεία) και πραγματικές καμένες εκτάσεις (μαύρη γραμμή) για το Τεστ 2.....	127
Σχήμα 7.34α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για το Τεστ 2.....	128
Σχήμα 7.34β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά για το Τεστ 2.....	128
Σχήμα 7.35α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για το Τεστ 2.....	129
Σχήμα 7.35β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στη Ραφήνα για το Τεστ 2.....	129
Σχήμα 7.36: Μοντέλα καύσιμης ύλης περιοχής μελέτης (αποχρώσεις του πράσινου), σημεία έναρξης πυρκαγιών (κόκκινα σημεία) και πραγματικές καμένες εκτάσεις (μαύρη γραμμή) για το Τεστ CORINE.....	131
Σχήμα 7.37α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για το Τεστ CORINE.....	132
Σχήμα 7.37β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά για το Τεστ CORINE.....	132
Σχήμα 7.38α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για το Τεστ CORINE.....	133
Σχήμα 7.38β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στη Ραφήνα για το Τεστ CORINE.....	133
Σχήμα 7.39: Πραγματικές (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένες ανά ώρα (κόκκινη γραμμή) οριογραμμές καμένων εκτάσεων για τα Τεστ 1, Τεστ 2 και Τεστ CORINE για την πυρκαγιά στη Ραφήνα.....	134
Σχήμα 7.40: Πραγματικές (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένες ανά ώρα (κόκκινη γραμμή) οριογραμμές καμένων εκτάσεων για τα Τεστ 1, Τεστ 2 και Τεστ CORINE για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά.....	134
Σχήμα 7.41: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούσαν στις 28 Ιουλίου του 2005 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m ²).....	139
Σχήμα 7.42: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση των κλιματικών τάσεων του σεναρίου IS92C - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m ²).....	140
Σχήμα 7.43: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση των κλιματικών τάσεων του σεναρίου IS92A - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m ²).....	141

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για πολλά χρόνια, οι δασικές πυρκαγιές είναι ένα πολύ κοινό φαινόμενο στα μεσογειακά κλίματα. Οι αλλαγές της χρήσης γης έχουν αυξήσει τη συχνότητα των καταστροφικών πυρκαγιών. Στην Ελλάδα, η περιοχή της Αττικής, είναι μια από τις περιοχές που επηρεάζονται από αυτή την αύξηση στη συχνότητα των πυρκαγιών. Η γνώση της κατάστασης που επικρατεί όσον αφορά τις καιρικές συνθήκες ανέμου, θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας αέρα είναι κρίσιμη για να περιγραφεί η μετεωρολογία της δασικής πυρκαγιάς (Πυρο-μετεωρολογία). Σε αυτή την εργασία, ένα μέσης κλίμακας αριθμητικό μετεωρολογικό μοντέλο, το RAMS χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της ροής του ανέμου και της θερμοκρασίας σε μια πραγματική κατάσταση δύο πυρκαγιών στην περιοχή της Αττικής, στη Ραφήνα και στο Νέο Βουτζά, στις 28 Ιουλίου του 2005. Σε αυτή τη μελέτη χρησιμοποιούμε έναν από τους πιο γνωστούς προσομοιωτές εξάπλωσης πυρκαγιάς, το FARSITE (Fire Area Simulator) για την περιγραφή της συμπεριφοράς της δασικής πυρκαγιάς, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της καύσιμης ύλης, του εδάφους και των καιρικών συνθηκών. Η χρήση του FARSITE σε περιοχές διαφορετικές από εκείνες στις οποίες αναπτύχθηκε ο προσομοιωτής εξάπλωσης πυρκαγιάς αρχικά, απαιτεί το κατάλληλο μοντέλο καυσίμων για τη συγκεκριμένη περιοχή, για να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα μεσογειακά οικοσυστήματα, όπου οι κοινότητες των φυτών χαρακτηρίζονται από μεγάλη ανομοιογένεια και πολυπλοκότητα. Για τον έλεγχο της ακρίβειας των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ο μη συμμετρικός στατιστικός δείκτης Sørensen (SC), ο οποίος μετράει την ομοιότητα μεταξύ της πραγματικής και προσομοιωμένης καμένης έκτασης. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αξιολογήθηκε και επιβεβαιώθηκε ότι η σωστή χρήση των μετεωρολογικών δεδομένων και των κατάλληλων μοντέλων καύσιμης ύλης είναι πολύ σημαντικά για τη λήψη αξιόπιστων προσομοιώσεων για τις καταστροφικές πυρκαγιές που συμβαίνουν στη μεσογειακή βλάστηση κατά την περίοδο των πυρκαγιών του καλοκαιριού.

Για τη διερεύνηση της επίδρασης μιας πιθανής κλιματικής αλλαγής στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα, χρησιμοποιήθηκε το κλιματικό μοντέλο MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change) και η βάση δεδομένων SCENGEN (SCENario GENerator). Έγινε αλλαγή στις διάφορες παραμέτρους του μοντέλου όπως στην ευαισθησία του κλίματος, στο κλιματικό σενάριο, στη χρονική περίοδο ενδιαφέροντος και στα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (GCM) -που αποτελούν τη βάση δεδομένων SCENGEN- και εξήχθησαν πληροφορίες που αφορούν τις κλιματικές τάσεις της βροχόπτωσης, του ανέμου, της μέσης και της μέγιστης θερμοκρασίας στους θερμούς μήνες, δηλαδή των σημαντικότερων μετεωρολογικών παραγόντων που επηρεάζουν τη δημιουργία και την εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών στη χώρα μας. Όμως, τα ως τώρα

αποτελέσματα των ερευνών για την πρόγνωση των κλιματικών αλλαγών κάθε άλλο παρά μονοσήμαντα, κατηγορηματικά και σαφή είναι. Για αυτό το λόγο δημιουργήθηκαν σενάρια όπου οι μεταβολές των μετεωρολογικών και μη μετεωρολογικών παραμέτρων, εισάγονται στον προσομοιωτή εξάπλωσης πυρκαγιάς FARSITE, όχι μόνο σύμφωνα με τα αποτελέσματα του MAGICC, αλλά και σύμφωνα με τυχαία πιθανά σενάρια για την περιγραφή της μελλοντικής συμπεριφοράς μιας δασικής πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης. Επομένως, θα μπορούσαν να γίνουν μια σειρά προσομοιώσεων με πιθανά σενάρια για περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλη πυρο-επικινδυνότητα και τα αποτελέσματά τους να καταχωρηθούν σε πίνακες (επιχειρησιακά πρωτόκολλα).

Επομένως, η παρούσα μελέτη καλείται να καλύψει ένα κενό που υπάρχει στη γνώση που συνδυάζεται με την πράξη σε θέματα δασικών πυρκαγιών. Την προσπάθεια αυτή, συνεπικουρεί και το Εγχειρίδιο Πυρο-μετεωρολογίας / Μετεωρολογίας Δασικών Πυρκαγιών, που αποδίδεται στο Κεφάλαιο 5 της παρούσας διατριβής. Το εγχειρίδιο της πυρο-μετεωρολογίας αποτελεί ένα εκπαιδευτικό υλικό προσαρμοσμένο στις συνθήκες της χώρας μας. Επίσης, δίνει αναλυτικά και ομαδοποιημένα τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν και επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς. Είναι μια καινοτομία της μελέτης αυτής που καλύπτει κενά τα οποία υπάρχουν σε επίπεδο εκπαίδευσης, πρόληψης και σχεδιασμού σε επιτελικό και επιχειρησιακό επίπεδο.

Συνοψίζοντας, σε αυτή τη μελέτη προσομοιώθηκαν με το FARSITE δύο πυρκαγιές στην Ανατολική Αττική που χρησιμοποιούν διαφορετικά μοντέλα καύσιμης ύλης και μετεωρολογικών συνθηκών. Η προσαρμογή ενός προσομοιωτή εξάπλωσης πυρκαγιάς όπως είναι το FARSITE, για μια περιοχή και η χρήση ενός υψηλής ανάλυσης ατμοσφαιρικού μοντέλου όπως είναι το RAMS, είναι απαραίτητα στο να προσομοιωθεί σε επιχειρησιακό επίπεδο, μέσω αριθμητικών μοντέλων, η συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς σε σχέση με τους μετεωρολογικούς παράγοντες που την επηρεάζουν (πυρο-μετεωρολογία/ fire weather), καθώς και να προσομοιωθούν οι διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά της από τις κλιματικές ή πιθανές διακυμάνσεις περιβαλλοντικών παραγόντων σε επίπεδο Ελλάδας.

FIRE-WEATHER, WILDFIRES AND CLIMATE CHANGE

By Nikolaos Iliopoulos

DISSERTATION ABSTRACT

Forest fires have been a very common phenomenon in Mediterranean climates for many years. Land use changes in the Mediterranean have increased the frequency of destructive fires. In Greece, Attica is one of the regions that are influenced by the increase in fire frequency. In this work, we use the numerical meteorological model RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) to simulate the wind factor and the atmospheric temperature as well as their temporal change for the period 27-29 July 2005. The meteorological data that arise and the meteorological factors of the weather station at the airport of "Eleutherios Venizelos" can be the input in a fire area simulator such as FARSITE (Fire Area Simulator) for the description of forest fire behavior. More specifically two forest fires in Rafina and Neo Voutzas in Eastern Attica on 28th July 2005 are simulated by FARSITE, taking into consideration the effect of fuel, using different fuel models, the terrain and the weather conditions. The use of FARSITE on areas different from those where the simulator was originally developed requires a suitable fuel model for the specific region to produce reliable results. This is particularly true for Mediterranean ecosystems, where plant communities are characterised by high specific and structural heterogeneity and complexity. To check the accuracy of the simulation, the asymmetric statistical indicator Sorensen (SC) was used, which calculates the correlation between the real and the simulated burned area. The accuracy of the results was evaluated and confirmed that the use of correct meteorological data and suitable fuel models is very important for the reception of reliable simulations for the devastating fires that occur in the vegetation types of the Mediterranean during the summer fire season.

Furthermore to investigate the effect of likely climatic change on forest fires behavior in Greece, the climatic model MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change) and the data base SCENGEN (SCENARIO GENERATOR) were utilized. Changes included the various parameters of the model such as the climate sensitivity, the climatic scenario, the time period of interest and the world climatic models (GCM) that constitute the given data base of SCENGEN. Information were exported that concerns climatic tendencies of rainfall, cloud, wind, middle and maximum temperature in the hot months; i.e. the most important meteorological factors that influence the occurrence and growth of forest fires in Greece. Till now, however, the forecasted scientific results of

climatic changes are ambiguous and not categorically specific. Thus we developed scenarios where changes of meteorological conditions according to climatic tendencies and under randomly changes, were imported in the fire model of FARSITE for the description of forest fire behavior changes. Furthermore, there could be a number of possible simulations scenarios for areas with high fire hazard and their results can be stored in tables (operational protocols).

Therefore, this study covers a gap in knowledge combined with operational forest fire management. This effort is assisted by the Fire Weather / Forest Fire Weather Handbook, given in Chapter 5 of this thesis. The Fire Weather Handbook is an educational material adapted to the conditions of Greece. It also gives detailed and grouped data that characterize and influence fire behavior. It is an innovation of this work covering gaps which exist at education, prevention and planning in operational levels.

To summarize, in this thesis two fires that use different fuel models and meteorological conditions are simulated in Eastern Attica, Greece. More specifically, the adjustment of a fire area simulator such as the FARSITE, for a specific region and the use of a high resolution atmospheric model such as RAMS, are necessary to simulate at the operational level, through numerical modeling, the behavior of a forest fire in relation to meteorological factors (fire-weather) and the differences in the behavior under the climate or possible variations of the environmental factors in Greece.

ΠΥΡΟ-ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ, ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ (FIRE WEATHER, WILDFIRE AND CLIMATE CHANGE)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΤΟ ΚΙΝΗΤΡΟ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Οι δασικές πυρκαγιές είναι ένα φυσικό φαινόμενο που απασχολεί τους ανθρώπους εδώ και χιλιάδες χρόνια και θα συνεχίσει να απασχολεί και στα επόμενα χρόνια. Είναι ένα σύνθετο φυσικό φαινόμενο και αποτελεί μέρος της οικολογίας των δασικών οικοσυστημάτων (Farina 1998). Δεν είναι δυνατή η πλήρης εξάλειψη των δασικών πυρκαγιών αλλά μόνο ο περιορισμός τους, με τη βοήθεια ενός κατάλληλου αντιπυρικού σχεδιασμού. Η επιστημονική έρευνα των τελευταίων χρόνων στο μεσογειακό χώρο αποδεικνύει ότι το φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών προϋπήρχε της εμφάνισης του ανθρώπου επάνω στη Γη και ότι το μεσογειακό τοπίο είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των ανθρωπίνων επιδράσεων και των δασικών πυρκαγιών (Farina 1998). Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του μεσογειακού κλίματος είναι η πολύ υψηλής ευφλεκτικότητας βλάστηση (Moreno and Oechel 1991).

Με βάση τα στοιχεία της Ελληνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (E.M.Y.) η χώρα μας χαρακτηρίζεται από ζεστό, ξηρό καλοκαίρι και φθινόπωρο. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι εντονότερα στην Κεντρική και Νότια ηπειρωτική Ελλάδα, στα νησιά (Αιγαίου, Ιονίου και Κρήτη) και στα μικρά ως μέτρια υψόμετρα. Στη Βόρεια Ελλάδα και περισσότερο στα μεγαλύτερα σχετικά υψόμετρα δεν επικρατούν τόσο μεγάλες θερμοκρασίες, ενώ ιδιαίτερα στα βουνά με μεγάλο υψόμετρο, όπου υπάρχουν και τα παραγωγικότερα δάση, το καλοκαίρι είναι πιο δροσερό με σποραδικές βροχές και μικρή καιγόμενη επιφάνεια στα δάση ελάτης, μαύρης και δασικής πεύκης, οξιάς και ερυθρελάτης.

Στην Ελλάδα οι μεγάλες δασικές πυρκαγιές συμβαίνουν την περίοδο Ιουλίου - Αυγούστου (Καϊλίδης 1990). Το καλοκαίρι είναι η περίοδος που ευνοεί την έναρξη και τη γρήγορη ανάπτυξη των δασικών πυρκαγιών διότι επικρατούν πολύ ψηλές θερμοκρασίες, η βροχόπτωση είναι σχεδόν ανύπαρκτη και η σχετική υγρασία είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Όλα τα πιο πάνω, σε συνδυασμό με τους δυνατούς θερινούς ανέμους δημιουργούν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για εύκολη έκρηξη και ταχεία διάδοση των πυρκαγιών, πολλές από

τις οποίες εκτός από μεγάλη οικολογική καταστροφή προκαλούν απώλειες ανθρώπινων ζώων και περιουσιών (Keeley et al. 1999).

Με βάση στοιχεία της Πυροσβεστικής και Δασικής Υπηρεσίας τα τελευταία 50 χρόνια, καίγονται κατά μέσον όρο 322.000 στρέμματα ανά έτος (1955-2007), ενώ τα τελευταία 25 χρόνια ο ρυθμός έχει αυξηθεί ξεπερνώντας τα 400.000 στρέμματα ανά έτος. Εκτός της έκτασης, και ο αριθμός των δασικών πυρκαγιών αυξάνει τα τελευταία 50 χρόνια με ρυθμό 30 επιπλέον πυρκαγιές κάθε χρόνο. Από τις 500 περίπου πυρκαγιές τον χρόνο τη δεκαετία του 1950 φτάσαμε στις 2.000 πυρκαγιές το έτος 2000! Όταν οι πυρκαγιές είναι επαναλαμβανόμενες σε μικρά σχετικά χρονικά διαστήματα σε έναν τόπο προκαλούν την πλήρη υποβάθμιση του δασικού οικοσυστήματος του τόπου αυτού (Thanos and Doussi 2000). Το δασικό οικοσύστημα υποβαθμίζεται με τις πρώτες πυρκαγιές που αρχικά οδηγούν τη μετατροπή του δάσους σε χαμηλή βλάστηση (θάμνους) και στη συνέχεια, αν ο κύκλος των πυρκαγιών επαναληφθεί σε σύντομο χρονικό διάστημα, οδηγεί στην τέλεια υποβάθμιση της παραγωγικής ικανότητας του τόπου με τελική κατάληξη την ερημοποίηση, αν οι επικρατούσες κλιματικές συνθήκες την ευνοήσουν. Είναι λογική η ανησυχία που υπάρχει και η σημασία που δίνεται στο πρόβλημα των δασικών πυρκαγιών, με δεδομένο μάλιστα ότι σημαντική έκταση της χώρας μας καλύπτεται από άγονες και βραχώδεις εκτάσεις, γεγονός οφειλόμενο κατά μεγάλο μέρος στην επανάληψη του κύκλου των πυρκαγιών.

Ένα ερευνητικό ερώτημα που θα μπορούσε να διατυπωθεί είναι αν και με ποιο τρόπο θα ήταν δυνατό να προβλεφθεί η συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς σε επιχειρησιακό επίπεδο. Επεξηγηματικά, σε επίπεδο σχεδιασμού και πρόληψης, αν θα μπορούσε να προσομοιωθεί η συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς όταν είναι γνωστοί οι μετεωρολογικοί παράγοντες που την επηρεάζουν για συγκεκριμένη περιοχή, δηλαδή όταν είναι γνωστά ο άνεμος, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η κατάσταση της ατμόσφαιρας. Είναι προφανές πως η μεταβολή των μετεωρολογικών παραγόντων που επηρεάζουν μια πυρκαγιά προκαλεί αλλαγή στη συμπεριφορά της. Σημαντικό είναι να αναφερθεί το γεγονός ότι οι κλιματικές μέσες και μέγιστες τιμές των μετεωρολογικών παραγόντων επηρεάζονται από την αλλαγή του κλίματος που συμβαίνει παγκόσμια τα τελευταία χρόνια. Είναι εύλογο το ερώτημα λοιπόν, αν και σε ποιο βαθμό θα επηρεαστούν τα επόμενα χρόνια στην Ελλάδα, οι μετεωρολογικοί παράγοντες από την κλιματική αλλαγή. Σήμερα, το θέμα της κλιματικής αλλαγής παίζει ένα σημαντικό ρόλο στην διεθνή πολιτική ατζέντα τόσο σε εθνικό όσο και σε τοπικό επίπεδο. Σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες ανακοινώσεις του International Panel on Climate Change (IPCC 2007) η προβλεπόμενη μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας θα αυξηθεί από 1,8 σε 4,0°C (οι καλύτερες εκτιμήσεις για τα έξι σενάρια του SRES όπως ορίστηκαν από τους Nakicenovic et al. 2000) το 2100. Ωστόσο, παραμένει ένα ανοιχτό ερευνητικό ερώτημα το πώς ακριβώς αυτό θα μεταφραστεί σε σημαντικές αλλαγές στα καθιερωμένα πυρικά καθεστώτα (σε όρους πυρικής συχνότητας, έντασης και έκτασης των

καμένων εκτάσεων). Αυτό συμβαίνει γιατί η φωτιά είναι ένα προϊόν πολυπαραγοντικών αλληλεπιδράσεων που περιλαμβάνουν περίπλοκες συσχετίσεις μεταξύ διαφορετικών παραγόντων της βιόσφαιρας και της ατμόσφαιρας.

1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ

Το πρόβλημα της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς που έχει εκδηλωθεί, σχετίζεται με την καύσιμη ύλη, τη χωρική και ποσοτική της κατανομή, το ανάγλυφο μιας περιοχής, τους ορεινούς όγκους, τις κοιλάδες, τις πεδιάδες και τους άλλους τοπογραφικούς σχηματισμούς. Επίσης, σχετίζεται με τους μετεωρολογικούς παράγοντες (άνεμο, θερμοκρασία, σχετική υγρασία αέρα και ατμοσφαιρική κατάσταση). Κυρίως όμως επηρεάζεται από τη συνοπτική ροή του ανέμου σε συνδυασμό με τις τοπικές θερμικές κυκλοφορίες υπό τη μορφή θαλάσσιας αύρας ή των αναβατικών και καταβατικών ροών. Γνωρίζοντας τις δυνατότητες που προσφέρουν οι υψηλής χωρικής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες, όσον αφορά την εξαγωγή των τύπων βλάστησης και της τοπογραφίας, το πρόβλημα της εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς μετατοπίζεται στην εκτίμηση των μετεωρολογικών παραγόντων που μεταβάλλονται με το χρόνο.

Κύριο σκοπό και σημαντικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διατριβής αποτελεί η πρόγνωση των μετεωρολογικών παραγόντων που επηρεάζουν μια δασική πυρκαγιά (Πυρομετεωρολογία), σε κλίμακα τοπίου (χωρική κλίμακα) και κατά πόσο αλλά και με ποιο τρόπο μπορεί να επιτευχθεί η περιγραφή του πεδίου της εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς σε επιχειρησιακό επίπεδο, αν είναι γνωστοί αυτοί οι παράγοντες. Ως τοπίο ορίζεται μια γεωγραφική περιοχή αρκετών τετραγωνικών χιλιομέτρων, όπου συναντώνται διαφορετικές μορφές οικοσυστημάτων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (Gordon and Forman 1983). Επιπροσθέτως, ένα ζήτημα που θα απασχολήσει σίγουρα τις επόμενες γενιές είναι αν και με ποιους τρόπους οι κλιματικές και μη διακυμάνσεις στον πλανήτη θα επηρεάσουν τις καιρικές συνθήκες στην χώρα μας και πως θα επηρεαστεί η συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών κάτω από αυτές τις διαφοροποιήσεις. Σε αυτό το πλαίσιο, οι ειδικότεροι στόχοι της παρούσας διατριβής είναι:

- Να γίνει περιγραφή του ατμοσφαιρικού μοντέλου RAMS και να διερευνηθεί η δυνατότητα επιχειρησιακής του αξιοποίησης.
- Να διερευνηθεί σε επιχειρησιακό επίπεδο, με την αξιοποίηση μετεωρολογικών μοντέλων και μοντέλων πυρκαγιάς, η αλληλεπίδραση των μετεωρολογικών παραγόντων (άνεμος, θερμοκρασία, υγρασία, κατάσταση της ατμόσφαιρας) που επηρεάζουν μια δασική πυρκαγιά, σε κλίμακα τοπίου.

- Να διερευνηθεί η επίδραση της τοπογραφίας και της καύσιμης ύλης στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών.
- Να γίνει περιγραφή του φαινομένου της καύσης και των σημαντικότερων πυρικών παραμέτρων καθώς και του μοντέλου προσομοίωσης εξάπλωσης πυρκαγιάς FARSITE.
- Να γίνει αναφορά στις παγκόσμιες κλιματικές αλλαγές καθώς και στους τρόπους πρόβλεψης αυτών (κλιματικά μοντέλα) και να συσχετιστούν με την εκδήλωση δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα.
- Να γίνει περιγραφή της προσομοίωσης δύο χαρακτηριστικών πυρκαγιών, μέσω του μοντέλου πυρκαγιάς FARSITE, που ξέσπασαν στις περιοχές της Ραφήνας και του Νέου Βουτζά (χρησιμοποιούνται διαφορετικά μοντέλα καύσιμης ύλης και μετεωρολογικών συνθηκών) με σκοπό την έρευνα και μελέτη της σωστής προετοιμασίας, της κατάλληλης εκπαίδευσης και ενημέρωσης σε θέματα συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών.
- Να γίνει αναφορά στα δεδομένα και τα εργαλεία που αξιοποιήθηκαν στην προσομοίωση των δύο πυρκαγιών στη Ραφήνα και στο Νέο Βουτζά (κλιματικές συνθήκες – βλάστηση – ιστορική αναδρομή πυρκαγιών, μετεωρολογικό μοντέλο RAMS, μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE, κλιματικό μοντέλο MAGICC-SCHENGEN)
- Να διερευνηθεί η επίδραση μιας πιθανής κλιματικής αλλαγής στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα μέσω του κλιματικού μοντέλου MAGICC - SCHENGEN.
- Να γίνει η συγγραφή ενός Εγχειρίδιου Μετεωρολογίας Δασικών Πυρκαγιών, και πιο συγκεκριμένα η ανάλυση της σημασίας επτά περιβαλλοντικών παραγόντων (άνεμος, ατμοσφαιρική ευστάθεια, χαρακτηριστικά καύσιμης ύλης, υγρασία καύσιμης ύλης, θερμοκρασία καύσιμης ύλης, ανάγλυφο εδάφους και συμπεριφορά πυρκαγιάς) που η γνώση, η παρακολούθηση και ο συνεχής έλεγχος αυτών επιτρέπει σε επίπεδο εκπαίδευσης, σχεδιασμού και πρόληψης την ασφαλή λήψη μέτρων-αποφάσεων διαχείρισης και καταστολής των δασικών πυρκαγιών (συστηματοποίηση).
- Να γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων του μετεωρολογικού μοντέλου RAMS, του κλιματικού μοντέλου MAGICC-SCENGEN και του μοντέλου πυρκαγιάς FARSITE στη χαρακτηριστική περιοχή μελέτης (ανατολική Αττική – Ραφήνα - Νέος Βουτζάς).

- Να γίνει αναφορά στη χρησιμότητα αλλά και σπουδαιότητα της προσαρμογής ενός μοντέλου πυρκαγιάς, όπως είναι το FARSITE, για μια περιοχή και της χρήσης ενός υψηλής ανάλυσης ατμοσφαιρικού μοντέλου, όπως είναι το RAMS, προκειμένου τα συμπεράσματα της παρούσας διατριβής να αποτελέσουν ένα βήμα για συστηματοποίηση στη λήψη άμεσων αποφάσεων και ένα πολύτιμο εργαλείο πληροφόρησης σε επιχειρησιακό επίπεδο.

Η πρωτοτυπία της εργασίας εντοπίζεται στα εξής ακόλουθα:

- Εισάγεται και αναλύεται ο όρος «Πυρο-μετεωρολογία», αντίστοιχος του αγγλικού όρου Fire-weather, για τους μετεωρολογικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα.
- Σε επιχειρησιακό επίπεδο, μέχρι στιγμής, δεν έχει προσομοιωθεί, μέσω αριθμητικών μοντέλων, η συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς σε σχέση με τους μετεωρολογικούς παράγοντες που την επηρεάζουν (πυρο-μετεωρολογία), καθώς και τις διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά της από τις κλιματικές και μη διακυμάνσεις σε επίπεδο Ελλάδας.
- Σε επίπεδο σχεδιασμού, ενημέρωσης και εκπαίδευσης δημιουργείται το Εγχειρίδιο Μετεωρολογίας Δασικών Πυρκαγιών.

1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

Η διάρθρωση της παρούσας διατριβής παρουσιάζεται με τη δημιουργία συνολικά 8 κεφαλαίων. Συγκεκριμένα:

- Στο **πρώτο κεφάλαιο** παρουσιάζονται μια εισαγωγή στο θέμα μελέτης, τα ερευνητικά ερωτήματα, ο γενικός σκοπός και οι επιμέρους στόχοι της διατριβής, η πρωτοτυπία της εργασίας καθώς και η διάρθρωσή της.
- Στο **δεύτερο κεφάλαιο** εισάγεται ο όρος «Πυρο-μετεωρολογία», μια νέα έννοια σχετικά με τα δεδομένα της χώρας μας, ο οποίος αναφέρεται στους μετεωρολογικούς παράγοντες που επηρεάζουν και διαμορφώνουν τη συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς. Αναφορά γίνεται και στα μετεωρολογικά μοντέλα, χρήσιμα εργαλεία για τον υπολογισμό των μετεωρολογικών παραγόντων.
- Στο **τρίτο κεφάλαιο** περιγράφεται και αναλύεται η επίδραση της τοπογραφίας και της καύσιμης ύλης στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών. Επίσης, αναφέρονται το φαινόμενο της καύσης και οι σημαντικότερες πυρικές παράμετροι καθώς και τα μοντέλα προσομοίωσης εξάπλωσης πυρκαγιών.

- Στο **τέταρτο κεφάλαιο** γίνεται αναφορά στα κλιματικά χαρακτηριστικά της ανατολικής Μεσογείου, στις μελλοντικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σχετικά με τα ακραία καιρικά φαινόμενα, στο μηχανισμό του Ελ Νίνιο και στο φαινόμενο του θερμοκηπίου καθώς και στην αξιοποίηση των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Models – GCMs) για την πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής.
- Στο **πέμπτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται το Εγχειρίδιο Μετεωρολογίας Δασικών Πυρκαγιών με χρήσιμες πληροφορίες και τεκμηριωμένη γνώση για την παρατηρούμενη και την αναμενόμενη συμπεριφορά της φωτιάς προς ασφαλή και αποτελεσματική λήψη μέτρων πρόληψης και καταστολής των δασικών πυρκαγιών.
- Στο **έκτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η περιοχή ερευνητικής μελέτης (προσομοίωση δυο πυρκαγιών στη Ραφήνα και στο Νέο Βουτζά) καθώς και τα δεδομένα και εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν (το μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE, το κλιματικό μοντέλο MAGICC, η βάση δεδομένων SCENGEN και το μετεωρολογικό μοντέλο RAMS).
- Στο **έβδομο κεφάλαιο** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μετεωρολογικού μοντέλου, του κλιματικού μοντέλου και του μοντέλου πυρκαγιάς. Γίνεται η προσαρμογή του μοντέλου πυρκαγιάς για την περιοχή ενδιαφέροντος και αναπτύσσονται σενάρια για τη μελλοντική συμπεριφορά των πυρκαγιών.
- Στο **όγδοο κεφάλαιο** συζητούνται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας διατριβής. Επίσης γίνεται αναφορά στις δυσκολίες της έρευνας καθώς επίσης στην μελλοντική έρευνα που προτείνεται να ακολουθηθεί στο κομμάτι της αλληλεπίδρασης δασικής πυρκαγιάς – ατμόσφαιρας με συγκεκριμένες προτάσεις και στόχους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΥΡΟ-ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ

Η Πυρο-μετεωρολογία είναι μια νέα έννοια όσον αναφορά τα δεδομένα της χώρας μας, που εισάγεται στην παρούσα διατριβή και αναφέρεται σε εκείνους τους μετεωρολογικούς παράγοντες που επηρεάζουν και διαμορφώνουν τη συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς. Ο σημαντικότερος μετεωρολογικός παράγοντας που διαφοροποιεί, με τις αλλαγές στην ένταση και στη διεύθυνσή του, τη συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς, είναι ο άνεμος. Επίσης η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία του αέρα επηρεάζουν την υγρασία της καύσιμης ύλης, ενώ η ατμοσφαιρική ευστάθεια είναι σημαντική διότι επηρεάζει τις ανοδικές και καθοδικές κινήσεις των αέριων μαζών. Πολύτιμο εργαλείο για τον υπολογισμό αυτών των μετεωρολογικών παραγόντων είναι τα μετεωρολογικά μοντέλα. Όλα τα παραπάνω θα αναλυθούν στα παρακάτω υποκεφάλαια.

2.1 ANEMΟΣ

Ο άνεμος είναι μια σύνθεση ενός μεγάλου αριθμού δινών διαφόρων μεγεθών και διάρκειας. Αιτία δημιουργίας του ανέμου είναι η διαφορά της θερμοκρασίας του αέρα η οποία δημιουργεί, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, διαφορές βαρομετρικής πίεσης μεταξύ παρακείμενων περιοχών. Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τον άνεμο είναι η ταχύτητα (ένταση) και η κατεύθυνση. Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται όσο μεγαλώνει η διαφορά της βαρομετρικής πίεσης μεταξύ των γειτονικών περιοχών. Η κατεύθυνση του ανέμου είναι από τις περιοχές με την υψηλότερη πίεση προς τις περιοχές με τη χαμηλότερη. Η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου δεν μένουν σταθερές με το χρόνο αλλά μεταβάλλονται σε περιόδους που ξεκινούν από ένα κλάσμα του δευτερολέπτου και φτάνουν σε αρκετές δεκάδες λεπτών. (Schroeder and Buck 1970). Η περίοδος μεταβολής για μια τοποθεσία εξαρτάται από τη δύναμη της ροής (την ένταση του ανέμου) και από την κατάσταση της ατμόσφαιρας (αν είναι ουδέτερη, ευσταθής ή ασταθής).

Η ταχύτητα του ανέμου είναι σπουδαίος παράγοντας, που επιδρά στην ταχύτητα εξαπλώσεως των πυρκαγιών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη είναι η προσφορά του οξυγόνου, που είναι απαραίτητο για την καύση. Ακόμη όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο οι φλόγες προωθούνται μπροστά από τη φωτιά προς τη γειτονική καύσιμη ύλη, την οποία προθερμαίνουν και ξηραίνουν, ενώ συγχρόνως πετούν και μεταφέρονται μπροστά από τη φωτιά αναμμένα χόρτα, κλαδάκια κ.λ.π που δημιουργούν νέες εστίες (Green 1981). Σε σταθερή υγρασία όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη επιφάνεια καίγεται (Anderson 1983). Ακόμη στη χώρα μας γνωρίζουμε ότι η απόγειος και η θαλάσσια αύρα βοηθούν στην εξάπλωση των πυρκαγιών στις παραλίες μας με αείφυλλα, χαλέπιο και τραχεία πεύκη, αλλά πολλές φορές με

την αλλαγή της διεύθυνσεως των ανέμων αυτών που γίνονται αντίθετοι, έχουμε αποτέλεσμα, πρακτικά, την αυτοκατάσβεσή τους.

Όταν σε μια περιοχή, για οποιαδήποτε αιτία, αρχίσει μια πυρκαγιά εάν δεν πνέει άνεμος τότε η πυρκαγιά θα επεκταθεί περίπου ομόκεντρα γύρω από το σημείο ενάρξεώς της. Εάν επικρατεί άνεμος, η κατεύθυνση της πυρκαγιάς καθορίζεται από τη διεύθυνση του επικρατούντος ανέμου. Στη περίπτωση των δασικών πυρκαγιών ο άνεμος έχει σημαντικό ρόλο (Rothermel 1972). Τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα ανέμων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών είναι οι άνεμοι Θερμού και Ψυχρού μετώπου, οι Επικλινείς άνεμοι, οι άνεμοι Φεν (Föhn), οι Ημερήσιοι άνεμοι και οι Ετησίες (Μελέμια) όπου θα παρουσιαστούν αναλυτικότερα ευθύς παρακάτω.

2.1.1 Άνεμοι Θερμού και Ψυχρού Μετώπου

Η επαφή δύο αέριων μαζών με διαφορετικές πυκνότητες (λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας και υγρασίας) δημιουργεί συνήθως μία διαχωριστική ζώνη. Η ζώνη αυτή ονομάζεται μετωπική επιφάνεια και η τομή της μετωπικής επιφάνειας με την επιφάνεια του εδάφους ονομάζεται «μέτωπο». Τα μέτωπα που με το πέρασμά τους επηρεάζουν το φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών διακρίνονται σε θερμά και ψυχρά.

Το Θερμό μέτωπο είναι η ζώνη που δημιουργείται όταν μάζες θερμού αέρα εισέρχονται σε μία περιοχή, όπου υπάρχουν μάζες ψυχρότερου αέρα και ο θερμός αέρα αντικαθιστά τον ψυχρό. Στην περίπτωση αυτή, επειδή ο εισερχόμενος θερμός αέρας είναι ελαφρύτερος, ολισθαίνει πάνω από τον ψυχρό που υποχωρεί, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται στην περιοχή του θερμού μετώπου μία εκτεταμένη ζώνη ανοδικών ρευμάτων. Με αυτή τη διαδικασία δημιουργείται μία αλληλουχία από νέφη, δηλαδή θύσανοι (cirrus), θυσανοστρώματα (cirrostratus), υψιστρώματα (altostratus), μελανοστρώματα (nimbostratus) και στρωματοσωρείτες (stratocumulus). Η ζώνη μπροστά από το μέτωπο, που καλύπτεται από μελανοστρώματα και στρωματοσωρείτες, είναι βροχοφόρα (Schroeder and Buck 1970).

Το ψυχρό μέτωπο είναι η ζώνη, όπου ο ψυχρός, ξηρός και ευσταθής αέρας αντικαθιστά το ζεστό, υγρό και ασταθή αέρα. Με αυτό τον τρόπο, μάζες, σχετικά ψυχρού αέρα, εισβάλλουν με τη μορφή «σφήνας», σε μία περιοχή με θερμότερο αέρα. Οι μάζες του θερμότερου αέρα, επειδή συνήθως αποσύρονται με μικρότερη ταχύτητα από τον προωθούμενο ψυχρότερο αέρα, παράλληλα εκτοπίζονται βίαια προς την επάνω περιοχή του μετώπου. Καθώς ο θερμός αέρας (στην περίπτωση που είναι υγρός και ασταθής) ανέρχεται, συμπυκνώνεται δημιουργώντας νέφη τύπου Cumulus (σωρείτες).

Κατά τη διέλευση ενός θερμού μετώπου από μία περιοχή οι άνεμοι στρέφονται από νοτιοανατολικοί σε νότιους ή νοτιοδυτικούς. Οι άνεμοι μπροστά από ένα ψυχρό μέτωπο που πλησιάζει, συνήθως μεταβάλλονται από νότιοι σε νοτιοδυτικοί. Καθώς το ψυχρό μέτωπο

περνά, οι άνεμοι μετατρέπονται γρήγορα σε δυτικούς και ύστερα σε βορειοδυτικούς. Οι ταχύτητες του ανέμου αυξάνουν σε δύναμη καθώς το ψυχρό μέτωπο πλησιάζει και συνήθως γίνονται αρκετά ισχυροί και με ριπές (gusts) όταν το μέτωπο προσπερνάει μία περιοχή. Αυτό συμβαίνει καθώς οι βαθμίδες πίεσης (pressure gradients) είναι πυκνές και οι ισχυροί ανώτεροι άνεμοι αναμειγνύονται πιο εύκολα κάτω στην επιφάνεια σε πολύ ασταθή αέρα. Οι τυπικές ταχύτητες ανέμου ενός ψυχρού μετώπου ποικίλουν ανάμεσα στα 24 και 40 km/h, αλλά μπορεί να είναι αρκετά πιο μεγάλες σε ισχυρά ψυχρά μέτωπα. Τα ψυχρά μέτωπα, συνήθως, εκτείνονται σε μεγάλα ύψη και για το λόγο αυτό συνοδεύονται από έντονες βροχοπτώσεις ή καταιγίδες και ηλεκτρικές εκκενώσεις/ κεραυνούς.

Όσον αφορά τη συμπεριφορά των γενικών αυτών ανέμων, κατά τη διέλευση ενός μετώπου που είναι σημαντικό γεγονός στην περίπτωση των δασικών πυρκαγιών, *για ένα παρατηρητή ο οποίος πριν από τη διέλευση του μετώπου είναι στραμμένος προς την κατεύθυνση από την οποία πνέει ο άνεμος, με το πέρασμα του μετώπου ο άνεμος θα στραφεί προς τα δεξιά του.* Η διεύθυνση του ανέμου πριν και μετά το πέρασμα ενός μετώπου εξαρτάται από τις διευθύνσεις των ισοβαρών καμπυλών. Έργο των μετεωρολόγων σε αυτήν την περίπτωση, είναι η ακριβής πρόβλεψη της χρονικής στιγμής, που το μέτωπο θα περάσει από τον τόπο της δασικής πυρκαγιάς και η διαβίβαση της πληροφορίας αυτής, για να αξιοποιηθεί σε επιχειρησιακό επίπεδο στην περίπτωση των δασικών πυρκαγιών τόσο όσον αφορά στις μεθόδους κατάσβεσης όσο και στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εγκλωβισμού των πυροσβεστικών δυνάμεων στη φλεγόμενη περιοχή. Αντιπροσωπευτικές είναι οι περιπτώσεις, κατά τις οποίες ο άνεμος στρέφεται από νοτιοανατολικός σε νοτιοδυτικός στην περίπτωση ενός θερμού μετώπου, και από νοτιοδυτικός σε βορειοδυτικός στην περίπτωση ενός ψυχρού μετώπου.

2.1.2 *Επικλινείς Άνεμοι*

Την ημέρα, ο αέρας που είναι σε επαφή με τις επιφάνειες μιας πλαγιάς θερμαίνεται, γίνεται ελαφρύτερος και ανεβαίνει την πλαγιά. Αυτοί οι άνεμοι ονομάζονται *αναβατικοί άνεμοι* και διαρκούν μέχρι αργά το απόγευμα. Τη νύχτα, οι πλαγιές των βουνών ψύχονται από την απώλεια θερμότητας, έτσι ο αέρας που είναι σε επαφή ψύχεται και αυτός, γίνεται πυκνότερος και βαρύτερος με αποτέλεσμα να ολισθαίνει αργά και να συγκεντρώνεται στη βάση της κοιλάδας. Αυτοί οι άνεμοι είναι γνωστοί ως *καταβατικοί άνεμοι* και διαρκούν περίπου μέχρι τα μεσάνυχτα (Schroeder and Buck 1970). Επομένως, οι δασικές πυρκαγιές συνήθως ανεβαίνουν με μεγάλη ταχύτητα τις πλαγιές κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας ακολουθούν στις πλαγιές αργή καθοδική πορεία.

2.1.3 Άνεμοι *Föhn* (ΦΕΝ)

Οι άνεμοι *Föhn* δημιουργούνται λόγω της διαφοράς στη βαρομετρική πίεση μεταξύ της προσήνεμης και της υπήνεμης πλευράς ενός ορεινού όγκου με αποτέλεσμα την ανύψωση της υγρής αέριας μάζας στην προσήνεμη πλευρά μιας οροσειράς και την μετατροπή της σε πολύ ισχυρούς θερμούς και ξηρούς καταβατικούς ανέμους στην υπήνεμη πλαγιά. Ο αέρας που καθιζάνει στην υπήνεμη πλευρά του βουνού γίνεται αρκετά ξηρός και θερμός (10-20°C αύξηση της θερμοκρασίας και κάθετη πτώση της σχετικής υγρασίας μέχρι να φθάσει στους πρόποδες του βουνού) με αποτέλεσμα να έχει ολέθριες συνέπειες στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών που θα ξεσπάσουν (Schroeder and Buck 1970). Οι άνεμοι *Föhn* εμφανίζονται στον Ελλαδικό χώρο στην περιοχή της Κρήτης και στην πεδιάδα των Τεμπών, με την κάθοδο των αερίων μαζών από την οροσειρά της Πίνδου.

2.1.4 Ημερήσιοι Άνεμοι

Τη θερινή περίοδο στις παράκτιες περιοχές, η θαλάσσια και η απόγεια αύρα είναι τοπικοί άνεμοι που επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στη χώρα μας. Η *θαλάσσια αύρα* είναι ο τοπικός άνεμος με κατεύθυνση από τη θάλασσα προς την ξηρά που παρατηρείται κατά τις θερμές ώρες της ημέρας, όταν δεν πνέουν ισχυροί άνεμοι, εξαιτίας του γεγονότος ότι η ξηρά θερμαίνεται περισσότερο από ότι η θάλασσα λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας του νερού. Έτσι ο αέρας πάνω από την ξηρά καθώς ζεσταίνεται, αφού βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, γίνεται ελαφρύτερος και αρχίζει να ανεβαίνει προς τα επάνω. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται στη στεριά ένα κενό (χαμηλές πιέσεις) το οποίο έρχεται να καλύψει ψυχρότερος αέρας ο οποίος προέρχεται από τη θάλασσα (Schroeder and Buck 1970).

Τη νύχτα αντιστρέφεται η διαδικασία όταν η ξηρά αρχίζει να ψύχεται και γίνεται ψυχρότερη από τη γειτονική θάλασσα. Σε αυτές τις συνθήκες ο αέρας επάνω από την ξηρά είναι πιο πυκνός από αυτόν επάνω από τη θάλασσα, με αποτέλεσμα η ροή του αέρα να πνέει από την ξηρά προς τη θάλασσα ως απόγεια αύρα. Η απόγεια αύρα είναι ασθενέστερη με ταχύτητες 1-2 m/s, με μικρότερο πάχος και πολύ μικρότερη έκταση.

Θερμικής φύσεως κυκλοφορίες με ημερήσια μεταβολή των διευθύνσεων των ανέμων είναι και οι *αύρες κοιλάδων και ορέων*. Αυτές προκαλούνται από την ημερήσια μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας στις πλαγιές των βουνών. Η ένταση τους εξαρτάται από την κλίση, τον προσανατολισμό και τη βλάστηση της πλαγιάς. Κατά τη διάρκεια της ημέρας οι βουνοπλαγιές θερμαίνονται γρηγορότερα από ό,τι οι κοιλάδες και ανυψώνονται οι αέριες μάζες που βρίσκονται σε επαφή με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα ανοδικό ρεύμα για να καταλάβει τη θέση του αέρα που υψώθηκε, δημιουργώντας έτσι την *αύρα της κοιλάδας*. Τη

νύχτα, οι βουνοπλαγιές ψύχονται γρηγορότερα από ό,τι οι κοιλάδες. Ο αέρας πάνω από τις κοιλάδες ανυψώνεται και βαρύτερος, ψυχρότερος αέρας από τις πλαγιές του βουνού ρέει προς τα κάτω στις κοιλάδες, δημιουργώντας έτσι την *αύρα των ορέων*. Στις ορεινές περιοχές, οι αύρες κοιλάδων και ορέων μεταβάλλουν τη διεύθυνση του ανέμου διαφοροποιώντας τη συμπεριφορά των πυρκαγιών που έχουν ξεσπάσει, δημιουργώντας προβλήματα στην προσπάθεια κατάσβεσης τους (Schroeder and Buck 1970).

2.1.5 Ετησίες (Μελτέμια)

Ο *ετησίας* (κοινώς μελτέμι) είναι ένας τοπικός εποχιακός άνεμος που εμφανίζεται περισσότερο στο Αιγαίο τα καλοκαίρια. Δημιουργείται από το συνδυασμό ενός μεγάλου συστήματος υψηλών πιέσεων στα Βαλκάνια και ενός συστήματος χαμηλών πιέσεων στη Μικρά Ασία και συγκεκριμένα στη ανατολική Μεσόγειο. Οι διευθύνσεις των ανέμων αυτών είναι από βορειανατολικές (BA) στο βόρειο Αιγαίο σε βόρειες (B) με βορειανατολικές (BA) στο κεντρικό Αιγαίο, μέχρι βορειοδυτικές (BD) - δυτικές (Δ) στο νότιο Αιγαίο.

Η συχνότητα των ετησίων και η έντασή τους αυξάνει την περίοδο Ιουλίου – Σεπτεμβρίου. Η μέση έντασή τους φτάνει τα 6-7 Μποφόρ και παρατηρείται τις μεσημεριανές – απογευματινές ώρες ενώ τη νύχτα η έντασή τους συνήθως ελαττώνεται σημαντικά. Οι αέριες μάζες των ετησίων προέρχονται από την νότια Ρωσία και ξηραίνονται κατά το πέρασμά τους από την Ευρώπη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι ξηροί και πολύ ισχυροί αυτοί άνεμοι να επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών ενισχύοντας το καταστροφικό τους έργο (Henderson et al. 2005).

2.2 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ – ΣΧΕΤΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ ΑΕΡΑ

Η θερμοκρασία είναι το μέτρο της κίνησης των μορίων και των ατόμων. Όσο πιο γρήγορα κινούνται, δηλαδή όσο περισσότερη κινητική ενέργεια διαθέτουν, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία. Η θερμοκρασία της ξηράς, της θάλασσας και της ατμόσφαιρας επηρεάζεται από την ηλιακή ακτινοβολία και είναι από τις σημαντικότερες μετεωρολογικές παραμέτρους. Οι μηχανισμοί μετάδοσης της θερμότητας στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα τη θέρμανση του αέρα, είναι:

- Μετάδοση με αγωγιμότητα: είναι η μετάδοση της θερμότητας με επαφή, από μόριο σε μόριο.
- Μετάδοση με μεταφορά: είναι η μετάδοση της θερμότητας μεταξύ μιας στερεής επιφάνειας και ενός κινούμενου ρευστού.

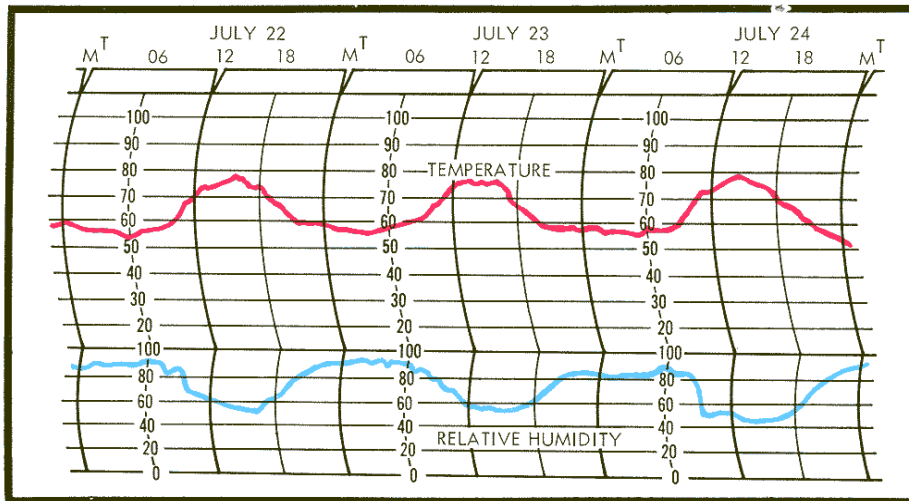
- Μετάδοση με ακτινοβολία: είναι η μετάδοση της θερμότητας που γίνεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Δεν είναι απαραίτητη η παρουσία κάποιου μέσου.

Η θερμοκρασία του αέρα είναι σημαντική διότι επηρεάζει τη θερμότητα που πρέπει να απορροφήσει ένα καύσιμο για να αναφλεγεί καθώς και τη σχετική υγρασία του αέρα. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι υψηλές θερμοκρασίες αέρα στεγνώνουν τα καύσιμα μειώνοντας τη υγρασία τους με αποτέλεσμα να γίνονται πιο εύφλεκτα. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι σε μεγάλες θερμοκρασίες αέρα η πυρκαγιά συμπεριφέρεται με μεγαλύτερη σφοδρότητα έχοντας μεγαλύτερη ταχύτητα (Green 1981).

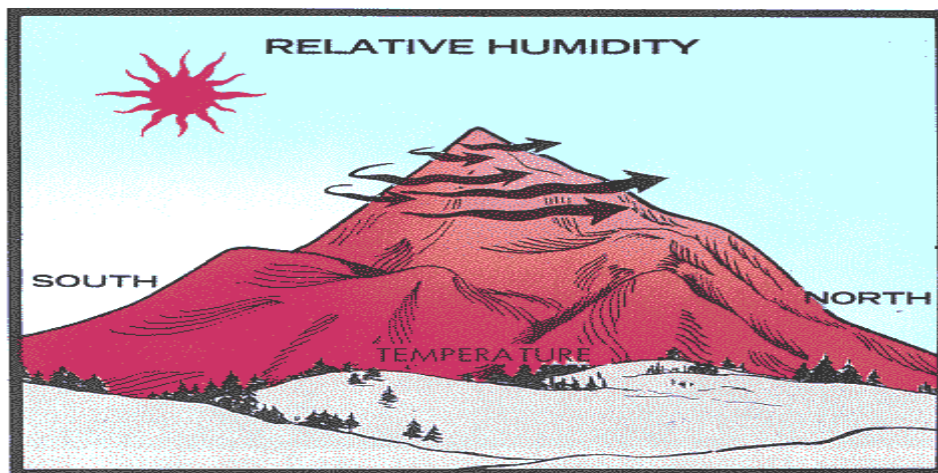
Η θερμοκρασία του αέρα παρουσιάζει ημερήσιο και ετήσιο κύκλο με μέγιστο και ελάχιστο. Τις μέγιστες τιμές στον ημερήσιο κύκλο τις λαμβάνει νωρίς το απόγευμα, ενώ στον ετήσιο κύκλο τις λαμβάνει κατά την καλοκαιρινή περίοδο με αύξηση του αριθμού των πυρκαγιών. Επίσης, η θερμοκρασία συνήθως μειώνεται με την αύξηση του υψομέτρου με αποτέλεσμα να αυξάνεται η σχετική υγρασία του αέρα, όταν η απόλυτη υγρασία παραμένει σταθερή. Η σχετική υγρασία του αέρα συνδέεται με τη θερμοκρασία του, αφού ακολουθεί τον αντίθετο ημερήσιο κύκλο (Φλόκας 1997) (Σχήμα 2.1).

Η σχετική υγρασία εξαρτάται από το ποσό των υδρατμών στην ατμόσφαιρα και από τη θερμοκρασία. Μεταβάλλεται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε υγρασία και είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη θερμοκρασία. Επηρεάζεται επίσης από την τοποθεσία και το χρόνο. Στις μεγάλες τοπογραφικές εξάρσεις, στα ορεινά, η υγρασία μεταβάλλεται περισσότερο από ότι στα πεδινά. Επίσης για το λόγο του ότι οι νότιες εκθέσεις δέχονται μεγαλύτερα ποσά θερμότητας, έχουν χαμηλότερη σχετική υγρασία την ημέρα σε σχέση με τις βόρειες εκθέσεις. Τη νύχτα οι διαφορές στη σχετική υγρασία μειώνονται (Schroeder and Buck 1970). Στα μεγάλα υψόμετρα λόγω της καλής ανάμιξης των αερίων μαζών οι διαφορές ελαχιστοποιούνται (Σχήμα 2.2).

Οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με τις μέτριες βροχοπτώσεις δημιουργούν ξηρό κλίμα και ξηρασία που συνηγορούν στην έναρξη μιας πυρκαγιάς (Καλαμποκίδης κ.α. 2004). Τοποθεσίες σε χαμηλά υψόμετρα θερμαίνονται και ξηραίνονται νωρίτερα κατά τη διάρκεια της άνοιξης. Τα σύννεφα μειώνουν την ημερήσια διακύμανση της σχετικής υγρασίας, ενώ η βροχή την αυξάνει λόγω της ύπαρξης περισσότερης υγρασίας και χαμηλών θερμοκρασιών στην ατμόσφαιρα. Σε ό,τι αφορά τη βλάστηση, η σχετική υγρασία είναι υψηλότερη σε πυκνά δάση από ό,τι σε μία ανοικτή περιοχή.



Σχήμα 2.1: Μεταβολές της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας με το χρόνο (Πηγή: Schroeder and Buck 1970)



Σχήμα 2.2: Η σχετική υγρασία του αέρα είναι μικρότερη στις νότιες εκθέσεις σε σχέση με τις βόρειες, ενώ σε μεγάλα υψόμετρα δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα λόγω της καλής μίξης (Πηγή: Schroeder and Buck 1970)

Η μέγιστη υγρασία παρατηρείται το ξημέρωμα και η ελάχιστη τη χρονική στιγμή της μέγιστης θερμοκρασίας, δηλαδή νωρίς το απόγευμα. Αυξάνεται βαθμιαία από αργά το απόγευμα και κατά τη διάρκεια της νύχτας. Τα σύννεφα επηρεάζουν τη σχετική υγρασία αφού διαφοροποιούν τη θέρμανση και την ψύξη, γι' αυτό η υγρασία θα αυξάνεται κατά τις νεφελώδεις ημέρες και μειώνεται κατά τις νεφελώδεις νύχτες.

Η βροχόπτωση αποτελεί έναν πολύ σημαντικό μετεωρολογικό παράγοντα που συντελεί στη μείωση του κινδύνου έναρξης και στη δυσκολία εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς. Μεταφέρει τους υδατμούς της ατμόσφαιρας στο έδαφος και αυξάνει την υγρασία των καυσίμων. Έχει σημασία η ποσότητα του νερού που πέφτει στο έδαφος. Ημερήσιες βροχές πολύ μικρού ύψους (< 20 mm) δεν ασκούν σπουδαία επίδραση στην υπάρχουσα

υγρασία της βλάστησης και κυρίως στην υγρασία των λεπτών νεκρών καυσίμων (διαμέτρου < 0,5 cm), διότι εξατμίζονται μέσα σε ελάχιστες μέρες. Επίσης η διάρκεια της βροχής ή η ραγδιαιότητα της έχει μεγάλη σημασία, διότι όταν η βροχή πέφτει με αργό ρυθμό διαποτίζει καλύτερα το φυλλόστρωμα αυξάνοντας την υγρασία του (Holton 1979).

Η υγρασία της καύσιμης ύλης επηρεάζει την ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς ως εξής: όσο μεγαλύτερη είναι η περιεχόμενη υγρασία των καυσίμων τόσο πιο αργά και με μικρότερη εκλυόμενη ενέργεια θα καίει η πυρκαγιά. Όταν έχουμε υγρασία 25% έως 30% και χωρίς παρουσία ανέμου η φυτομάζα καίγεται πολύ δύσκολα. Επίσης, σημαντικό είναι το πάχος της καύσιμης ύλης επειδή όσο παχύτερη είναι αυτή τόσο καθυστερεί να ξηραθεί και τόσο καθυστερεί να ακολουθήσει τις μεταβολές της σχετικής υγρασίας του αέρα.

Το φαινόμενο της εξάτμισης επιδρά στην περιεχόμενη υγρασία των καυσίμων μειώνοντάς την. Ο ρυθμός εξάτμισης εξαρτάται από την σχετική υγρασία του αέρα. Όταν η σχετική υγρασία του αέρα είναι μικρή, τότε η ατμόσφαιρα απορροφά την υγρασία από την καύσιμη ύλη ξηραίνοντάς την. Γενικά όταν έχουμε σχετική υγρασία του αέρα μεγαλύτερη από 50%, ελάχιστες πυρκαγιές συμβαίνουν και αυτές που ανάβουν δεν επεκτείνονται, ιδιαίτερα όταν έχουμε μικρή ταχύτητα ανέμου.

2.3 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

Η ευστάθεια της ατμόσφαιρας έχει σχέση με την κατανομή της θερμοκρασίας με το ύψος. Εάν η μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος είναι μεγαλύτερη από 1°C ανά 100 m, ο αέρας είναι ασταθής. Όταν η ατμόσφαιρα είναι ασταθής παρατηρούνται έντονα ανοδικά και καθοδικά ρεύματα (ανατάραξη εκ μεταφοράς).

Η ανατάραξη εκ μεταφοράς προέρχεται από τη θέρμανση της επιφάνειας του εδάφους από τον ήλιο που ακολουθείται από την ανάπτυξη ρευμάτων ανόδου πάνω από περιοχές της Γης όπου η θερμότητα είναι σχετικά αυξημένη, όπως σε οργωμένα χωράφια και μεγάλες ασφαλτοστρωμένες επιφάνειες. Αυτές οι θερμές περιοχές προκαλούν θέρμανση του αέρα και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της άνωσης και την κάθετη ανύψωσή του με τη μορφή δίνης και τη δημιουργία κάθετων ρευμάτων.

Εκτός από την ανατάραξη εκ μεταφοράς, υπάρχει και η μηχανική ανατάραξη. Η μηχανική ανατάραξη είναι η μίξη που εισάγεται στην ατμόσφαιρα από τη ροή του αέρα εγκαρσίως της ανώμαλης επιφάνειας της Γης. Τα στοιχεία που τη συνθέτουν, όπως τα δέντρα, τα δάση, οι λόφοι, οι κοιλάδες και τα κτίρια των πόλεων δημιουργούν δίνες.

Μια πολύ σταθερή ατμόσφαιρα που χαρακτηρίζεται από πραγματική αύξηση της θερμοκρασίας με το ύψος καλείται αναστροφή. Μία αναστροφή θα μπορούσε να αποτρέψει αποτελεσματικά την ανάπτυξη κάθετης κίνησης. Λόγω αυτής της περιοριστικής ιδιότητας,

κάθε αναστροφή εμποδίζει την ταχεία κάθετη διάδοση ή διασκόρπιση των εκλυόμενων ρύπων (Robinson 1984).

Η ατμόσφαιρα που είναι ακόρεστη, είναι ουδέτερη αν η μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος είναι 1°C ανά 100 m ενώ είναι ευσταθής αν η μείωση της θερμοκρασίας με το ύψος είναι μικρότερη από 1°C ανά 100 m. Οι ουδέτερες συνθήκες βρίσκονται συνήθως κάτω από τα νέφη κατά την περίοδο ύπαρξης νεφελώσεων και ισχυρών ανέμων. Ασταθή ατμόσφαιρα συνήθως έχουμε νωρίς το απόγευμα σε ημέρες με διαύγεια και ασθενείς ανέμους. Σταθερές συνθήκες έχουμε συνήθως τη νύχτα όταν η ατμόσφαιρα είναι καθαρή και οι άνεμοι ασθενείς (Stull 1988).

Η ασταθής ατμόσφαιρα, συνήθως, επηρεάζει τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών δημιουργώντας δυσκολίες στον έλεγχό τους. Κάτω από τέτοιες ατμοσφαιρικές συνθήκες είναι δυνατή η εμφάνιση πολύ ισχυρών επιφανειακών ανέμων και φλεγόμενων ανεμοστρόβιλων. Επίσης η πυρκαγιά είναι δυνατόν να εξελιχθεί από επιφανειακή σε επικόρυφη (να καίει την κόμη των δέντρων) αυξάνοντας την έντασή της, μεταφέροντας καιόμενα αντικείμενα σε μεγάλες αποστάσεις.

2.4 ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Οι πρώτες επιστημονικές προσπάθειες για την πρόγνωση του καιρού βασίζονταν σε συνοπτικούς χάρτες και η ακρίβεια της εξαρτιόταν από την εμπειρία και την κρίση των προγνωστών. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, άρχισε να αναπτύσσεται η αριθμητική πρόγνωση του καιρού. Οι νόμοι της φυσικής, διατυπωμένοι με μαθηματικές εξισώσεις, επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους σε υπολογιστικές πλατφόρμες. Έτσι η ακρίβεια της πρόγνωσης του καιρού αρχίζει να συνδέεται με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Οι ατμοσφαιρικές διαδικασίες, που καλούνται να περιγράψουν τα αριθμητικά μοντέλα, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα, με μήκη κύματος τάξης μεγέθους από 10^7 μέχρι 10^{-6} m, (δηλαδή από πλανητικά κύματα μέχρι τις μοριακές κινήσεις) και με χρονική περίοδο από διάστημα ημερών μέχρι κλάσματα του δευτερολέπτου. Πολλοί ερευνητές, μεταξύ αυτών Orlandi 1975, Haltiner and Williams 1980 και Atkinson 1981, πρότειναν την ταξινόμηση του φάσματος σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τη χωροχρονική κλίμακα των φαινομένων. Η ανάλυση των παραπάνω ταξινομήσεων οδήγησε στη δημιουργία του Πίνακα 2.1.

Η συμπεριφορά της ατμόσφαιρας καθορίζεται από ένα σύνολο φυσικών νόμων που μπορούν να εκφραστούν από μαθηματικές εξισώσεις. Ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο πρόγνωσης είναι στην ουσία ένα σύστημα προσομοίωσης των φυσικών διαδικασιών που λαμβάνουν

χώρα στην ατμόσφαιρα. Οι παραπάνω διαδικασίες προσεγγίζονται από διαφορετικές εξισώσεις, η επίλυση των οποίων οδηγεί στην πρόγνωση του καιρού.

Η ατμόσφαιρα ως γνωστόν είναι ένα συνεχές μέσο. Ωστόσο οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της την αντιμετωπίζουν σαν ένα μέσο που αποτελείται από διακριτά σημεία (grid points). Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται ένα τρισδιάστατο πλέγμα σημείων πάνω στο οποίο πραγματοποιούνται όλοι οι απαιτούμενοι υπολογισμοί. Τα περισσότερα αριθμητικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα για τις προσομοιώσεις των ατμοσφαιρικών κυκλοφοριών αποτελούνται από πολύπλοκους κώδικες που αναπτύχθηκαν, για να τρέξουν στους ισχυρότερους και γρηγορότερους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Αυτή η πολυπλοκότητα είναι απαραίτητη, ώστε το μοντέλο να παραστήσει τις σύνθετες φυσικές διεργασίες οι οποίες ελέγχουν την ατμοσφαιρική ροή.

	Χρονική	>3 μέρες	1-3 μέρες	12-24 ώρες	2-12 ώρες	2'-2ώρες	0,1''-2'
	Χωρική						
Πλανητική	> 10000 km	Κύματα Rossby					
Συνοπτική	↑ 2000km		Βαρομετρικά συστήματα				
Μέση α (ευρεία)	↑ 200km			Μέτωπα, τυφώνες			
Μέση β	↑ 20km				Βαρυτικά κύματα, καταιγίδες		
Μέση γ	↑ 2km					Τοπικές κυκλοφορίες	
Μικροκλίμακα	< 2km						Τυρβώδης ανάμιξη

Πίνακας 2.1: Χωροχρονικές κλίμακες των ατμοσφαιρικών διαδικασιών

Πάντως, χρειάζεται κάτι παραπάνω από ένα πολύπλοκο μοντέλο τόσο ο ερευνητής ώστε να αντιληφθεί καλύτερα το φαινόμενο που εξετάζει, όσο και ο προγνώστης για να

χρησιμοποιήσει με βέλτιστο τρόπο τις πληροφορίες που του παρέχει. Επιπλέον, σε ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο το οποίο αντιγράφει τη φυσική της ατμόσφαιρας, είναι απαραίτητο ένα ολοκληρωμένο σύστημα που να περιέχει πριν και μετά τεχνικές ανάλυσης. Ξεκινώντας την επεξεργασία του μοντέλου στον υπολογιστή («εκτέλεση») θα πρέπει τα αρχικά δεδομένα (1) να ελέγχονται για τυχόν λάθη και για τη συμβατότητά τους με το πρόγραμμα (data validation), (2) να παρεμβάλλονται και να αναλύονται πάνω σε ένα κανονικό πλέγμα (objective analysis) και (3) να είναι έτοιμα για την εισαγωγή τους στις εξισώσεις (initialization). Μετά την εκτέλεση του μοντέλου, τα αποτελέσματα πρέπει να επεξεργασθούν, για να δώσουν διαγνωστικές πληροφορίες και γραφικές απεικονίσεις, πριν περάσουν στο στάδιο της επεξήγησής τους. Κατά την προσομοίωση μέσης κλίμακας φαινομένων θα πρέπει τόσο οι χωρικές όσο και οι χρονικές κλίμακες ανάλυσης να είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες για συνοπτικής κλίμακας κατά μία τάξη μεγέθους ή και περισσότερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΔΑΣΙΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα σύνθετο φαινόμενο που επηρεάζεται από μια πληθώρα παραγόντων. Εκτός από τους μετεωρολογικούς παράγοντες που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, σχετίζεται επιπλέον με το ανάγλυφο μιας περιοχής, δηλαδή τους τοπογραφικούς σχηματισμούς και την καύσιμη ύλη. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν η επίδραση της τοπογραφίας και της καύσιμης ύλης στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών. Επίσης θα περιγραφεί το φαινόμενο της καύσης και οι σημαντικότερες πυρικές παράμετροι καθώς και τα μοντέλα πυρκαγιών, που χρησιμοποιούνται στην προσπάθεια της προσομοίωσης της συμπεριφοράς μιας δασικής πυρκαγιάς.

3.1 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΑ

Το υψόμετρο και ο προσανατολισμός (έκθεση) του τοπίου είναι σπουδαίοι παράγοντες για τον κίνδυνο των πυρκαγιών, επειδή και οι δύο αυτοί παράγοντες επιδρούν στην περιεκτικότητα σε υγρασία των ελαφρότερων καυσίμων δασικών υλών. Όσο αυξάνει το υψόμετρο αυξάνει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μεταβάλλεται η διαμόρφωση της βλάστησης. Υπάρχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες στα μεγαλύτερα υψόμετρα, άρα και μικρότερη απώλεια υγρασίας στην καύσιμη ύλη και μεγαλύτερη βροχόπτωση (Velez 2000). Οι νότιες εκθέσεις είναι ξηρότερες από τις βόρειες. Η δασική ύλη ξεραίνεται ταχύτερα στις νότιες, νοτιοδυτικές και δυτικές πλαγιές, παρά σε πλαγιές άλλων εκθέσεων. Όμως οι ξηρές νότιες – δυτικές πλαγιές έχουν γενικά λιγότερη βλάστηση, έτσι ώστε και οι πυρκαγιές εκεί είναι μικρότερες από αυτές των βορείων εκθέσεων (Pyne et al.1996, Velez 2000).

Η τοπογραφική διαμόρφωση παίζει επίσης σπουδαίο ρόλο στην εξάπλωση των πυρκαγιών, ιδίως σε ορεινές περιοχές όπως είναι η χώρα μας. Η κλίση επιδρά στην ταχύτητα εξάπλωσης. Όσο πιο απότομη είναι η κλίση και μεγαλύτερο το υψόμετρο, τόσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Ο άνεμος, λόγω της εκθετικής σχέσης του με το ύψος, όταν συναντήσει ένα ορεινό εμπόδιο επιταχύνεται στην κορυφή και επιβραδύνεται στους πρόποδες (Viegas 2006). Όταν ευσταθής αέρας πνέει κάθετα σε έναν ορεινό όγκο, η κυκλοφορία στην υπήνεμη πλευρά είναι στροβιλώδης με αναταράξεις που είναι πιθανό να είναι ισχυρές. Έτσι η ταχύτητα εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς είναι μεγαλύτερη προς τα ανάντη και μικρότερη προς τα κατόντη και ακόμη μικρότερη σε επίπεδα εδάφη. Η ταχύτητα εξάπλωσης είναι μεγαλύτερη προς τα ανάντη γιατί η υπερκείμενη καιγόμενη ύλη βρίσκεται πιο κοντά στις φλόγες και δέχεται μεγαλύτερη ποσότητα ακτινοβολούμενης θερμότητας (Schroeder and Buck 1970).

Η τοπογραφία μιας περιοχής είναι δυνατό να επηρεάσει τη διεύθυνση του πνέοντος ανέμου. Σε αυτή την περίπτωση η αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου έχει σημασία και σε συνδυασμό με την επίδραση της ταχύτητας του ανέμου με αυτήν της τοπογραφίας είναι

δυνατό να δημιουργήσουν εξαιρετικά απρόσμενες συνθήκες. Επιπροσθέτως, οι αλλαγές της διεύθυνσης του ανέμου λόγω της τοπογραφίας είναι δυνατό να μεταβάλλουν την κατεύθυνση του μετώπου μιας πυρκαγιάς αυξάνοντας τους κινδύνους στις δυνάμεις δασοπυρόσβεσης.

Ένα σημείο το οποίο πρέπει να προσεχθεί ιδιαίτερα είναι το φαινόμενο της «καμινάδας» κατά το οποίο έχουμε μια χαράδρωση με φορά του ανέμου από την είσοδο της προς τις κορυφές. Τυχόν πυρκαγιά που θα ξεσπάσει στην είσοδο της χαράδρας μεταδίδεται με εξαιρετικά μεγάλες ταχύτητες και είναι δυνατόν να εγκλωβίσει το προσωπικό (Viegas et al. 2005). Επίσης, ειδικές τοπογραφικές διαμορφώσεις όπως κορυφογραμμές, κοιλάδες ανάμεσα σε δύο κορυφογραμμές (διάσελα) μπορούν να δημιουργήσουν τοπικά επιτάχυνση της κίνησης του ανέμου κατά ένα ή και περισσότερους βαθμούς της κλίμακας του Beaufort (Pyne et al. 1996).

3.2 ΦΥΤΙΚΗ ΚΑΥΣΙΜΗ ΥΛΗ

Η καύσιμη ύλη διακρίνεται σε 3 κατηγορίες. Στην υπεδάφια καύσιμη ύλη (οργανική ύλη σε αποσύνθεση όπως ο χούμος, η τύρφη και οι νεκρές ρίζες). Στην καύσιμη ύλη επί του εδάφους (μέχρι 2 m από το έδαφος που περιλαμβάνει τον ξηροτάπητα, την ποώδη βλάστηση, τους θάμνους, τα φρύγανα κλπ). Στην εναέρια καύσιμη ύλη (που περιλαμβάνει τα καύσιμα υλικά πάνω από 2 m από το έδαφος όπως το φύλλωμα, οι λειχήνες, τα όρθια νεκρά δέντρα κλπ). Όλα αυτά μοιάζουν από χημική άποψη και αποτελούνται κυρίως από πολύπλοκες ενώσεις άνθρακα, υδρογόνου και οξυγόνου μαζί με ποτάσσιο, ασβέστιο και άλλα στοιχεία. Παρόλο που οι αναλογίες διαφέρουν σημαντικά, αυτές οι καύσιμες ύλες περιέχουν όσο αφορά στο ξηρό βάρος τους, περίπου 50% άνθρακα, 6% υδρογόνο 40% οξυγόνο, μια μικρή ποσότητα αζώτου και 4% ανόργανα υλικά που παράγουν τη γνωστή λευκή τέφρα που αφήνουν οι δυνατές φωτιές.

Οι βασικές καύσιμες ύλες οι οποίες είναι σημαντικές, διότι αποτελούν καύσιμη ύλη στο πέρασμα της πυρκαγιάς, είναι τα φύλλα, τα κλαδιά, ο φλοιός δέντρων, μικρά κλαριά πεσμένα στο δάσος και τα φυσικά καύσιμα που βρίσκονται στους βοσκότοπους. Αυτό συμβαίνει διότι η λεπτότερη καύσιμη ύλη κατά κανόνα ελέγχει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς (Pyne et al. 1996). Η συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς επηρεάζεται επίσης από την ποσότητα και την ποιότητα της βλάστησης (Pyne et al. 1996). Θα πρέπει να επισημανθεί το γεγονός ότι όλη η δασική βιομάζα δεν αποτελεί καύσιμη ύλη στο πέρασμα της φωτιάς, και περιοχές με τα ίδια είδη βλάστησης μπορούν να έχουν διαφορετική συμπεριφορά πυρκαγιάς διότι είναι δυνατό να παρουσιάζουν διαφορές στη περιεχόμενη υγρασία, στη χημική σύσταση, στη ποσότητα, στο μέγεθος, στο σχήμα, στη συνέχεια και στη πυκνότητα της βλάστησης.

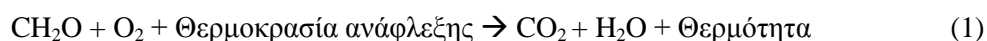
Στα δάση γενικά η ποσότητα της καύσιμης ύλης μεταβάλλεται με το χρόνο. Όσο πιο ομοιόμορφη και συνεχόμενη (κλιμακωτή) κατανομή της καύσιμης ύλης υπάρχει τόσο μεγαλύτερη και γρηγορότερη ανάφλεξη και πλήρης καύση αναμένεται, ενώ τα πολλά διάκενα στη βλάστηση διαφοροποιούν την ταχύτητα εξάπλωσης και την ένταση μιας πυρκαγιάς (Biswell 1989). Επίσης σε ένα πολύ συμπαγές πεδίο καύσιμης ύλης η κακή κυκλοφορία του αέρα δυσκολεύει την ανάφλεξη και δεν ευνοεί την καύση.

Το ξύλο περιέχει πολλές άλλες ουσίες οι οποίες αντιδρούν στην προσφορά θερμότητας με διάφορους τρόπους. Σε πολλά είδη δέντρων και θάμνων υπάρχουν ρητίνες και πτητικά έλαια που συμβάλλουν σημαντικά στην ευφλεκτότητα του διαθέσιμου καυσίμου, ειδικά στα ζωντανά φυλλώματα. Αν και μικρής ποσότητας σε σύγκριση με το σύνολο των καυσίμων, αυτά τα συστατικά έχουν συχνά άμεση ανάφλεξη. Θερμαίνοντας άλλα σωματίδια καυσίμων διατηρούν τη φωτιά σε ελαφρώς υγρά στρώματα του δάσους τα οποία διαφορετικά θα ήταν ελάχιστα εύφλεκτα (Luke and McArthur 1978).

Στην προσπάθεια κατηγοριοποίησης των φυσικοχημικών ιδιοτήτων της καύσιμης ύλης όπως αυτές αντιδρούν στην πυρκαγιά δημιουργήθηκαν τα μοντέλα καύσιμης ύλης, τα οποία είναι αποδεκτά από τα μοντέλα προσομοίωσης της συμπεριφοράς της φωτιάς. Μοντέλο καύσιμης ύλης είναι οι μέσες τιμές που αντιπροσωπεύουν τις φυσικοχημικές παραμέτρους της βλάστησης, με τέτοιο τρόπο που δύνανται να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα στα μαθηματικά και υπολογιστικά μοντέλα διάδοσης της πυρκαγιάς (π.χ. FARSITE, BehavePlus, FlamMap). Ένα μοντέλο καύσιμης ύλης αντιπροσωπεύει την καύσιμη ύλη και όχι τον τύπο βλάστησης. Έτσι, πολλοί τύποι βλάστησης που ως καύσιμη ύλη έχουν παρόμοια ή ισοδύναμα χαρακτηριστικά αντιπροσωπεύονται από το ίδιο μοντέλο.

3.3 ΚΑΥΣΗ

Καύση είναι η γρήγορη οξειδωση των καυσίμων υλικών που παράγει θερμική ενέργεια. Κάτω από ιδανικές συνθήκες, δηλαδή σε ολοκληρωμένη καύση, το κάπνισμο οργανικής ύλης είναι μια διαδικασία οξειδωσης η οποία κατά κύριο λόγο παράγει υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) σύμφωνα με την απλουστευμένη αντίδραση (1):



όπου το (CH₂O) αντιπροσωπεύει τη μέση σύνθεση οργανικής ύλης. Ωστόσο στις φυσικές φωτιές επειδή η παροχή οξυγόνου (O₂) δεν είναι ποτέ επαρκής, υπάρχει ατελής καύση. Αυτό οδηγεί στο σχηματισμό ατελώς οξειδωμένων ενώσεων (μονοξείδιο του άνθρακα ή CO) ή μειωμένων στοιχείων όπως μεθάνιο (CH₄), υδρογονάνθρακες (C_MH_N) και αμμωνία (NH₃) μεταξύ άλλων (Delmas 1995).

Τα τρία στοιχεία που χρειάζονται για την καύση τα οποία συνθέτουν το λεγόμενο “τρίγωνο της φωτιάς” και είναι απαραίτητα συστατικά για την ολοκλήρωση της καύσης είναι (Rothermel 1983, Pyne et al. 1996):

- Καύσιμη Ύλη, για να καεί.
- Θερμότητα, για την έναρξη και διατήρηση της καύσης.
- Οξυγόνο, για τις φλόγες

Η παραγωγή καπνού από τις δασικές πυρκαγιές είναι το άμεσο αποτέλεσμα της διαδικασίας καύσης. Γι’ αυτό το λόγο, οι μετεωρολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν την καύση έχουν σημαντική επίδραση στην παραγωγή καπνού και επομένως πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη λογική διαχείριση και τον έλεγχό του. Η καύση είναι μια ειδική μορφή οξειδωσης κατά την οποία μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας απελευθερώνονται με μεγάλη ταχύτητα από τα καύσιμα. Πολλές διαδικασίες οξειδωσης συμβαίνουν σταδιακά σε μεγάλες χρονικές περιόδους, και οι χημικές αλλαγές που προκύπτουν δεν ακολουθούνται από σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας (Charles 1976).

Όταν η θερμότητα προσφέρεται σε ένα ξεχωριστό κομμάτι καυσίμου είναι δυνατό να αναγνωριστούν τρεις φάσεις καύσης σε ένα κινούμενο μέτωπο φωτιάς. Η πρώτη φάση της αφυδάτωσης και της προθέρμανσης συνοδεύεται από την έναρξη της αποσύνθεσης, αλλά η αντίδραση δεν μπορεί να συνεχιστεί αν αποσυρθεί η πηγή της θερμότητας. Κατά τη δεύτερη φάση η αποσύνθεση της καύσιμης ύλης ολοκληρώνεται και συνοδεύεται από φλόγες ενώ η αντίδραση συνεχίζεται χωρίς βοήθεια. Στην τρίτη και τελευταία φάση, όταν οι υδρατμοί που παράγονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αποσύνθεσης έχουν αναλωθεί, τα υπολείμματα του απανθρακωμένου ξύλου συνεχίζουν να καίγονται μέχρι να μείνει μόνο τέφρα. Δεν υπάρχει σοβαρή δυσκολία να αναγνωριστούν αυτές οι φάσεις αν ο ρυθμός καύσης είναι αργός. Όταν τα φυσικά καύσιμα καίγονται με γρήγορους ρυθμούς μπορεί να δημιουργηθεί η εντύπωση ότι και οι τρεις φάσεις συμβαίνουν ταυτόχρονα. Όταν η θερμοκρασία της καύσιμης ύλης είναι από 330 έως 470°C έχουμε ανάφλεξη ενώ τα παραγόμενα αέρια μπορούν να αναφλεγούν παρουσία φλόγας από τους 225 έως 290°C. Από τους 260 έως 290°C τα παραγόμενα αέρια έχουν σταθερή καύση (Valianatos 1999, Viegas 2002).

3.3.1 Ανατομία Πυρκαγιάς

Σε ορισμένες περιπτώσεις οι πυρκαγιές εξαπλώνονται προς τα έξω με τον ίδιο ρυθμό προς όλες τις κατευθύνσεις και παίρνουν κυκλική μορφή, αλλά επειδή τις περισσότερες φορές επηρεάζονται από τον άνεμο και τις αλλαγές στην τοπογραφία ή τα καύσιμα και γίνονται ακανόνιστες ή επιμηκύνονται, είναι χρήσιμο να δίνονται ονόματα στα διάφορα μέρη και στους διάφορους τομείς. Η ζώνη στην οποία η φωτιά έχει τη μεγαλύτερη εξέλιξη περιγράφεται ως η κεφαλή ή ως η κυρίως κεφαλή αλλά αν υπάρχει σημαντική δράση σε

αρκετά σημεία ταυτόχρονα μπορεί να ειπωθεί ότι μια φωτιά έχει αρκετές κεφαλές ή «δακτύλους» ή ότι σχηματίζει δακτύλους και θύλακες. Η «ουρά», πίσω ή ραχιαία φωτιά είναι το κομμάτι εκείνο που καίει πίσω αργά, συνήθως αντίθετα προς τη φορά του ανέμου, αλλά μερικές φορές και κατηφορικά ή περιέχει λιγότερο εύφλεκτες καύσιμες ύλες. Οι πλευρικές ή πλάγιες φωτιές κινούνται προς τις δεξιές γωνίες στην κατεύθυνση της κεφαλής της φωτιάς, αλλά με πιο αργούς ρυθμούς από την κεφαλή. Διασώσεις είναι εκτάσεις μέσα στην περίμετρο της πυρκαγιάς οι οποίες δεν κάηκαν. Ψευδομέτωπα (σημειακές φωτιές) είναι οι πυρκαγιές που προκαλούνται μπροστά από το κυρίως μέτωπο της πυρκαγιάς εξαιτίας του φαινομένου της κηλίδωσης (Σχήμα 3.1) (Rothermel 1983, Alexander 2000).



Σχήμα 3.1: Η ανατομία μιας δασικής πυρκαγιάς (Πηγή: Alexander 2000)

3.4 ΠΥΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

3.4.1 Θερμική Ένταση και Εξάπλωση Πυρκαγιάς

Για να μετρήσουμε τη θερμική ένταση του μετώπου της πυρκαγιάς ή τη θερμότητα που παράγεται από ένα καθορισμένο μήκος του μετώπου της φωτιάς σε καθορισμένο χρόνο πρέπει να ληφθεί υπόψη το συνολικό ποσό εύφλεκτων καυσίμων σε μια περιοχή καθώς επίσης και ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς. Η ένταση της φωτιάς μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (2) (Rothermel 1991):

$$I = 1/60 \times H \times W \times R \quad (2)$$

όπου,

I = η θερμική ένταση του μετώπου της πυρκαγιάς σε kJ/sec m ή kW/m.

H = η θερμότητα που παράγεται ανά μάζα καύσιμης ύλης σε kJ/kg.

W = η μάζα της διαθέσιμης καύσιμης ύλης ανά μονάδα επιφάνεια σε kg/m².

R = η ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς σε m/sec.

Η ένταση της ακτινοβολίας μειώνεται όσο αυξάνει η απόσταση από την πηγή θερμότητας. Στην περίπτωση που υπάρχει μόνο μια πηγή θερμότητας που είναι σημειακή ή σχετικά μικρών διαστάσεων, η θερμότητα που μεταδίδεται σε οποιοδήποτε σημείο είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το τετράγωνο της απόστασης από την πηγή. Όταν υπάρχει ένα ευρύ συνεχές μέτωπο φωτιάς αυτό δεν μπορεί πλέον να εφαρμοστεί σαν ένας απλός τύπος επειδή οι καύσιμες ύλες και οι πυροσβέστες εκτίθενται σε σημαντικά πιο αυξημένη θερμότητα σε σχέση με όταν υπάρχει μόνο μια πηγή ακτινοβολίας. Επομένως για τις διδιάστατες πηγές μειώνεται ανάλογα με την απόσταση, ενώ για τις τρισδιάστατες, για μικρές αποστάσεις από το μέτωπο της πυρκαγιάς, δεν υπάρχει μείωση με την απόσταση.

Εκτός από την ένταση του μετώπου, μια άλλη σημαντική πυρική παράμετρος είναι η ταχύτητα εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς. Είναι δυνατόν να υπολογιστεί από την εξίσωση (3) που βασίζεται στον πρώτο και στο δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής (Rothermel 1972):

$$R = \frac{I_R \times \xi \times (1 + \phi_w + \phi_s)}{\rho_b \times \varepsilon \times Q_{ig}} \quad (3)$$

όπου,

R = η ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min).

I_R = η θερμική ένταση αντίδρασης (reaction intensity), ένα μέτρο του συνολικού ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας του μετώπου της πυρκαγιάς (kW/m²).

ξ = η αναλογία ροής διάδοσης (propagating flux ratio), ένας αριθμός ο οποίος δείχνει το ποσοστό της θερμικής έντασης αντίδρασης που προθερμαίνει τα παρακείμενα σωματίδια καυσίμου (χωρίς μονάδες).

ϕ_w = ο παράγοντας ανέμου (wind factor), ο οποίος αντιπροσωπεύει έναν πολλαπλασιαστικό για το συνυπολογισμό της αυξημένης ταχύτητας εξάπλωσης της φωτιάς που προκύπτει από

την επαύξηση της ακτινοβολίας, μεταφοράς θερμότητας και ροής οξυγόνου από τον άνεμο (χωρίς μονάδες).

$\phi_s =$ ο παράγοντας κλίσης (slope factor), ο οποίος συνυπολογίζει την επαύξηση της ακτινοβολίας, μεταφοράς θερμότητας και ροής του αέρα λόγω της αύξησης της κλίσης (χωρίς μονάδες).

$\rho_b =$ η πυκνότητα όγκου του πεδίου της καύσιμης ύλης (fuelbed bulk density), που αφορά την ποσότητα των καυσίμων που καταλαμβάνει η μονάδα του όγκου (kg/m^3).

$\varepsilon =$ ο ενεργός αριθμός θέρμανσης (effective heating number), ένα μέτρο του κλάσματος του δυναμικού καυσίμου που πρέπει να ανέλθει σε θερμοκρασία ανάφλεξης (χωρίς μονάδες).





$Q_{ig} =$ η θερμότητα προανάφλεξης (heat of preignition), που είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας που απαιτείται για την ανάφλεξη (kJ/kg).

Η θερμική ένταση της αντίδρασης I_R πολλαπλασιασμένη με το χρόνο παραμονής της φλόγας στο έδαφος, που είναι συνάρτηση της διαμέτρου της καύσιμης ύλης, μας δίνει μια νέα πυρική παράμετρο, την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας που υπολογίζεται σε kJ/m^2 . Κάποιες πυρικές παράμετροι μπορούν εύκολα να παρατηρηθούν στο πεδίο, όπως η ταχύτητα εξάπλωσης ενώ άλλες μπορεί να μην παρατηρούνται τόσο εύκολα, όπως για παράδειγμα η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας ή η θερμική ένταση μετώπου.

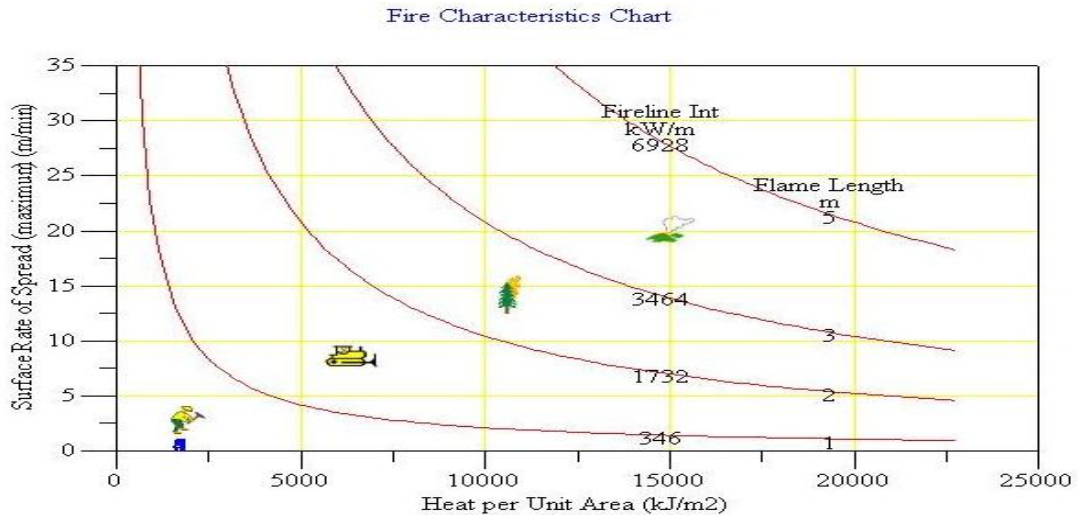
3.4.2 Διάγραμμα Χαρακτηριστικών Πυρκαγιάς

Η θερμική ένταση του μετώπου (fireline intensity) που αναφέρεται και ως ένταση Byram είναι το πιο κοινό και πιο χρήσιμο μέγεθος μέτρησης της έντασης μιας πυρκαγιάς και μετριέται σε kW/m . Εξαρτάται από την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας και την ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς και είναι ισοδύναμη με την θερμότητα που εκλύεται από μία μονάδα μήκους του μετώπου στη μονάδα του χρόνου (Chandler et. al 1983). Έχει βρεθεί ότι η θερμική ένταση του μετώπου σχετίζεται στενά με κάποια σημαντικά χαρακτηριστικά μιας πυρκαγιάς. Η θερμική ένταση, το μήκος της φλόγας όπως και η ταχύτητα εξάπλωσης συνδέονται με τη θερμότητα που νοιώθει κάποιος, ο οποίος στέκεται δίπλα στις φλόγες. Έχει προκύψει ένας πίνακας που αντιστοιχεί κατά προσέγγιση τις τιμές του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες άμεσης προσβολής (για φλόγες $< 3 \text{ m}$) και έμμεσης προσβολής (για φλόγες $> 3 \text{ m}$) για καταστολή των πυρκαγιών από επίγειες και εναέριας δυνάμεις δασοπυροσβεστών και μηχανημάτων, κατά περίπτωση (Byram 1959) (Πίνακα 3.1).

Οι κατηγορίες του Πίνακα 3.1 φαίνονται και στο διάγραμμα πυρικών χαρακτηριστικών του παρακάτω σχήματος που προκύπτει από το σύστημα πρόβλεψης της συμπεριφοράς πυρκαγιάς BehavePlus, και στηρίχθηκε στις εργασίες των ερευνητών F. Albini, P. Andrews και R. Rothermel. Το διάγραμμα χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς (Σχήμα 3.2) απεικονίζει τη δυσκολία καταστολής και εκτιμά τη μέγιστη ταχύτητα εξάπλωσης και ένα από τα ακόλουθα τρία χαρακτηριστικά της φωτιάς: εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας, θερμική ένταση μετώπου και μήκος φλόγας. Επίσης δίνει τα όρια για τις προσπάθειες ελέγχου της πυρκαγιάς, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις δυνάμεις δασοπυρόσβεσης. Έτσι, τα επείγεια συνεργεία με χειρονακτικά εργαλεία θα είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν πυρκαγιές με μήκη φλόγας μέχρι 1 m, ενώ οι εκσκαφείς είναι δυνατό να απαιτηθούν για τις πυρκαγιές με φλόγες έως 2 m. Η καταστολή μπορεί να είναι δύσκολη, αν τα μήκη φλόγας ανέρχονται στα 3 m, λόγω λαμπαδιάσματος μεμονωμένων δένδρων και κηλίδωσης, και γίνεται πολύ δύσκολη έως αδύνατη όταν τα μήκη φλόγας φθάνουν ή υπερβαίνουν τα 4-5 m με τις αντίστοιχες θερμικές εντάσεις του μετώπου πυρκαγιάς, δηλαδή εμφάνιση πυρκαγιών με ακραία και εκρηκτική συμπεριφορά.

Μήκος Φλόγας (m)	Θερμική Ένταση Μετώπου (kW/m)	Τρόποι Καταστολής
< 1,2	< 350	 Η πυρκαγιά μπορεί γενικά να αντιμετωπιστεί με άμεση προσβολή κατά μέτωπο ή πλευρικά, χρησιμοποιώντας ανθρώπινο δυναμικό με εργαλεία χειρός και χειρονακτική εκσκαφή αντιπυρικής γραμμής.
1,2 – 2,4	350 – 1.750	 Η πυρκαγιά είναι αρκετά έντονη για άμεση προσβολή στο μέτωπο από δασοπυροσβέστες με εργαλεία χειρός. Η χειρονακτική αντιπυρική γραμμή δεν μπορεί να κρατήσει την πυρκαγιά. Μηχανικά μέσα όπως εκσκαφείς, κρουνοί, πυροσβεστικά οχήματα και αεροσκάφη με επιβραδυντικά υγρά μπορεί να είναι αποτελεσματικά.
2,4 – 3,4	1.750 – 3.500	 Οι πυρκαγιές μπορεί να παρουσιάσουν σοβαρά προβλήματα ελέγχου, με άναμμα και μεταφορά στην κόμη των δένδρων, κηλίδωση και αναζωπυρώσεις. Οι προσπάθειες ελέγχου στο μέτωπο της πυρκαγιάς καθίστανται μάλλον αναποτελεσματικές.
> 3,4	> 3.500	 Πρόκειται για μεγάλες πυρκαγιές ισχυρής έντασης που δύσκολα τίθενται υπό έλεγχο. Πυρκαγιές κόμης με κηλίδωση και μεγάλες ταχύτητες εξάπλωσης είναι πιθανές. Οι άμεσες μέθοδοι θεωρούνται επικίνδυνες και αναποτελεσματικές. Πρέπει να εφαρμοστούν έμμεσοι μέθοδοι καταστολής με χρήση εναέριων μέσων (αεροσκάφη, ελικόπτερα) και δημιουργία αντιπυρικής ζώνης σε απόσταση ασφαλείας από το μέτωπο της επερχόμενης πυρκαγιάς.

Πίνακας 3.1: Αντιστοίχιση των τιμών του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες καταστολής μιας πυρκαγιάς (Byram 1959)



Σχήμα 3.2: Μεταβολή της ταχύτητας εξάπλωσης ανάλογα με την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας -- κατηγορίες ανάλογα με τις ενέργειες καταστολής του Πίνακα 3.1 (Rothermel and Andrews 1982)

3.4.3 Κατηγορίες Πυρκαγιών

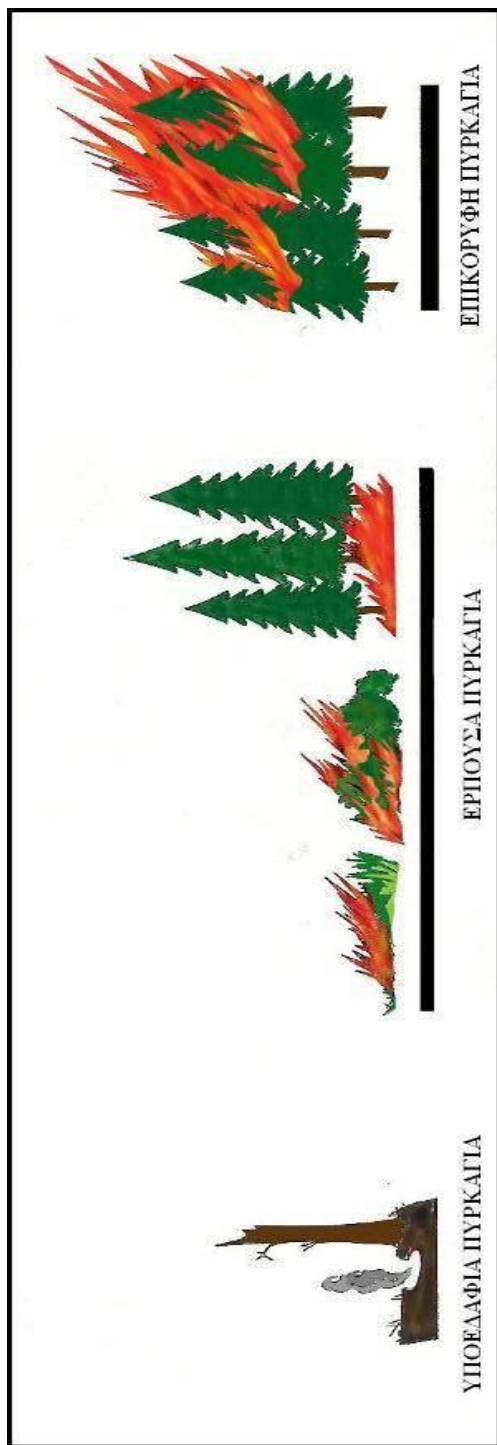
Οι δασικές πυρκαγιές ανάλογα με το στρώμα βλάστησης στο οποίο εξαπλώνονται κατατάσσονται σε τρεις βασικούς τύπους (Σχήμα 3.3):

1. Πυρκαγιές εδάφους ή υπόγειες. Οι υπόγειες πυρκαγιές είναι φωτιές που εξαπλώνονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους σε οργανικό υλικό όπως οι ρίζες, ο χούμος, οι θαμμένοι σάπιοι κορμοί και η τύρφη (Pyne et al. 1996, Sandberg et al. 2001). Οι πυρκαγιές εδάφους είναι δυνατό να προκαλούνται από τις πυρκαγιές επιφανείας. Τις πιο πολλές φορές καίνε ανεξάρτητα από τις πυρκαγιές επιφανείας.

2. Πυρκαγιές επιφανείας ή έρπουσες. Έρπουσες πυρκαγιές είναι αυτές που καίνε επιφανειακά καύσιμα στο έδαφος ή σε μικρό ύψος από αυτό (περίπου μέχρι 2 m), (Pyne et al. 1996). Τα επιφανειακά καύσιμα είναι οι πεσμένοι κορμοί, οι πευκοβελόνες, τα φύλλα, πεσμένα κλαδιά, υπολείμματα υλοτομιών κ.λπ. Οι έρπουσες πυρκαγιές όταν καίνε σε πευκοδάση εξελίσσονται συνήθως σε μικτές πυρκαγιές επιφανείας και κόμης.

3. Πυρκαγιές κόμης ή επικόρυφες. Οι επικόρυφες πυρκαγιές είναι μεγάλες πυρκαγιές με ακραία συμπεριφορά που καίνε την εναέρια καύσιμη ύλη στον ανώροφο του δάσους (Pyne et al. 1996, Van Wagner 1977). Τα εναέρια καύσιμα αποτελούνται από φυλλώματα, ψηλούς θάμνους, κορυφές, κλαδιά δένδρων κ.λπ. Συνήθως εξαρτώνται από τις

έρπουσες, δημιουργώντας μία μικτή πυρκαγιά, ενώ όταν κινούνται ανεξάρτητα, είναι πολύ δύσκολο να αντιμετωπιστούν.



Σχήμα 3.3: Οι τρεις βασικοί τύποι συμπεριφοράς πυρκαγιών: υπόγεια ή πυρκαγιά εδάφους, έρπουσα ή πυρκαγιά επιφανείας και επικόρυφη ή πυρκαγιά κόμης (Πηγή: Countryman, 1972)

3.4.4 Ακραία και Επικίνδυνη Συμπεριφορά Πυρκαγιάς

Μια πυρκαγιά που βρίσκεται σε εξέλιξη αναπτύσσει ακραία και επικίνδυνη συμπεριφορά όταν η καύση της συνδυάζεται με την ανάφλεξη άκαυτης καύσιμης ύλης μπροστά από το μέτωπο της, μεγαλώνοντας σε διάσταση και ένταση, ενώ κάτω από ορισμένες συνθήκες, είναι δυνατό να μετατραπεί σε επικόρυφη με πέταγμα καυτρών μέσω του φαινομένου της κηλίδωσης. Επίσης, άλλες εκρηκτικές συμπεριφορές, πιο σπάνιες βέβαια, περιλαμβάνουν φλεγόμενες δίνες ή πύρινους στροβίλους και καταιγίδες πυρκαγιών οι οποίες προκαλούν σημαντικά προβλήματα στον έλεγχο και στην καταστολή τους.

Ανάλογα με τις συνθήκες του περιβάλλοντος της πυρκαγιάς που μπορεί να ευνοούν την ακραία συμπεριφορά της φωτιάς είναι δυνατό να προκύψουν καταστροφικές πυρκαγιές. Δασικές πυρκαγιές κόμης με κηλίδωση συμβάλλουν στη δημιουργία πυρκαγιάς μεγάλης έντασης και ταχύτητας με ακραίες συνθήκες καύσης. Ο συνδυασμός ισχυρών ανέμων, χαμηλής υγρασίας καυσίμων, μεγάλης κλίσης του εδάφους, καθώς και η ίδια η φωτιά είναι σημαντικοί παράγοντες στη δημιουργία μεγα-πυρκαγιών. Οι πιο επικίνδυνες και συνηθισμένες πυρκαγιές είναι οι πυρκαγιές κόμης και οι πυρκαγιές κηλίδωσης.

Οι πυρκαγιές κόμης (επικόρυφες) διακρίνονται σε τρεις τύπους: α) παθητικές εάν η φωτιά που κινείται στις κόμης των δένδρων εξαρτάται από τη θερμότητα της έρπουσας πυρκαγιάς, β) ενεργές εάν η φωτιά εξαπλώνεται συγχρόνως με την έρπουσα πυρκαγιά, και γ) ανεξάρτητες εάν εξαπλώνονται ανεξάρτητα από τη φωτιά στην επιφανειακή καύσιμη ύλη (Van Wagner 1977, Finney 2007).

Οι πυρκαγιές κόμης χωρίζονται επίσης, ανάλογα με τη σχέση ανάμεσα στη δύναμη της φωτιάς και στη δύναμη του ανέμου, ως πυρκαγιές καθοδηγούμενες από τον άνεμο ή ως πυρκαγιές που κυριαρχούνται από τη στήλη (πλούμιο) καύσης τους. Μία επικόρυφη πυρκαγιά η οποία εξαπλώνεται γρήγορα μπορεί να προκύψει όταν οι άνεμοι αυξάνουν την ένταση και οι φλόγες καίνε τις κόμης των γειτονικών δέντρων. Μία τέτοια πυρκαγιά συνοδεύεται από κηλίδωση, φλεγόμενους στροβίλους, καπνό και γρήγορη ανάπτυξη μιας κατακόρυφα σχηματισμένης στήλης καύσης ή πλουμίου. Κάτω από ασταθείς καιρικές συνθήκες δημιουργούνται οργανωμένα πλούμια που μπορούν να κυριαρχήσουν στη συμπεριφορά της φωτιάς με ανοδικά και καθοδικά ρεύματα αέρα.

3.5 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Υπήρξε η ανάγκη να περιγραφεί η συμπεριφορά και η εξάπλωση μιας πυρκαγιάς που ξεσπά σε μια δασική περιοχή και απειλεί ανθρώπινες ζωές καθώς και το φυσικό περιβάλλον. Δημιουργήθηκαν για αυτό το λόγο τα μαθηματικά μοντέλα πυρκαγιών. Τα μοντέλα αυτά διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τις αρχές δημιουργίας τους (εμπειρικά, ημι-εμπειρικά,

στατιστικά, φυσικά κ.α.) και ως προς τις συνθήκες και δυνατότητες εφαρμογής τους. Είναι συνήθως δυσδιάστατα ή τρισδιάστατα, χρονικά εξαρτημένα και αποτελούνται από ένα συνδεδεμένο μοντέλο ατμόσφαιρας-πυρκαγιάς. Προσομοιώνουν τις δασικές πυρκαγιές χρησιμοποιώντας τις θεμελιώδεις εξισώσεις της κίνησης και της θερμοδυναμικής καθώς και τις διαδικασίες θερμικής μεταφοράς με σκοπό να απεικονίσουν τις περιβαλλοντικές και μετεωρολογικές συνθήκες (Albright and Meisner 1999).

Οι Albright και Meisner (1998) διέκριναν τα μοντέλα πυρκαγιών σε τέσσερις κατηγορίες.

- Τα φυσικά ή θεωρητικά μοντέλα, τα οποία έχουν περιορισμούς λόγω ότι είναι υποχρεωμένα να περιγράψουν όλες τις φυσικοχημικές διαδικασίες κατά τη διάρκεια της καύσης και της ανάπτυξης της πυρκαγιάς με αποτέλεσμα να αποτελούνται από πολύπλοκες εξισώσεις που είναι χρονοβόρες να λυθούν (Albright and Meisner 1999).
- Τα ημι-εμπειρικά μοντέλα, τα οποία αποτελούν ένα συνδυασμό των φυσικών και των εμπειρικών ή στατιστικών μοντέλων. Λαμβάνουν υπόψη τους νόμους της φυσικής για την καύση και τη μετάδοση θερμότητας σε συνδυασμό με στατιστικούς συσχετισμούς που βασίζονται στη παρατήρηση, με σκοπό τη περιγραφή της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς (Pastor et. al. 2003, Albright and Meisner 1999).
- Τα εμπειρικά ή στατιστικά μοντέλα δε λαμβάνουν υπόψη τους νόμους της φυσικής και της χημείας όσο αναφορά την περιγραφή της καύσης και της ταχύτητας μιας πυρκαγιάς. Στηρίζονται σε εμπειρικές φόρμες με βάση τη παρατήρηση στο πεδίο της πυρκαγιάς ή στο εργαστήριο. Αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού είναι να περιορίζονται αυστηρά στις συγκεκριμένες τοπικές συνθήκες όπου έχουν εξαχθεί οι φόρμες παρατήρησης (Chandler et al. 1983, Catchpole and De Mestre 1986).
- Τα πιθανολογικά μοντέλα δε λαμβάνουν υπόψη ούτε τους νόμους της φυσικής και της χημείας όσο αναφορά την περιγραφή της καύσης και της ταχύτητας μιας πυρκαγιάς, ούτε τις εμπειρικές φόρμες με βάση τη παρατήρηση στο πεδίο της πυρκαγιάς ή στο εργαστήριο. Στηρίζονται σε πίνακες ενδεχομένων (Albright and Meisner 1999). Σε αυτό το σύστημα κάθε περιβαλλοντική μεταβλητή συνδέεται με κάθε δυνατή περιβαλλοντική κατάσταση και πίνακες δημιουργούνται με τις σχετικές πιθανότητες. Από τη στιγμή που δε βασίζονται σε φυσικές ή στατιστικές εξισώσεις περιορίζονται αυστηρά στις συγκεκριμένες τοπικές συνθήκες. Συνήθως περιορίζονται στη προσομοίωση έναρξης μιας πυρκαγιάς και τη πιθανή ταχύτητα εξάπλωσης μιας

σειράς υποθετικών πυρκαγιών στο τοπίο και όχι στην πρόγνωση της ταχύτητας εξάπλωσης μιας συγκεκριμένης πυρκαγιάς (Albright and Meisner 1999).

Τα εμπειρικά και τα ημι-εμπειρικά μοντέλα έχουν περισσότερη πρακτική εφαρμογή. Τα πιο ευρέως διαδεδομένα και διεθνώς αποδεκτά μοντέλα, είναι το BEHAVE και FARSITE, που βασίζονται στην πρότυπη εξίσωση πρόβλεψης διάδοσης πυρκαγιάς του Rothermel (Rothermel 1972) και περιγράφουν τη διάδοση και συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της καύσιμης ύλης, της τοπογραφίας και των μετεωρολογικών συνθηκών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

4.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ

Κλίμα είναι η μέση κατάσταση της ατμόσφαιρας σε μια μεγάλη περιοχή για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (τουλάχιστον 30 χρόνια). Η μέση κατάσταση καθορίζεται από τις μέσες τιμές και τις διακυμάνσεις των τιμών των διαφόρων μετεωρολογικών στοιχείων, όπως είναι η βροχόπτωση, ο άνεμος, η ηλιοφάνεια, η νέφωση, η ομίχλη, η θερμοκρασία, η υγρασία και η πίεση. Το κλίμα μιας περιοχής εξαρτάται κυρίως από τα καιρικά συστήματα που την επηρεάζουν καθώς και από τη μορφολογία της ίδιας της περιοχής.

Οι κλιματικές συνθήκες της Μεσογείου μπορούν να διαχωριστούν σε θερμές και ψυχρές περιόδους (Maheras et al. 1999). Η ψυχρή εποχή του έτους χαρακτηρίζεται από έντονη κυκλωνική ατμοσφαιρική κυκλοφορία. Η θερμή περίοδος του έτους χαρακτηρίζεται από ατμοσφαιρική κυκλοφορία όπου τα βαρομετρικά χαμηλά του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού εκτείνονται ως την Ευρώπη και μόνο οι άκρες των μετώπων φτάνουν έως την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (Kallos et al. 1993, Kassomenos et al. 1995).

Το κλίμα της ανατολικής Μεσογείου επηρεάζεται από διάφορα καιρικά συστήματα. Τέτοια συστήματα είναι οι αντικυκλώνες ή συστήματα υψηλής πίεσης, οι κυκλώνες ή υφέσεις ή βαρομετρικά χαμηλά, οι μετωπικές υφέσεις, τα θερμά μέτωπα, τα ψυχρά μέτωπα, οι σφήνες χαμηλής πίεσης και οι σφήνες υψηλής πίεσης. Τα συστήματα αυτά σχετίζονται με τα μεγάλα μόνιμα συστήματα πίεσης του Ατλαντικού, της Αφρικής και της Ευρασίας. Τα μόνιμα αυτά καιρικά συστήματα είναι τα εξής κατά τη διάρκεια του έτους:

Χειμώνας

Ο μόνιμος υποτροπικός αντικυκλώνας των Αζορών.

Ο Σιβηρικός αντικυκλώνας.

Το βαρομετρικό χαμηλό της ερήμου της Βόρειας Αφρικής και της τροπικής περιοχής του Ατλαντικού.

Καλοκαίρι

Ο μόνιμος υποτροπικός αντικυκλώνας των Αζορών.

Το βαρομετρικό χαμηλό της νοτιοδυτικής Ασίας.

Το βαρομετρικό χαμηλό της Σαχάρας (Mintz and Dean 1952).

Εκτός από τα πιο πάνω μόνιμα καιρικά συστήματα, την περιοχή της ανατολικής Μεσογείου επηρεάζουν και δύο άλλα, ημιμόνιμα ισχυρά ρεύματα, τα οποία είναι γνωστά σαν αεροχειμαρροι. Συνοπτικά συμβαίνει το εξής: στην ατμόσφαιρα, στα ανώτερα στρώματα αυτής, κυκλοφορεί ένα πολύ ισχυρό ρεύμα ανέμων, της τάξης των 100-150 ναυτικών μιλίων

την ώρα, ο λεγόμενος αεροχειμάρρος (jetstream) - ο πολικός στα μέσα πλάτη και ο υποτροπικός (κατά κανόνα ασθενέστερος) στις υποτροπικές περιοχές, οι οποίοι, ανάλογα με την εποχή, παρουσιάζουν διακυμάνσεις όσο αφορά το ύψος, τη θέση και την έντασή τους (Schroeder and Buck 1970). Κατά τη χειμερινή περίοδο, που η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ ψυχρών και θερμών αέριων μαζών (Βορρά - Νότου) είναι μεγαλύτερη, οι αεροχειμάρροι είναι ισχυρότεροι. Ο πολικός μετακινείται πλησιέστερα προς τον Ισημερινό, καθώς οι ψυχρές πολικές αέριες μάζες ωθούνται νοτιότερα, ενώ το καλοκαίρι «αποσύρεται» βορειότερα. Ο υποτροπικός αεροχειμάρρος, που μεταφέρει θερμές και υγρές αέριες μάζες προς βορρά, τη θερινή περίοδο μετατοπίζεται νότια, εξασθενεί σημαντικά και σπάνια κάνει την εμφάνισή του.

Όταν ο υποτροπικός αεροχειμάρρος βρίσκεται πάνω από την Ελλάδα ή και νοτιότερα της Κρήτης, χωρίς όμως να θεωρείται αφύσικη η θέση του πάνω από τα Βαλκάνια (το καλοκαίρι συνήθως), καθοδηγεί τις ατμοσφαιρικές διαταραχές και αποτελεί εμπόδιο στην κάθοδο των μετωπικών επιφανειών κάτω από αυτόν. Η ροή του είναι κυρίως από ΝΔ προς ΒΑ και έτσι κάθε μετωπική επιφάνεια που έρχεται στη δυτική Ευρώπη από τον Ατλαντικό, κατευθύνεται προς την κεντρική και τη βόρεια Ευρώπη, με τα νότια τμήματά της να επηρεάζουν παροδικά τις βορειοδυτικές περιοχές της χώρας μας. Παράλληλα με το νοτιοδυτικό ρεύμα που υπάρχει στα χαμηλά της ατμόσφαιρας, μεταφέρονται σχετικά θερμές αέριες μάζες από τα βόρεια στρώματα της Αφρικής. Επιπλέον, οι καθοδικές κινήσεις του αέρα, καθώς η Ελλάδα βρίσκεται υπό την επίδραση υψηλών βαρομετρικών πιέσεων, δημιουργούν έναν ακόμη παράγοντα για αύξηση της θερμοκρασίας (Balafoutis and Makrogiannis 2000). Όσο θα διατηρείται αυτή η κατάσταση στην ανώτερη ατμόσφαιρα, στην Ελλάδα θα συνεχίζεται η ανομβρία και θα αυξάνει ο κίνδυνος πρόκλησης δασικών πυρκαγιών.

Η κυκλοφορία της ατμόσφαιρας στην περιοχή των Αζορών όπου επικρατούν υψηλές πιέσεις (φαινόμενο γνωστό ως «ο αντικυκλώνας των Αζορών») δημιουργεί μια σχεδόν μόνιμη αντικυκλωνική περιοχή στον Ατλαντικό Ωκεανό. Δηλαδή, ο αντικυκλώνας παραμένει στην περιοχή χειμώνα-καλοκαίρι, αλλά τους χειμερινούς μήνες καταλαμβάνει μικρή έκταση ενώ τους θερινούς καλύπτει σχεδόν όλον τον Βόρειο Ατλαντικό. Αυτή η μετακίνηση του συστήματος επηρεάζει το κλίμα της Ευρώπης.

Ο αντικυκλώνας κάποιες φορές μετατοπίζεται πέρα από την Ιβηρική χερσόνησο, δηλαδή προς τη Γαλλία, τη Βόρεια Γερμανία, ακόμη και τη Νότια Αγγλία. Όταν συγχρόνως με την μετατόπιση παρατηρείται στην κατώτερη στάθμη της ατμόσφαιρας, έντονη μεταφορά θερμών αέριων μαζών από τις ακτές της Αφρικής, είναι δυνατό να οδηγήσουν σε μεγάλα επεισόδια καύσωνα. Αυτό συμβαίνει διότι οι κατολισθήσεις των αέριων μαζών του αντικυκλώνα θερμαίνουν περισσότερο τα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα.

Κάθε καλοκαίρι, οι υψηλές πιέσεις που υπάρχουν στην Κεντρική και στη Δυτική Ευρώπη επεκτείνονται νοτιοανατολικά προς τα Βαλκάνια, συνδυάζονται με τις χαμηλές πιέσεις στην περιοχή της Μέσης Ανατολής - Πακιστάν και προκαλούν στην περιοχή μας συνθήκες μελτεμιού (Ετησίες) ή αλλιώς «Βόρεια κυκλοφορία». Ο συνδυασμός των μελεμιών με συνθήκες ξηρασίας αυξάνει το δείκτη κινδύνου πρόκλησης καταστροφικών δασικών πυρκαγιών.

Υπάρχει περίπτωση να παρατηρείται, τους καλοκαιρινούς μήνες, μεγάλη συχνότητα διελεύσεων βαρομετρικών χαμηλών από τη Βορειοδυτική προς την Κεντρική Ευρώπη με αποτέλεσμα να ενισχύονται οι ΒΔ άνεμοι στον Ελλαδικό χώρο. Καθοριστικό ρόλο για να δημιουργηθεί αυτή η ροή έχει ο πολικός αεροχείμαρρος που η ροή του είναι κυρίως από ΒΔ προς ΝΑ. Με αυτόν τον τρόπο εμποδίζει τον αντικυκλώνα των Αζορών να επεκταθεί ανατολικότερα, έτσι καταστρέφει τις συνθήκες δημιουργίας Βόρειας κυκλοφορίας, ενώ παράλληλα τα χαμηλά από την Ιταλία προκαλούν ενίσχυση των ΒΔ ανέμων κυρίως στην περιοχή του Ιονίου με κίνδυνο δημιουργίας ανεξέλεγκτων δασικών πυρκαγιών σε άνομβρες περιοχές (Trewartha and Horn 1985).

4.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

Παρά την αλματώδη πρόοδο της επιστήμης, δεν υπάρχει ακόμα σαφής απάντηση στα θεμελιώδη ερωτήματα για τη δημιουργία των ακραίων καιρικών φαινομένων και τη σχέση τους με την κλιματική αλλαγή. Ο τοπικός χαρακτήρας και η σχετικά σύντομη διάρκεια εκδήλωσης αυτών των φαινομένων, σε συνδυασμό με την έλλειψη δεδομένων, καθιστά ακόμα δύσκολη την εύρεση ενός προτύπου που να συνδέει την κλιματική αλλαγή με τα ακραία καιρικά φαινόμενα και συγκεκριμένα με την πρόκληση μεγάλων δασικών πυρκαγιών. Υπάρχει, πάντως, η τεκμηριωμένη πεποίθηση στην επιστημονική κοινότητα ότι στο μέλλον, η κλιματική αλλαγή θα έχει σημαντικές επιπτώσεις στη συχνότητα, στην ένταση και στην έκταση στην οποία θα εκδηλώνονται τα ακραία καιρικά φαινόμενα.

Μία θέση που ενστερνίζεται πλήθος επιστημόνων, υποστηρίζει ότι τα ακραία καιρικά φαινόμενα είναι απόρροια του φαινομένου του θερμοκηπίου και του El Nino, ένα θερμό θαλάσσιο ρεύμα που εμφανίζεται στην περιοχή του ισημερινού στον Ειρηνικό Ωκεανό, αλλά επηρεάζει τον καιρό σε πολλές περιοχές της γης. Οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και των άλλων αερίων του θερμοκηπίου συμβάλλουν στην αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Η ατμοσφαιρική κυκλοφορία διαταράσσεται, με αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας εμφάνισης του φαινομένου του El Nino. Αυτό, με τη σειρά του, διαχέει αυτή τη θερμότητα σε όλο τον πλανήτη, τροποποιώντας τις καιρικές συνθήκες σε παγκόσμια κλίμακα που έχουν ως αποτέλεσμα ήπιες μεταβολές μέχρι εκτεταμένες καταστροφές.

Μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας θεωρεί το El Nino ως τη μεγαλύτερη μεμονωμένη καιρική διαταραχή στον πλανήτη και την κυριότερη αιτία της μεταβολής του κλίματος. Την τελευταία δεκαετία, τα επεισόδια El Nino που εμφανίστηκαν ήταν τα μεγαλύτερα σε διάρκεια και συχνότητα, μία τάση που σύμφωνα με τους επιστήμονες, αναμένεται να συνεχιστεί και τα επόμενα χρόνια. Οι ερευνητές, όμως, έχουν συνδέσει το El Nino με διάφορα παγκόσμια φαινόμενα, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Μία συσχέτιση που αποτελεί το αντικείμενο μελέτης με σκοπό την κατανόηση, αλλά και την πρόβλεψη των παγκόσμιων κλιματικών αλλαγών.

4.3 Ο ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΛ ΝΙΝΙΟ (EL NINO)

Το El Nino είναι ένα κλιματολογικό πρότυπο που παρουσιάζει ακανόνιστη περιοδικότητα και λαμβάνει χώρα στις τροπικές περιοχές του Ειρηνικού Ωκεανού με κατεύθυνση προς τις δυτικές ακτές της Ν. Αμερικής. Το όνομά του, που στα ισπανικά σημαίνει «το αγόρι» ή πιο ειδικά, «θείο βρέφος», του δόθηκε από ψαράδες, καθώς το φαινόμενο στη Νότια Αμερική παρατηρείται κοντά στα Χριστούγεννα.

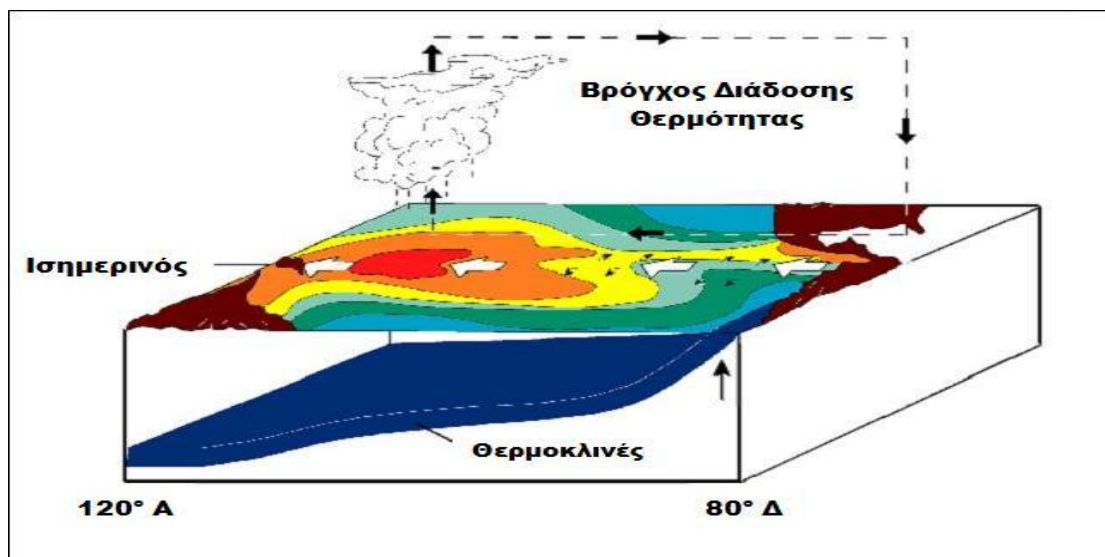
Το El Nino συνδέεται άμεσα με τη Νότια Κύμανση (Southern Oscillation), την κύμανση δηλαδή της ατμοσφαιρικής πίεσης ανάμεσα στον δυτικό και ανατολικό Ειρηνικό Ωκεανό. Όταν επικρατούν υψηλές πιέσεις στον δυτικό Ειρηνικό Ωκεανό, στον ανατολικό Ειρηνικό Ωκεανό επικρατούν χαμηλές και αντιστρόφως, όπως συμβαίνει στο La Nina. Και τα δυο φαινόμενα μαζί αποτελούν τις δυο όψεις ενός σύνθετου ωκεάνιου ατμοσφαιρικού φαινομένου παγκόσμιας κλίμακας, το οποίο ονομάζεται ENSO (El Nino Southern Oscillation).

Πρόκειται για ένα κλιματικό φαινόμενο που εμφανίζεται σε άτακτα χρονικά διαστήματα, συνήθως από δυο έως επτά χρόνια (η μέση περίοδος επανεμφάνισης είναι πέντε χρόνια) και μπορεί να διαρκέσει από εννέα μήνες έως δύο χρόνια. Για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού και τις επιπτώσεις του El Nino, θα πρέπει να γίνει αναφορά στις κανονικές κλιματολογικές συνθήκες στην τροπική περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού αλλά και στις επικρατούσες συνθήκες κατά την εκδήλωση του φαινομένου.

4.3.1 Φυσιολογικές Συνθήκες

Υπό φυσιολογικές συνθήκες, οι υψηλές πιέσεις που επικρατούν στα ανατολικά, προκαλούν αληγείς ανέμους που πνέουν προς τα δυτικά, πάνω από τον τροπικό Ειρηνικό Ωκεανό. Οι άνεμοι αυτοί, συμμετέχοντας στο βρόγχο διάδοσης θερμότητας, διατηρούν την ισορροπία μεταξύ των θερμικά διαφορετικών περιοχών του τροπικού Ειρηνικού. Το νερό στην επιφάνεια του ωκεανού θερμαίνεται από τον ήλιο, δημιουργώντας έτσι ένα θερμοκλινές

επίπεδο, το οποίο διαχωρίζει τα θερμά επιφανειακά ύδατα από τα ψυχρότερα ύδατα του βυθού. Συνέπεια των ανατολικών ανέμων είναι η μετακίνηση των θερμών επιφανειακών νερών στο δυτικό Ειρηνικό (Σχήμα 4.1).



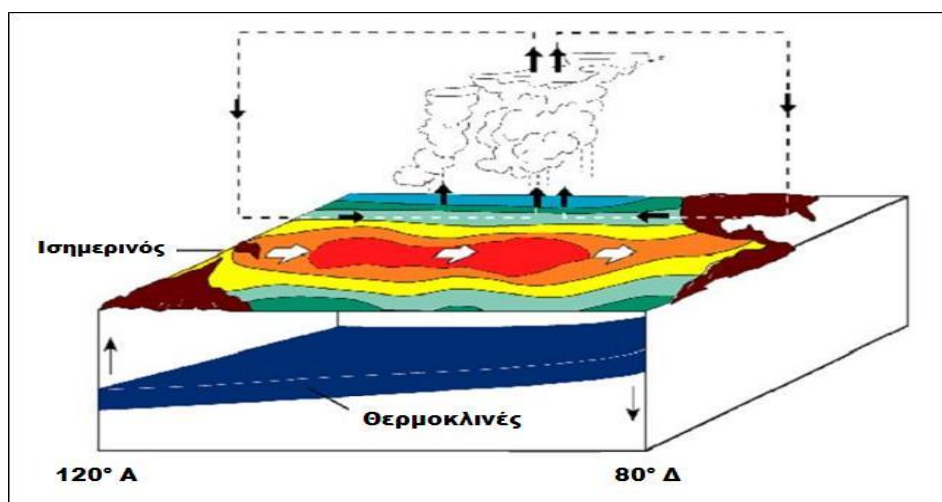
Σχήμα 4.1: Φυσιολογικό Πρότυπο του Ειρηνικού (Πηγή: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA)

Από τη μετακίνηση των θερμών επιφανειακών υδάτων, στο δυτικό Ειρηνικό, ο υπερκείμενος αέρας θερμαίνεται και ανέρχεται στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα την εκδήλωση έντονων βροχοπτώσεων. Στην άλλη πλευρά του Ειρηνικού, κατά μήκος των ακτών της Νότιας Αμερικής, παρατηρείται άνοδος των ψυχρών υδάτων από το βυθό προς την επιφάνεια (upwelling). Κατά τη διαδικασία αυτή, τα ψυχρά επιφανειακά νερά ψύχουν τον υπερκείμενο αέρα, ο οποίος, όντας πλέον αρκετά πυκνότερος, δεν μπορεί να ανέλθει αρκετά ψηλά στην ατμόσφαιρα για να συμπυκνωθούν οι υδρατμοί σε σύννεφα. Δημιουργείται, έτσι, μία επιφάνεια υψηλών πιέσεων με αποτέλεσμα να παρατηρούνται ελάχιστες βροχοπτώσεις. Έτσι, ενώ στην Ινδονησία καταγράφονται εκτεταμένες βροχοπτώσεις, στο Περού επικρατεί ανομβρία.

4.3.2 Συνθήκες Ελ Νίνιο

Για λόγους που ακόμη ερευνώνται από τους επιστήμονες, το φαινόμενο του El Niño ξεκινά όταν οι ανατολικοί αληγείς άνεμοι εξασθενούν για αρκετούς μήνες. Η αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης στο δυτικό Ειρηνικό και η παράλληλη ελάττωση της στα ανατολικά, δημιουργεί ετήσιους δυτικούς ανέμους που ωθούν τα τροπικά συστήματα χαμηλών πιέσεων του δυτικού Ειρηνικού προς τα ανατολικά, από την Αυστραλία προς τον κεντρικό Ειρηνικό. Η κίνηση των θερμών υδάτων του δυτικού Ειρηνικού προς τα ανατολικά, δημιουργεί τελικά

μία ζώνη (έκτασης όσο και οι ΗΠΑ) θερμών επιφανειακών υδάτων, η οποία εκτείνεται σε όλο το μήκος του Ειρηνικού στην περιοχή του Ισημερινού (Σχήμα 4.2). Εμφανίζεται έτσι το El Niño, με τις επιφανειακές θερμοκρασίες της θάλασσας να αυξάνονται από 1°C μέχρι και 7°C. Η μετακίνηση αυτή, κάνει τη στάθμη της θάλασσας επίπεδη, με αποτέλεσμα το θερμοκλινές επίπεδο να μην τέμνει την επιφάνεια της θάλασσας. Ακολούθως, δεν πραγματοποιείται άνοδος στην επιφάνεια των ψυχρών και πλούσιων σε θρεπτικά συστατικά υδάτων, επηρεάζοντας έτσι τη θαλάσσια ζωή και την αλιεία στις ακτές της Νοτίου Αμερικής. Επιπροσθέτως, τα θερμά νερά συνοδεύονται από σύννεφα βροχής που προκαλούν καταγίδες σε περιοχές του Περού και της Χιλής.



Σχήμα 4.2: Συνθήκες El Niño (Πηγή: National Oceanic and Atmospheric Administration - NOAA)

4.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Με τον όρο «φαινόμενο θερμοκηπίου» χαρακτηρίζεται το γεγονός ότι μεγάλο μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια της Γης απορροφάται από ορισμένα αέρια της ατμόσφαιρας, τα αέρια θερμοκηπίου με κυριότερο το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και τους υδρατμούς και στη συνέχεια επανεκπέμπεται προς την επιφάνεια. Με ευτυχή συνέπεια τη διάσωση του μεγαλύτερου μέρους της βιόσφαιρας, υπολογίζεται ότι χωρίς αυτό το προστατευτικό «θερμοκήπιο» (δηλαδή με την απουσία των CO₂, H₂O κτλ.) η επιφάνεια του πλανήτη μας θα ήταν μια απέραντη παγωμένη έκταση, αφιλόξενη για τα περισσότερα είδη της πανίδας και της χλωρίδας, με μέση θερμοκρασία 18°C κάτω από το μηδέν! Χάρη στο θερμοσυλλεκτικό αυτό σκέπασμα, η μέση πλανητική θερμοκρασία ανεβαίνει κατά 33°C και βρίσκεται στο πρόσφορο για τη βιόσφαιρα μέσο επίπεδο των 15°C (Petit et al., 1999).

Η παρουσία στην ατμόσφαιρα των αερίων θερμοκηπίου, και ειδικότερα του CO₂ προφανώς και ευτυχώς προϋπήρχε της εμφάνισης του ανθρώπου. Η ανθρωπογενής επίδραση

στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι σχετικά πρόσφατη και οφείλεται στις αυξημένες καύσεις άνθρακα και υδρογονανθράκων της βιομηχανικής και μεταβιομηχανικής κοινωνίας. Το γεγονός αυτό αποτελεί μια ανθρωπογενή διαταραχή, η οποία σύμφωνα με την κλασική λογική της αιτιοκρατίας θα επισύρει κάποιες αλλαγές στο κλίμα. Το σαφές αίτιο των αλλαγών αυτών, δηλαδή η ανθρωπογενής αύξηση των αερίων θερμοκηπίου, αποτελεί όμως ένα αδιευκρίνιστου ύψους ποσοστό των αιτιών που επηρεάζουν καθοριστικά τις όποιες κλιματικές αλλαγές (Plass 1956, IPCC 2007).

Το CO₂ διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο θερμικό ισοζύγιο της ατμόσφαιρας και ιδιαίτερα στη λειτουργία του φαινόμενου του θερμοκηπίου. Οι συγκεντρώσεις του CO₂ σήμερα βρίσκονται στα 391 ppm και είναι από τις υψηλότερες που υπήρξαν ποτέ εδώ και 160.000 χρόνια. Το 1991 βρίσκονταν στα 355 ppm και ήταν κατά 25% υψηλότερες από ότι το 1800 που περίπου ήταν 280 ppm. Η κατά έτος αύξηση του CO₂ τα τελευταία χρόνια είναι περίπου της τάξης του 1,8 ppm ή 0,6% και προέρχεται κυρίως από ανθρωπογενή δράση (Watson et al. 1992). Οι εκπομπές του CO₂ που προέρχονται από ανθρώπινες δραστηριότητες υπολογίστηκαν για ολόκληρο τον πλανήτη μας στο εκπληκτικό ποσό των $5,7 \pm 0,5$ Gt άνθρακα (C) και ήδη παρουσιάζουν αύξηση, η οποία οφείλεται στην ολοένα αυξανόμενη καταστροφή των δασών. Το CO₂ προέρχεται από κάθε είδους καύσεις, την αναπνοή των φυτών, των ζώων, τις εκρήξεις των ηφαιστειών και από διάφορες ρωγμές του εδάφους.

Οι συγκεντρώσεις του CO₂ εμφανίζονται αυξημένες πάνω από περιοχές με έντονη βιομηχανική δραστηριότητα και σε χαμηλότερα επίπεδα πάνω από την ύπαιθρο αλλά κυρίως πάνω από τους ωκεανούς όπου απορροφάται και κατακάθεται στους πυθμένες τους με τη μορφή διαφόρων αλάτων. Ο γενικότερος κύκλος παραγωγής-απόθεσης του CO₂ είναι της τάξεως των 50-200 ετών, γεγονός που σημαίνει ότι το εκπεμπόμενο σήμερα CO₂ θα επηρεάζει για μακρό χρόνο εξαιτίας των συγκεντρώσεων του τη συμπεριφορά της ατμόσφαιρας τουλάχιστον για τον επόμενο και μεθεπόμενο αιώνα (Archer 2005). Οι αναλύσεις και τα χρησιμοποιούμενα μοντέλα δείχνουν ότι και αν ακόμα κατορθώσουμε να διατηρήσουμε τις εκπομπές του CO₂ σταθερές στα σημερινά επίπεδα, το έτος 2050 οι συγκεντρώσεις του θα βρίσκονται στα 415-470 ppm και το 2100 στα 480-560 ppm.

Η καθήλωση των συγκεντρώσεων του αερίου αυτού στα σημερινά επίπεδα απαιτεί την άμεση ελάττωση των ανθρωπογενών εκπομπών κατά 60-80%. Το CO₂ είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη των φυτών, απορροφά δε ισχυρά και επανεκπέμπει τη θερμική ακτινοβολία, αποτελεί δε μαζί με τους υδρατμούς τα κύρια ατμοσφαιρικά συστατικά για τη δημιουργία του φαινόμενου του θερμοκηπίου.

4.5 ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η επιστημονική έρευνα για τις κλιματικές αλλαγές έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια. Πίσω από αυτήν την τάση βρίσκεται η αλματώδης πρόοδος της υπολογιστικής ισχύος που έδωσε νέα ώθηση στις αριθμητικές μεθόδους επίλυσης πολύπλοκων προβλημάτων. Σημαντικό εργαλείο σε αυτή την προσπάθεια είναι η ανάπτυξη των κλιματικών μοντέλων, δηλαδή μαθηματικών μοντέλων που θα μπορούν να αναπαραστήσουν την εξέλιξη του κλίματος, έτσι ώστε να εξηγήσουν τις αλλαγές που έχουν συμβεί στο παρελθόν και να προβλέψουν το κλίμα του μέλλοντος, μελετώντας με προσοχή τις συνέπειες των ανθρωπογενών επιδράσεων, και κυρίως της αύξησης της συγκέντρωσης των αερίων θερμοκηπίου.

Τα κλιματικά μοντέλα είναι αντίστοιχα με τα μοντέλα πρόγνωσης του καιρού και έχουν στόχο την εκτίμηση των αλλαγών του κλίματος της Γης στο μέλλον (σε 20, 50, 100 ή και 1.000 χρόνια). Η ιστορία των κλιματικών μοντέλων ξεκινάει από τη Σκανδιναβία. Ο Σουηδός φυσικός Svante Arrhenius, παρατηρώντας τις μεγάλες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα κατά την περίοδο της βιομηχανικής επανάστασης (τέλη του 19ου αιώνα), αναρωτήθηκε για τις επιπτώσεις που θα είχαν οι εκπομπές αυτές στο κλίμα της Γης. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που έκανε το 1896, εκτίμησε ότι ο διπλασιασμός της ποσότητας του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα θα προκαλούσε αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 5 βαθμούς Κελσίου. Όπως είναι γνωστό η εκτίμηση αυτή δεν επαληθεύθηκε, αλλά αυτό ήταν το πρώτο κλιματικό μοντέλο της Γης. Παράλληλα με την ανάπτυξη των μοντέλων πρόγνωσης του καιρού, ξεκίνησε τη δεκαετία του 1950 και η προσπάθεια εκτίμηση του μελλοντικού κλίματος.

Τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας (General Circulation Models – GCMs) είναι αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα για την εκτίμηση της κλιματικής αλλαγής. Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην αριθμητική ολοκλήρωση των εξισώσεων Navier - Stokes της ρευστομηχανικής και λόγω της πολυπλοκότητας τους απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ προκειμένου να εκτελεστούν. Στα σύγχρονα κλιματικά μοντέλα προσομοιώνονται οι ανταλλαγές ενέργειας μεταξύ του εδάφους, των ωκεανών, της ατμόσφαιρας και του Διαστήματος, η μεταφορά ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, η κυκλοφορία του αέρα στην ατμόσφαιρα, η κυκλοφορία του νερού στους ωκεανούς και η αλληλεπίδραση των ωκεανών με την ατμόσφαιρα, η δημιουργία νεφών και ο κύκλος του άνθρακα, δηλαδή οι ανταλλαγές του άνθρακα μεταξύ των ωκεανών, της ατμόσφαιρας και του Διαστήματος. Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται σε έναν τρισδιάστατο κώνο που εκτείνεται από τα βάθη των ωκεανών ως το Διάστημα περικλείοντας ολόκληρη τη Γη. Η εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών γίνεται με τη χρήση διαφόρων σεναρίων. Για παράδειγμα, σε ένα κλιματικό μοντέλο εισάγεται ως δεδομένο η συνεχής αύξηση της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα στην

ατμόσφαιρα και το μοντέλο εκτιμά τι θα συμβεί στη Γη μετά από 50 ή 100 χρόνια. Οι παράγοντες που προκαλούν τις κλιματικές αλλαγές είναι φυσικοί και ανθρωπογενείς. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι αλλαγές στην εκπεμπόμενη ενέργεια από τον Ήλιο και οι αλλαγές στη συγκέντρωση των σωματιδίων της στρατόσφαιρας από τη δράση των ηφαιστειών. Στους ανθρωπογενείς παράγοντες ανήκουν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (κυρίως διοξείδιο του άνθρακα), η εκπομπή αεροσωματιδίων και οι αλλαγές στη συγκέντρωση του όζοντος. Παρότι οι εκτιμήσεις των κλιματικών μοντέλων συνοδεύονται από μεγάλη αβεβαιότητα, τα μοντέλα βελτιώνονται συνεχώς και αποτελούν χρήσιμα εργαλεία στα χέρια των επιστημόνων που μελετούν το κλίμα της Γης. Επιπλέον οι εκτιμήσεις, παρότι έχουν αβεβαιότητα, έχουν επιτύχει να αφυπνίσουν τους πολίτες για τις επιπτώσεις ορισμένων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο κλίμα της Γης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑΣ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια, οι δασικές πυρκαγιές ολοένα και πληθαίνουν σε συχνότητα ενώ συγχρόνως γίνονται πιο καταστροφικές τόσο στο φυσικό όσο και στο ανθρωπογενές περιβάλλον (μεγα-πυρκαγιές). Η διαφορά όμως των πυρκαγιών του σήμερα σε σχέση με τις πυρκαγιές του παρελθόντος είναι ότι οι πυρκαγιές του σήμερα φαίνονται να είναι πιο πολύπλοκες και με μεγαλύτερη ένταση. Ανοικτό ερευνητικό ερώτημα είναι για το ποια θα είναι η συμπεριφορά των πυρκαγιών του αύριο. Οι προβλέψεις για τη συμπεριφορά των πυρκαγιών του μέλλοντος δίστανται. Μια μερίδα επιστημόνων εκτιμά ότι θα παρουσιάζουν συχνότερα ακραίες συμπεριφορές, δηλαδή θα είναι πιο καταστροφικές. Επιπρόσθετα ο σύγχρονος άνθρωπος με τα τόσα τεχνολογικά επιτεύγματα δείχνει να είναι πιο εύλωτος από ποτέ, ενώ αδυνατεί να προβλέψει και να καταστείλει εγκαίρως όλα τα φαινόμενα των δασικών πυρκαγιών.

Θα αποτελούσε ουτοπία αν κάποιος πίστευε ότι θα μπορούσε να «δαμάσει» τη φύση και να «μηδενίσει» τις καταστροφικές πυρκαγιές. Μία καλή επιλογή θα ήταν η σωστή προετοιμασία, η κατάλληλη εκπαίδευση και ενημέρωση σε θέματα οικολογίας και συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών. Με αυτό τον τρόπο θα ήταν δυνατό να περιοριστούν επιχειρησιακά λάθη και άστοχες ενέργειες, κατά συνέπεια να αποτραπούν όσο το δυνατόν οι απώλειες σε ανθρώπινο δυναμικό και φυσικό πλούτο.

Μέρος αυτών των παραπάνω αναγκών σε γνώση της επιστήμης των δασικών πυρκαγιών έρχεται να καλύψει το Εγχειρίδιο Μετεωρολογίας Δασικών Πυρκαγιών, που παρατίθεται σε αυτό το κεφάλαιο. Το εγχειρίδιο βασίστηκε και προσαρμόστηκε από το εκπαιδευτικό υλικό **S-290: INTERMEDIATE WILDLAND FIRE BEHAVIOR (1993)** από το National Wildfire Coordinating Group του National Interagency Fire Center των ΗΠΑ, εμπλουτισμένο και διαμορφωμένο για τις συνθήκες της Ελλάδας, σύμφωνα με τις γνώσεις του συγγραφέα αυτής της διατριβής στο μέτωπο της φωτιάς, αλλά και στην εμπειρία του από την πολύχρονη θητεία του στο Συντονιστικό Επιχειρησιακό Κέντρο του Πυροσβεστικού Σώματος ως Αξιωματικού- Μετεωρολόγου.

Επιπροσθέτως, για τη διαμόρφωση και τον εμπλουτισμό του εγχειριδίου στο πλαίσιο της χώρας μας χρειάστηκε να δαπανηθεί χρόνος και μελέτη εκτεταμένης βιβλιογραφίας και δημοσιεύσεων με αντιστοίχιση της αγγλικής με την ελληνική ορολογία. Επίσης, έγινε προσαρμογή του εκπαιδευτικού υλικού για την κατανόηση των αρχών και τη βασική εκπαίδευση στο γνωστικό αντικείμενο των δασικών πυρκαγιών του περιβάλλοντος. Χαρακτηριστικά βιβλία που χρησιμοποιήθηκαν είναι: το Forest Fires Reference Handbook του Philip Omi (2005), το Fire Weather των Mark Schroeder and Charles Buck (1970), τα S-390: Introduction to Wildland Fire Behavior Calculations (2006) και S-490: Advanced Fire

Behavior Calculations (2008) και το NWCG Fireline Handbook (2004) από το National Wildfire Coordinating Group του National Interagency Fire Center των ΗΠΑ.

Το εγχειρίδιο μετεωρολογίας δασικών πυρκαγιών δημιουργήθηκε με στόχο να βοηθήσει στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο συμπεριφέρεται ή διαφοροποιεί τη συμπεριφορά της μια δασική πυρκαγιά, με σκοπό την ασφαλή λήψη μέτρων διαχείρισης και καταστολής του φαινομένου. Λαμβάνει υπόψη του την υφιστάμενη γνώση πάνω στο φαινόμενο των δασικών πυρκαγιών, προσπαθώντας να την αναλύσει και να την ομαδοποιήσει με τέτοιο τρόπο ώστε να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο εκπαίδευσης και λήψης αποφάσεων σε επιτελικό και επιχειρησιακό επίπεδο.

Υπάρχουν επτά παράγοντες μέσα σε ένα περιβάλλον πυρκαγιάς για τους οποίους πρέπει να είναι γνωστός ο τρόπος με τον οποίον επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς και να παρακολουθούνται από τις δυνάμεις δασοπυρόσβεσης. Πάντα πρέπει να ελέγχεται ο περιβάλλοντας χώρος της πυρκαγιάς για τους παρακάτω παράγοντες:

1. Άνεμος
2. Ατμοσφαιρική ευστάθεια
3. Χαρακτηριστικά καύσιμης ύλης
4. Υγρασία καύσιμης ύλης
5. Θερμοκρασία καύσιμης ύλης
6. Ανάγλυφο
7. Συμπεριφορά πυρκαγιάς

Η γνώση, η παρακολούθηση και ο συνεχής έλεγχος των παραπάνω περιβαλλοντικών παραγόντων είναι αναγκαία προϋπόθεση για την ασφάλεια του προσωπικού, την εκπόνηση σχεδίων και την αναπροσαρμογή τους με στόχο την κατάσβεση της πυρκαγιάς και τον περιορισμό των απωλειών, στο πεδίο των επιχειρήσεων.

5.1 ANEMOI

5.1.1 Γενικοί και Τοπικοί Άνεμοι

Στην εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών ιδιαίτερη σημασία έχουν οι γενικοί άνεμοι μεγάλης κλίμακας και οι τοπικοί άνεμοι μικρής κλίμακας γιατί κάποιες συνιστώσες αυτών μπορούν να συμβάλλουν στον πραγματικό επιφανειακό άνεμο. Οι γενικοί άνεμοι είναι οι μεγαλύτεροι σε κλίμακα άνεμοι. Δημιουργούνται εξαιτίας των βαροβαθμίδων μεταξύ των αντικυκλώνων/υψηλών (highs) και κυκλώνων/χαμηλών (lows). Οι άνεμοι τοπικής προέλευσης μπορεί να είναι εξίσου σημαντικοί στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς με τους

γενικούς ανέμους. Σε ορεινές περιοχές, συγκεκριμένα σε ορεινά λεκανοπέδια και σε παράκτιες περιοχές, οι τοπικοί ημερήσιοι άνεμοι κυριαρχούν. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες τοπικών ανέμων: θαλάσσια και απόγεια αύρα, αύρες των κοιλάδων και των ορέων και επικλινείς άνεμοι πλαγιάς, οι οποίοι έχουν αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2.

5.1.2 Άνεμοι Ιδιαίτερης Σημασίας για τους Πυροσβέστες

Τέσσερα είδη ανέμων δημιουργούν απότομες και έντονες άρα και επικίνδυνες πυρομετεωρολογικές συνθήκες:

1. Άνεμοι ψυχρού μετώπου,
2. Άνεμοι Föhn,
3. Καθοδικά ρεύματα καταιγίδων και
4. Στρόβιλοι.

Οι άνεμοι ψυχρού μετώπου και Föhn έχουν αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2. Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε τα καθοδικά ρεύματα καταιγίδων και τους στροβίλους.

5.1.2.1 Καθοδικά Ρεύματα Καταιγίδων (Thunderstorm Downdrafts)

Τα καθοδικά ρεύματα καταιγίδων παρατηρούνται κατά την εμφάνιση του φαινομένου των καταιγίδων. Είναι δυνατό να προκαλέσουν ξαφνικές, σύντομες, αλλά σημαντικές αλλαγές στη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς. Απαραίτητες προϋποθέσεις για το σχηματισμό καταιγίδων είναι:

- Ατμοσφαιρική αστάθεια.
- Επαρκής ατμοσφαιρική υγρασία
- Μηχανισμός ανύψωσης

Οι καταιγίδες σχηματίζονται από κάποια μικρά νέφη τύπου σωρείτη, όπου μέσω ενός μηχανισμού ανύψωσης, που μπορεί να είναι συνήθως μια οροσειρά, σύγκλιση ή λόγω θερμικής ανύψωσης, εκλύεται από τη συμπύκνωση των υδρατμών, λανθάνουσα θερμότητα με ταυτόχρονη κατακόρυφη ανάπτυξη του νέφους και δημιουργία σωρειτομελανία. Είναι πιθανό να δημιουργηθούν ισχυρές τοπικές καταιγίδες. Αυτές συνήθως περιλαμβάνουν βροντές και αστραπές, σε κάποια μέρη έντονη βροχή και χαλάζι και ισχυρούς ριπαίους ανέμους.

Τα καθοδικά ρεύματα που φτάνουν στο έδαφος προκαλούνται από την ψύξη λόγω της εξάτμισης του υετού, γίνονται βαρύτερα από τον περιβάλλοντα αέρα και επιταχύνονται

εξαιτίας της βαρύτητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ψυχρούς, ριπαίους, επιφανειακούς ανέμους που μπορούν να γίνουν αισθητοί μέχρι και 16 km από την καταιγίδα. Οι ταχύτητες των ριπαίων ανέμων μετώπου είναι συχνά 40 με 55 km/h και μπορούν να φτάσουν έως και τα 100 km/h. Άρα χρειάζεται μεγάλη προσοχή όταν μια πυρκαγιά βρίσκεται κοντά σε μια καταιγίδα. Οι ριπαίοι άνεμοι των καθοδικών ρευμάτων της καταιγίδας είναι δυνατό να διαφοροποιήσουν τον επιφανειακό άνεμο δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα ελέγχου της πυρκαγιάς. Ενδείξεις για την εμφάνιση των καθοδικών ρευμάτων είναι οι παρακάτω:

- Εμφάνιση ενός κυλινδρικού νέφους στη βάση του σωρειτομελανία
- Σύννεφο σκόνης δημιουργείται καθώς οι πρώτες ριπές φτάνουν στο έδαφος
- Ραβδώσεις (Virga - βροχή που δεν φτάνει στο έδαφος) κρέμονται κάτω από τη βάση του σωρειτομελανία

5.1.2.2 Στροβιλώδεις Άνεμοι (*Whirlwinds*)

Ο στροβιλώδης άνεμος περιλαμβάνει τους στροβίλους σκόνης και τους στροβίλους πυρκαγιάς. Είναι εξίσου σημαντικός με τους ανέμους που έχουν αναφερθεί ως επικίνδυνοι. Χρήζει ιδιαίτερης προσοχής από τις δυνάμεις πυρόσβεσης, μιας και δημιουργεί περιστροφή του ανέμου με διασκορπίση των φλογών και των πυρακτωμένων υλικών.

- Οι στρόβιλοι σκόνης (Dust devils) παρατηρούνται τις θερμές ημέρες πάνω από γυμνό έδαφος με ασθενείς γενικούς ανέμους και συνήθως καθαρό ουρανό. Είναι φαινόμενα που δείχνουν την έντονη τοπική θέρμανση της επιφάνειας. Όταν ο στρόβιλος γίνεται αρκετά δυνατός είναι ικανός να ανασηκώσει σκόνη και άλλα επιφανειακά υλικά. Το μέγεθος των στροβιλωδών ανέμων μπορεί να φτάσει τα 30 m διάμετρο και σε περίπου ύψος μέχρι 1,2 km. Στις πυρκαγιές που έχουν σβήσει, συνήθως παρατηρούνται στρόβιλοι σκόνης, λόγω των ανοδικών κινήσεων, από την τοπική θέρμανση που αναπτύσσεται εξαιτίας της έντονης απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας από τις στάχτες και τα καμένα υλικά.
- Οι στρόβιλοι φωτιάς (Firewhirls) ή πυρκαγιές έχουν την ίδια προέλευση με τους στροβίλους σκόνης, αλλά δημιουργούνται κάτω από πυρκαγιές μεγάλης έντασης. Συνήθως είναι πιο επικίνδυνοι από τους στροβίλους σκόνης. Όμως και οι δύο είναι δυνατόν να διασκορπίσουν τις φλόγες ή τα καμένα υλικά προκαλώντας νέες εστίες. Οι στρόβιλοι φωτιάς δημιουργούνται στις υπήνεμες πλαγιές από τους επικρατούντες ανέμους, ή στην πίσω πλευρά μιας χαμηλής κορυφής, σε συγκεκριμένες

περιβαλλοντικές συνθήκες όπως: ασθενείς επιφανειακοί άνεμοι, καθαρός ουρανός, έντονη θέρμανση και αστάθεια κοντά στην επιφάνεια.

5.1.3 Σχέση Μεταξύ Γενικών, Τοπικών, Επιφανειακών και Μέσης-Φλόγας Ανέμων

5.1.3.1 Συνδυάζοντας Γενικούς και Τοπικούς Ανέμους

Οι επιφανειακοί άνεμοι προκύπτουν από το συνδυασμό των γενικών και των τοπικών ανέμων. Οι γενικοί άνεμοι όσο πλησιάζουν κοντά στην επιφάνεια μειώνονται λόγω της τριβής με το ανάγλυφο. Η αλληλεπίδρασή τους με τους τοπικούς ανέμους είναι δυνατόν να ενισχύσει ή να μειώσει τους επιφανειακούς ανέμους. Η μέτρηση των επιφανειακών ανέμων έχει τυποποιηθεί στα 10 m πάνω από το γυμνό έδαφος ή 10 m πάνω από το μέσο ύψος της βλάστησης.

5.1.3.2 Άνεμος στο Μέσο Ύψος της Φλόγας (Mid-Flame Wind)

Η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από την τριβή που προκαλείται από το ανάγλυφο και από τη βλάστηση. Όσο πιο μεγάλη είναι η τριβή, τόσο γρηγορότερα θα μειωθεί η ταχύτητα του ανέμου. Επίσης, όσο ο άνεμος πλησιάζει προς το έδαφος τόσο μειώνεται η ταχύτητά του και όσο πιο ανώμαλο είναι το ανάγλυφο και με υψηλή βλάστηση τόσο αυξάνεται ο ρυθμός μείωσης της ταχύτητας του ανέμου.

Επειδή ο επιφανειακός άνεμος μετριέται σε 10 m υψόμετρο δεν μπορεί να είναι ίδιος με τον άνεμο που επηρεάζει άμεσα την κίνηση ενός μετώπου πυρκαγιάς που συνήθως μετριέται σε πολύ χαμηλότερο ύψος (στο ύψος περίπου των 1,7 m). Στους υπολογισμούς των μοντέλων πυρκαγιάς χρειάζεται να χρησιμοποιήσουμε την ταχύτητα του ανέμου που θα επηρεάσει άμεσα την κίνηση του φλεγόμενου μετώπου. Αυτή είναι η ταχύτητα του ανέμου στο μέσο ύψος της φλόγας.

Η ταχύτητα του ανέμου στο μέσο ύψος της φλόγας υφίσταται την τριβή με την επιφανειακή βλάστηση και το ανάγλυφο. Επομένως, η ταχύτητά του θα είναι συνήθως μικρότερη από αυτή του επιφανειακού ανέμου. Εξαιρέσεις μπορεί να προκύψουν όταν εμφανίζονται κατερχόμενοι άνεμοι πλαγιάς κάτω από την κόμη των δένδρων (canopy), με ασθενή επιφανειακό άνεμο.

Για να μειώσουμε τους επιφανειακούς σε ανέμους στο μέσο ύψος της φλόγας, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας το μοντέλο της καύσιμης ύλης και την κάλυψή της. Ταχύτητες ανέμου στο μέσο ύψος της φλόγας κυμαίνονται από 10% έως 60% χαμηλότερα από αυτές των επιφανειακών ανέμων, με τα διάφορους μοντέλα καύσιμης ύλης να έχουν διαφορετικούς συντελεστές προσαρμογής (Πίνακας 5.1). Άνεμοι σε υψηλότερο επίπεδο δεν επηρεάζουν

συνήθως τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς. Στην περίπτωση των μέγα-πυρκαγιών, με ισχυρές εντάσεις και πολύ υψηλές στήλες θερμότητας, άνεμοι σε υψηλότερο επίπεδο από τους επιφανειακούς, επηρεάζουν το φαινόμενο της κηλίδωσης σε μεγάλη έκταση κάνοντας τις πυρκαγιές πιο καταστροφικές.

Έκθεση Καύσιμης Ύλης	Μοντέλο Καύσιμης ύλης	Συντελεστής Προσαρμογής
Εκτεθειμένη Καύσιμη Ύλη	4	0.6
	13	0.5
	1,3,5,6	0.4
	11,12	0.4
	(2,7)1	0.4
	(8,9,10)2	0.4
Μερικώς Προφυλαγμένη Καύσιμη Ύλη	Όλα	0.3
Πλήρως Προφυλαγμένη Καύσιμη Ύλη	Όλα	Ανοικτές Συστάδες 0.2 Κλειστές Συστάδες 0.1

1Καύσιμη Ύλη συνήθως μερικώς προφυλαγμένη 2Καύσιμη Ύλη συνήθως πλήρως προφυλαγμένη

Πίνακας 5.1: Συντελεστές προσαρμογής της ταχύτητας επιφανειακού ανέμου στο μέσο ύψος φλόγας, ανάλογα με την κάλυψη και τα 13 πρότυπα μοντέλα καύσιμης ύλης (S-290 1993)

5.2 ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ

Η ατμοσφαιρική ευστάθεια είναι το εμπόδιο της ατμόσφαιρας στις κάθετες κινήσεις των αερίων μαζών. Ο ευσταθής αέρας αποτελεί τροχοπέδη στην κάθετη κίνηση. Εν αντιθέσει ο ασταθής αέρας βοηθάει τις αέριες μάζες να κινηθούν σε μεγαλύτερα ύψη ευνοώντας την κάθετη κίνηση.

5.2.1 Ευσταθείς και Ασταθείς Ατμοσφαιρικές Συνθήκες και η Σημασία τους στη Συμπεριφορά των Πυρκαγιών

5.2.1.1 Θερμοβαθμίδες (Lapse Rates)

Η θερμοβαθμίδα είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας με το υψόμετρο. Συνήθως η θερμοκρασία μειώνεται με το ύψος. Όμως, στην κατώτερη ατμόσφαιρα η κατανομή της

θερμοκρασίας μεταβάλλεται από τα ρεύματα αέρα που κινούνται διαρκώς καθ' ύψος και θερμαίνουν ή ψύχουν τον περιβάλλοντα χώρο. Τρεις θερμοβαθμίδες είναι χαρακτηριστικές για την ευστάθεια της ατμόσφαιρας και αναλύονται παρακάτω.

1. Ξηρή θερμοβαθμίδα (Dry lapse rate)

Μία αέρια ξηρή μάζα όταν ανέρχεται ελαττώνει τη θερμοκρασία της κατά 1°C ανά 100 m λόγω διαστολής. Όταν κατέρχεται αυξάνει τη θερμοκρασία της κατά 1°C ανά 100 m λόγω συμπίεσης. Αυτός ο ρυθμός του 1°C ανά 100 m ονομάζεται ξηρή θερμοβαθμίδα ή ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα

2. Υγρή θερμοβαθμίδα (Moist lapse rate)

Μία αέρια υγρή μάζα όταν ανέρχεται ελαττώνει τη θερμοκρασία της με μικρότερο ρυθμό από ότι η ξηρή μάζα, περίπου $0,5^{\circ}\text{C}$ ανά 100 m λόγω της εκλυόμενης λανθάνουσας θερμότητας συμπύκνωσης. Αυτός ο ρυθμός του $0,5^{\circ}\text{C}$ ανά 100 m ονομάζεται υγρή θερμοβαθμίδα ή υγρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα. Ο αέρας ανέρχεται και ψύχεται με την ξηρή θερμοβαθμίδα μέχρι να φτάσει το σημείο κορεσμού του, δηλαδή να αποκτήσει σχετική υγρασία 100%. Εάν συνεχίσει να ανεβαίνει, θα ψυχθεί με την υγρή θερμοβαθμίδα.

3. Μέση θερμοβαθμίδα (Average lapse rate).

Επειδή συνήθως η κατανομή της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας δεν ταυτίζεται με την ξηρή και την υγρή θερμοβαθμίδα, η μέση μεταβολή της θερμοκρασίας στην κατώτερη ατμόσφαιρα είναι περίπου $0,65^{\circ}\text{C}$ ανά 100 m. Δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από την ηλιακή ακτινοβολία, την ώρα της ημέρας και την κατακόρυφη θερμική σύσταση της αέριας μάζας.

5.2.1.2 Συνθήκες Ευστάθειας και Αστάθειας της Ατμόσφαιρας

Ο αέρας είναι ασταθής όταν η θερμοκρασία μειώνεται με ρυθμό πάνω από 1°C ανά 100 m. Ο ασταθής αέρας ενθαρρύνει τις ανοδικές κινήσεις των αέριων μαζών. Επιπροσθέτως, οι ανοδικές κινήσεις αυξάνουν τη δραστηριότητα της πυρκαγιάς. Όταν η μείωση της θερμοκρασίας στην αέρια μάζα είναι μικρότερη από 1°C ανά 100 m, ο αέρας είναι σταθερός. Ο σταθερός αέρας αποτελεί εμπόδιο στις ανοδικές κινήσεις του αέρα και συνήθως περιορίζει τη δραστηριότητα της πυρκαγιάς. Όταν η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι 1°C ανά 100 m, ο αέρας χαρακτηρίζεται ως ουδέτερος. Συνήθως αυτή η κατάσταση δε διαρκεί πολύ.

5.2.1.3 Η Επιρροή του Ασταθούς Αέρα στη Συμπεριφορά της Πυρκαγιάς

Ο ασταθής αέρας συνήθως ευνοεί τη δραστηριότητα της πυρκαγιάς που μπορεί να γίνει ακραία σε κάποιες περιπτώσεις. Όταν υπάρχει αστάθεια στην ατμόσφαιρα, η πραγματική θερμοβαθμίδα είναι μεγαλύτερη από την ξηρή. Άρα, κάθε ανερχόμενη αέρια μάζα θα συνεχίσει να είναι θερμότερη και επομένως ελαφρύτερη από τον περιβάλλοντα αέρα. Σε ασταθείς ατμοσφαιρικές καταστάσεις μια πυρκαγιά αναμένεται να συμπεριφέρεται πιο επικίνδυνα από ότι σε σταθερές. Αυτό συμβαίνει διότι:

- Είναι πολύ πιθανός ο σχηματισμός ανεμοστροβίλων σκόνης μικρής κλίμακας (dust devils) και φλεγόμενων στροβίλων (firewhirls), οι οποίοι είναι δυνατόν να διασκορπίσουν τις φλόγες και να προκαλέσουν κηλίδωση.
- Είναι δυνατή η δημιουργία θυελλωδών επιφανειακών ανέμων από τα ανώτερα στρώματα λόγω της αστάθειας.
- Οι στήλες διάδοσης θερμότητας γίνονται ψηλότερες και πιο έντονες.
- Οι καλά αναπτυγμένες στήλες προκαλούν συνήθως κηλίδωση.

5.2.2 Οι Τρεις Τύποι Αναστροφών και οι Επιδράσεις τους στη Συμπεριφορά των Δασικών Πυρκαγιών

Αναστροφή λέγεται το στρώμα πολύ ευσταθούς αέρα όπου η θερμοκρασία αυξάνεται με το υψόμετρο. Οι αναστροφές λειτουργούν σαν ένας φραγμός που μειώνει τις ανοδικές κυρίως κινήσεις στην ατμόσφαιρα. Ο καπνός που δημιουργείται από μια πυρκαγιά θα ανέλθει, όταν συναντήσει την αναστροφή θα κινηθεί παράλληλα με το έδαφος επειδή τα αέρια στρώματα που είναι ψηλότερα είναι θερμότερα από αυτόν. Υπάρχουν τρεις τύποι αναστροφών ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους και με το εάν βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια ή όχι.

1. *Θαλάσσια Αναστροφή.* Η θαλάσσια αναστροφή είναι μια αναστροφή που σχηματίζεται κατά μήκος των ακτών. Ο ψυχρός και υγρός αέρας από τη θάλασσα κινείται πάνω από τη στεριά σε χαμηλό ύψος. Το πάχος του υγρού και ψυχρού αέριου στρώματος μπορεί να ποικίλλει από μερικές εκατοντάδες μέτρα έως αρκετές χιλιάδες μέτρα. Πάνω από αυτό το στρώμα βρίσκεται ένα θερμότερο, ξηρότερο και σχετικά ασταθές αέριο στρώμα. Οι

θαλάσσιες αναστροφές εμφανίζονται πάνω από τις ακτές κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά είναι πιο δυνατές και αισθητές κατά τη νύχτα.

2. *Αναστροφή Ακτινοβολίας ή Νυκτερινή Αναστροφή.* Η αναστροφή αυτή είναι η πιο συχνή που συναντάται. Η επιφάνεια του εδάφους τη νύχτα ψύχεται εξαιτίας της θερμότητας που χάνεται μέσω της ακτινοβολίας. Ο αέρας που βρίσκεται κοντά στο έδαφος, ψύχεται και αυτός λόγω της επαφής του με την επιφάνεια. Το στρώμα αυτό ψυχρού αέρα κοντά στην επιφάνεια μεγαλώνει όσο προχωρά η νύχτα. Στα ορεινά, στις κοιλάδες το φαινόμενο είναι πιο έντονο, καθώς ψυχρός αέρας κατεβαίνει από τις πλαγιές των βουνών και βαθαίνει το στρώμα του ψυχρού αέρα. Η συννεφιά και ο αέρας περιορίζουν τη ψύξη της επιφάνειας και το μέγεθος της αναστροφής. Η αναστροφή αρχίζει να περιορίζεται μετά την ανατολή του ηλίου, όταν η ξηρά θερμαίνεται και ο αέρας που βρίσκεται σε επαφή μαζί της θερμαίνεται και αυτός και γίνεται πιο ασταθής. Οι αναστροφές διαλύονται συνήθως μετά το μεσημέρι δημιουργώντας ασταθείς συνθήκες. Πυρκαγιές που είναι σε εξέλιξη είναι πολύ πιθανό να αυξήσουν τη δραστηριότητά τους.
3. *Αντικυκλωνική Αναστροφή ή Αναστροφή Καθίξεσης.* Οι αντικυκλωνικές αναστροφές προκαλούνται από τα συστήματα υψηλής πίεσης της ανώτερης ατμόσφαιρας μέσω του φαινομένου της καθίξεσης. Η καθίξεση είναι μία αργή καθοδική κίνηση του αέρα που είναι σε μεγάλο ύψος όταν βρίσκεται κάτω από την επίδραση ενός συστήματος υψηλής πίεσης. Όταν οι αέριες μάζες βυθίζονται σε χαμηλότερο υψόμετρο, λόγω συστημάτων υψηλής πίεσης, γίνονται πιο θερμές και ξηρές. Αυτό δημιουργεί ευστάθεια στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τον περιορισμό της δραστηριότητας των δασικών πυρκαγιών που είναι σε εξέλιξη. Όμως, αν το φαινόμενο αυτό παραμείνει, ξηραίνει την ατμόσφαιρα κάνοντας την καύσιμη ύλη πιο εύφλεκτη δημιουργώντας επικίνδυνες πυρικές συνθήκες.

5.2.3 Θερμική Ζώνη και η Σημασία της στη Συμπεριφορά των Πυρκαγιών

Στις ορεινές περιοχές ο αέρας που βρίσκεται σε επαφή με τις πλαγιές ψύχεται, γίνεται βαρύτερος και κινείται προς τα κάτω και συσσωρεύεται στην κοιλάδα. Η συσσώρευση του ψυχρού αέρα μπορεί να έχει βάθος αρκετές εκατοντάδες μέτρα και εξαρτάται από τις τοπογραφικές συνθήκες. Η αναστροφή δημιουργείται πάνω από το συσσωρευμένο ψυχρό αέρα.

Στην περιοχή που το στρώμα αναστροφής έρχεται σε επαφή με τις πλαγιές των βουνών, υπάρχει μία σχετικά θερμή περιοχή που ονομάζεται θερμική ζώνη. Τη νύχτα, η θερμοκρασία σε αυτή την περιοχή είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία που έχουν οι πλαγιές πάνω ή κάτω από αυτή. Το υψόμετρο που σχηματίζεται η θερμική ζώνη όπως και το

βάθος της δεν είναι σταθερά, εξαρτώνται από τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τη χρονική στιγμή μέσα στη νύκτα

5.2.3.1 Πώς Επηρεάζει η Θερμική Ζώνη τη Συμπεριφορά της Πυρκαγιάς

Οι θερμικές ζώνες συνήθως έχουν σημαντική επίδραση στις προσπάθειες κατάσβεσης μιας πυρκαγιάς. Στις θερμικές ζώνες παρατηρείται μικρότερο θερμοκρασιακό εύρος, μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία και μικρότερη μέση σχετική υγρασία. Αυτές οι συνθήκες δυσκολεύουν τις προσπάθειες ελέγχου μιας πυρκαγιάς, κατά τη διάρκεια της νύκτας, σε μια ορεινή περιοχή.

5.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΗΣ ΥΛΗΣ

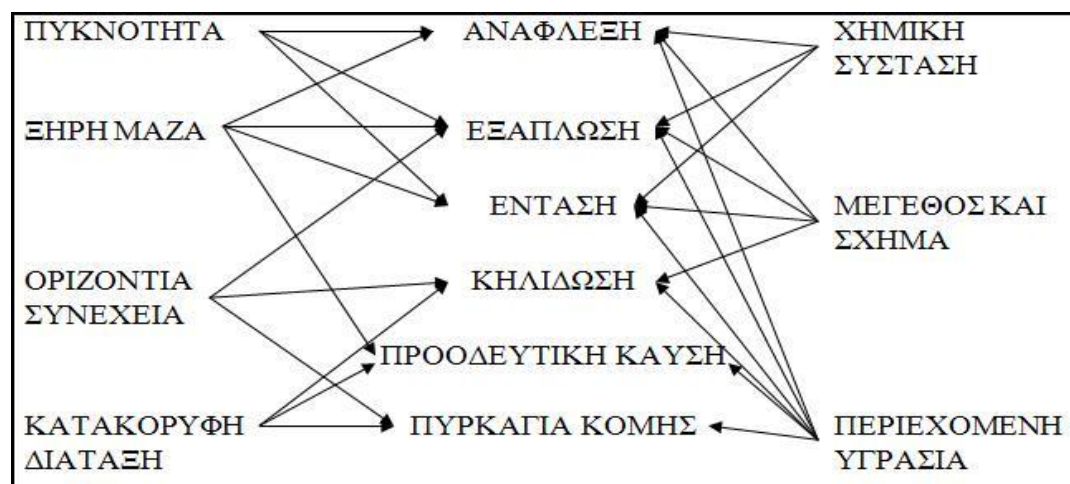
Καύσιμη ύλη θεωρείται οποιαδήποτε οργανική ύλη, ζωντανή ή νεκρή, που μπορεί να αναφλεχθεί και να καεί. Η καύσιμη ύλη παρατηρείται σε πολλούς συνδυασμούς ανάλογα με το είδος, το μέγεθος, τη θέση, την ποσότητα, το σχήμα και τη διάταξή της. Διαχωρίζεται σε τρεις γενικές ομάδες: την εδαφική (ground), την επιφανειακή (surface) και την εναέρια (aerial) καύσιμη ύλη.

1. Η **εδαφική ή υπόγεια καύσιμη ύλη** καίγεται με πολύ αργούς ρυθμούς, χωρίς φλόγα.
2. Η **επιφανειακή καύσιμη ύλη** καίγεται με μεγαλύτερους ρυθμούς από την εδαφική, ιδίως στις περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει ανώροφος δέντρων και η επιφανειακή καύσιμη ύλη είναι εκτεθειμένη στη θέρμανση από την ηλιακή ακτινοβολία και τους ισχυρούς ανέμους.
3. Η **εναέρια καύσιμη ύλη** όταν καίγεται καταναλώνει σημαντικές ποσότητες καυσίμου σε μικρό χρόνο. Η πυρκαγιά που αναπτύσσεται λέγεται πυρκαγιά κόμης και καίει συνήθως συστάδες βλάστησης με πυκνή συγκόμωση και ύψος μεγαλύτερο από 2 m. Παρουσία πολύ ισχυρού ανέμου είναι δυνατό να κάψει και συστάδες βλάστησης με όχι και τόσο πυκνή συγκόμωση. Λίγες πυρκαγιές εξελίσσονται σε πυρκαγιές κόμης που εξαπλώνονται πολύ γρήγορα, παρόλα αυτά όμως οι πυρκαγιές αυτές είναι σημαντικές διότι μπορεί να προκύψει κηλίδωση ή λαμπάδιασμα μεμονωμένων δέντρων.

5.3.1 Τα Επτά (7) Χαρακτηριστικά της Καύσιμης Ύλης που Επηρεάζουν τη Συμπεριφορά της Δασικής Πυρκαγιάς

Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς είναι επτά (Εικόνα 5.1):

1. Ξηρή Μάζα (Ποσότητα) (Loading)
2. Μέγεθος και σχήμα (Size and shape)
3. Πυκνότητα (Compactness)
4. Οριζόντια συνέχεια (Horizontal continuity)
5. Κατακόρυφη (Κάθετη) διάταξη (Vertical arrangement)
6. Χημική σύνθεση (Chemical content)
7. Περιεχόμενη υγρασία (Moisture content)



Σχήμα 5.1: Χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης που επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς

5.3.2 Ποσότητα ή Φορτίο Καύσιμης Ύλης ανά Τάξη Μεγέθους

Η ποσότητα της καύσιμης ύλης διαχωρίζεται γενικά από τα διαφορετικά μεγέθη ζωντανών και νεκρών συστατικών της. Για λόγους μοντελοποίησης και ανάλυσης, η νεκρή καύσιμη ύλη κατηγοριοποιείται σε τέσσερις ομάδες ανάλογα με τη διάμετρο της. Οι κατηγορίες αυτές είναι:

- Χορτάρι, φυλλοτάπητας (ή φυλλοστρωμνή) και χούμος με διάμετρο < 0,5 cm
- Κλαδάκια και βλαστοί με διάμετρο 0,5–2,5 cm
- Κλαδιά με διάμετρο 2,5–7,5 cm
- Κορμοί και κλαδιά με διάμετρο > 7,5 cm

Η ποσότητα της καύσιμης ύλης συνήθως μετράται σε t/ha ή kg/m² για ελαφρύτερη καύσιμη ύλη όπως το χορτάρι.

5.3.3 Το Μέγεθος και το Σχήμα της Καύσιμης Ύλης

Το μέγεθος και το σχήμα της καύσιμης ύλης έχει σημασία στην ανάφλεξη της πυρκαγιάς. Τα μικρά κομμάτια καύσιμης ύλης αναφλέγονται και διατηρούν την καύση ευκολότερα από τα μεγάλα κομμάτια. Αυτό συμβαίνει διότι χρειάζεται λιγότερη θερμότητα για να απομακρυνθεί η υγρασία και να φτάσει ένα σωματίδιο καύσιμης ύλης στη θερμοκρασία ανάφλεξης.

Το μέγεθος και το σχήμα των φλεγόμενων καύσιμων υλικών και καυτρών επηρεάζουν την ποσότητα και την απόσταση της κηλίδωσης. Μικρά σε μέγεθος φλεγόμενα υλικά δεν μπορούν να διατηρήσουν την καύση για το χρόνο που χρειάζεται για την κάλυψη μεγάλων αποστάσεων και συνήθως προκαλούν μόνο κηλίδωση μικρής κλίμακας. Καύσιμα υλικά όπως: φλούδες φλοιού δένδρων, κώνοι, πευκοβελόνες και ξυλώδη σωματίδια είναι παραδείγματα φλεγόμενων υλικών που έχουν ανυψωθεί μέσα σε στήλες μεταφοράς θερμότητας και έχουν μεταφερθεί 15 km ή και πιο πολύ προς την κατεύθυνση του ανέμου από την πυρκαγιά. Εκτός από το μέγεθος, μεγάλη σημασία έχει και το σχήμα των καυσίμων υλών στο φαινόμενο της κηλίδωσης. Υλικά με μεγάλο λόγο επιφάνειας- όγκου, δηλαδή πιο επίπεδα σε σχήμα, έχουν αυξημένα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά και ευκολότερη ανύψωση σε μεγαλύτερα ύψη από τις στήλες μεταφοράς θερμότητας. Το σχήμα της καύσιμης ύλης είναι επίσης σημαντικό στην κηλίδωση προς τα κατάντη μιας πλαγιάς από κυλιόμενα φλεγόμενα υλικά - καύτρες. Κυλινδρικά κλαδιά, κουκουνάρια και κυλινδρικά φυτά προκαλούν ιδιαίτερα προβλήματα σε αυτές τις περιοχές.

5.3.4 Η Συμπαγότητα της Καύσιμης Ύλης (Compactness) και Βάθος ή Ύψος Στρώματος Καύσιμης Ύλης - Προσανατολισμός

Η συμπαγότητα της καύσιμης ύλης είναι ένα μέγεθος που περιγράφει το πόσο κοντά μεταξύ τους είναι τα σωματίδια της καύσιμης ύλης. Το πόσο κοντά ή μακριά, όπως και το ποια είναι η διάταξη των σωματιδίων της καύσιμης ύλης επηρεάζει την ανάφλεξη αλλά και την καύση. Μια πυρκαγιά εξαπλώνεται αργά σε ένα πυκνά συμπαγές καύσιμο ενώ εξαπλώνεται πιο γρήγορα σε ένα λιγότερο συμπαγές καύσιμο. Το βάθος στρώματος καύσιμης ύλης (fuel bed depth) είναι το μέσο ύψος της επιφανειακής καύσιμης ύλης που περιέχεται στη ζώνη καύσης ενός μετώπου που εξαπλώνεται. Ο προσανατολισμός της καύσιμης ύλης αναφέρεται στον οριζόντιο ή κατακόρυφο προσανατολισμό της διάταξης της καύσιμης ύλης που καίγεται.

- Οριζόντια προσανατολισμένη καύσιμη ύλη ονομάζουμε την καύσιμη ύλη που αυξάνεται αργά σε βάθος καθώς μεγαλώνει το φορτίο. Συναντάται σε υπολείμματα υλοτομίας και στρωμνής δένδρων.
- Κατακόρυφη προσανατολισμένη καύσιμη ύλη ονομάζουμε την καύσιμη ύλη που μεγαλώνει γρήγορα σε βάθος με την αύξηση στο φορτίο της. Βρίσκεται σε ομάδες θάμνων και χόρτων.

5.3.5 Οριζόντια συνέχεια – Κατακόρυφη Διάταξη και Σύσταση

Οριζόντια συνέχεια είναι η οριζόντια κατανομή της καύσιμης ύλης σε διάφορα επίπεδα. Επηρεάζει στο πού θα εξαπλωθεί μία πυρκαγιά και για το εάν η πυρκαγιά θα είναι επιφανειακή ή πυρκαγιά κόμης ή και τα δύο. Η οριζόντια συνέχεια της λεπτής καύσιμης ύλης είναι πολύ σημαντική στην εξάπλωση των επιφανειακών πυρκαγιών, από τη στιγμή που οι επιφανειακές πυρκαγιές είναι πιο συχνές. Στην περίπτωση που υπάρχουν ανοιχτές περιοχές, χωρίς βλάστηση, τότε δεν υπάρχει συνέχεια στην καύσιμη ύλη και η πυρκαγιά περιορίζεται. Αν υπάρχει ισχυρός άνεμος τότε είναι δυνατή η εξάπλωση της πυρκαγιάς μέσω της κηλίδωσης σε ασυνεχή καύσιμη ύλη. Επομένως αντιτυρικές ζώνες ή φυσικά εμπόδια μπορεί να μην σταματήσουν την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς.

Εκτός από τη συνέχεια της καύσιμης ύλης στο επίπεδο των επιφανειακών πυρκαγιών, σημαντική είναι και η συνέχεια στην εναέρια καύσιμη ύλη η οποία έχει σχέση με το βαθμό συγκόμωσης της βλάστησης. Μία βλάστηση με μεγάλο βαθμό συγκόμωσης, δηλαδή με τις κόμης των δέντρων πολύ κοντά η μία στην άλλη, δημιουργεί σκιά στην επιφανειακή καύσιμη ύλη αυξάνοντας την υγρασία της. Επίσης, όσο μεγαλύτερη είναι η συγκόμωση, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό επιδρά στις επιφανειακές πυρκαγιές που καίνε στον υπόροφο σε ένα κλειστό περιβάλλον.

Η κατακόρυφη διάταξη έχει να κάνει με την κάθετη απόσταση της καύσιμης ύλης από το έδαφος. Επίσης έχει σχέση με την κατακόρυφη συνέχειά της. Δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται στα διάφορα κατακόρυφα επίπεδα. Το ύψος πάνω από το έδαφος και η κατακόρυφη διάταξη επηρεάζουν το κατά πόσο θα μεταδοθεί η πυρκαγιά στα διάφορα επίπεδα της καύσιμης ύλης.

Μία πολύ σημαντική παράμετρος της καύσιμης ύλης είναι η σύστασή της. Έχει σημασία η αναλογία ζωντανής προς νεκρή καύσιμη ύλη καθώς επίσης και η χημική σύσταση των καυσίμων. Και οι δύο παράμετροι επηρεάζουν τη δυνατότητα καύσης ενός καυσίμου. Όσο μεγαλύτερο το ποσό της νεκρής καύσιμης ύλης συγκρινόμενο με αυτό της ζωντανής, τόσο περισσότερο εύφλεκτο είναι το καύσιμο. Αυτό συμβαίνει διότι τα νεκρά καύσιμα είναι αυτά που μεταδίδουν τη φωτιά και θερμαίνουν και τα ζωντανά καύσιμα έως την ανάφλεξη τους. Επίσης ανάλογα με τη χημική σύσταση των καυσίμων ενισχύεται ή επιβραδύνεται η

καύση. Τα καύσιμα είναι δυνατόν να περιέχουν πτητικές ουσίες (ρητίνες, έλαια, κεριά και πίσσα) και διάφορα μέταλλα. Οι μεγάλες συγκεντρώσεις πτητικών ουσιών συμβάλλουν σε υψηλές ταχύτητες εξάπλωσης και μεγάλες θερμικές εντάσεις της πυρκαγιάς. Από την άλλη, μεγάλες συγκεντρώσεις μετάλλων είναι δυνατό να περιορίσουν την ένταση και την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς.

5.4 ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΗΣ ΚΑΥΣΙΜΗΣ ΥΛΗΣ

Η υγρασία καύσιμης ύλης είναι η ποσότητα νερού που υπάρχει σε ένα καύσιμο, εκφρασμένη ως ποσοστό του ξηρού του βάρους. Ένα καύσιμο που ξεραίνεται σε φούρνο είναι τελείως στεγνό από υγρασία, δηλαδή η υγρασία του είναι 0%. Τα καύσιμα μπορούν να ζυγίζονται πριν και μετά την ξήρανση τους σε φούρνο, και το ποσοστό υγρασίας μπορεί να καθοριστεί διαιρώντας τη διαφορά ανάμεσα στην αρχική/υγρή μάζα και τη ξηρή μάζα δια την ξηρή μάζα, σύμφωνα με την εξίσωση (5):

$$Y_{\kappa} = \frac{B_{\Upsilon} - B_{\Xi}}{B_{\Xi}} \times 100 \quad (5)$$

όπου,

Y_{κ} = η υγρασία της καύσιμης ύλης (%)

B_{Υ} = η υγρή μάζα της καύσιμης ύλης (g)

B_{Ξ} = η ξηρή μάζα της καύσιμης ύλης (g)

Η υγρασία ενός καυσίμου επηρεάζει την ανάφλεξη και την καύση της ύλης που είναι διαθέσιμη για καύση. Όταν η περιεχόμενη υγρασία είναι υψηλή, οι πυρκαγιές αναφλέγονται και καίνε ελάχιστα έως καθόλου. Όταν η υγρασία είναι χαμηλή, οι πυρκαγιές αναφλέγονται εύκολα, με έντονη καύση και γρήγορη εξάπλωση. Όμως δεν εμπλέκονται όλα τα καύσιμα σε μια πυρκαγιά και δεν καταναλώνονται όλα από την πυρκαγιά. Επίσης τα καύσιμα περιέχουν ένα συνδυασμό νεκρής και ζωντανής καύσιμης ύλης, με διαφορετικό εύρος υγρασιών η καθεμία. Επομένως η εύρεση της υγρασίας των καυσίμων είναι μια σύνθετη και πολύπλοκη διαδικασία.

Η ζωντανή και η νεκρή βλάστηση έχουν διαφορετικούς μηχανισμούς κατακράτησης του νερού και αντιδρούν διαφορετικά στον καιρό. Η ζωντανή βλάστηση έχει πολύ μεγαλύτερη περιεχόμενη υγρασία που μεταβάλλεται περισσότερο σε εποχική και όχι σε

ημερήσια βάση, όπως συμβαίνει στα νεκρά καύσιμα. Είναι επίσης σημαντικό το γεγονός ότι το ανώτερο όριο υγρασίας των ζωντανών καυσίμων μπορεί να φτάσει το 300%, ενώ των νεκρών στο περίπου 25-30%.

5.4.1 Τα Πέντε Στάδια Φυτικής Ανάπτυξης της Ζωντανής Καύσιμης Ύλης σε Αντιστοίχιση με τις Περιεχόμενες Υγρασίες τους

Το νερό είναι απαραίτητο στοιχείο στις βιολογικές διεργασίες των ζωντανών φυτών. Μεταφέρει τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους από τις ρίζες στα φύλλα, βοηθάει στην ανάπτυξη των φυτών και μέσω των πόρων των φύλλων κάποια ποσότητα νερού μετατρέπεται σε υδρατμούς και εξατμίζεται. Το φαινόμενο της εξάτμισης του νερού μέσω των φυτών λέγεται διαπνοή. Θεωρείται ότι περίπου το 10% της υγρασίας της ατμόσφαιρας προέρχεται από τη διαπνοή των φυτών. Η ποσότητα νερού που τα φυτά διαπνέουν μεταβάλλεται ανάλογα με τον τόπο και το χρόνο και αυτό επηρεάζει σημαντικά την υγρασία τους.

Η υγρασία της ζωντανής καύσιμης ύλης μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης της ζωντανής βλάστησης. Ο Πίνακας 5.2 δίνει προσεγγιστικά τα ποσοστά της περιεχόμενης υγρασίας για τα πέντε στάδια της φυτικής ανάπτυξης. Τα στάδια αυτά και η μέση περιεχόμενη υγρασία τους είναι ένας παράγοντας που συντελεί στη συμπεριφορά των πυρκαγιών.

Στάδια Φυτικής Ανάπτυξης Ζωντανής Καύσιμης Ύλης	Ποσοστό Υγρασίας (%)
Φρέσκο φύλλωμα, ανάπτυξη μονοετών, νωρίς στον κύκλο ανάπτυξης	300
Φύλλωμα που ωριμάζει και που ακόμα αναπτύσσεται με πλήρη διόγκωση	200
Ωριμο φύλλωμα, ολοκληρωμένη νέα ανάπτυξη και συγκρίσιμη με το παλιό πολυετές φύλλωμα	100
Εισαγωγή λανθάνουσας κατάστασης, αρχή χρωματισμού, πεσμένα φύλλα	50
Εντελώς αποξηραμένο φύλλωμα	Λιγότερο από 30% (Αντιμετώπιση ως νεκρή καύσιμη ύλη)

Πίνακας 5.2: Τα πέντε (5) στάδια φυτικής ανάπτυξης της ζωντανής καύσιμης ύλης σε αντιστοίχιση με τις περιεχόμενες υγρασίες τους

5.4.2 Σχέση Σχετικής Υγρασίας- Ανέμου και Περιεχόμενης Υγρασίας Λεπτής και Χονδρής (Μεγάλης) Καύσιμης Ύλης

5.4.2.1 Ανταλλαγή Υγρασίας Μεταξύ Καύσιμης Ύλης και Ατμόσφαιρας

Τα καύσιμα ανταλλάσσουν συνεχώς υγρασία με την ατμόσφαιρα. Άρα, κατά τη διάρκεια υγρών περιόδων, ο ατμοσφαιρικός αέρας έχει υψηλή σχετική υγρασία λόγω των κατακρημνισμάτων έτσι υπάρχει καθαρό κέρδος στην υγρασία της καύσιμης ύλης. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν ο αέρας είναι ξηρός με χαμηλή σχετική υγρασία, τα καύσιμα χάνουν περισσότερη υγρασία στο περιβάλλον από όση απορροφούν. Στη συνέχεια θα αναφερθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό ανταλλαγής υγρασίας μεταξύ του περιβάλλοντος αέρα και της καύσιμης ύλης.

- Η διαφορά τάσης των υδρατμών
- Το μέγεθος της καύσιμης ύλης
- Παρουσία ή απουσία του ανέμου
- Εγγύτητα της καύσιμης ύλης σε υγρό έδαφος
- Η συμπαγότητα της καύσιμης ύλης

5.4.2.2 Περιεχόμενη Υγρασία Ισορροπίας ή Ισοζυγίου (ΠΥΙ)

Η περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας προκύπτει όταν δεν υπάρχει καθαρό κέρδος ή απώλεια υγρασίας μεταξύ της καύσιμης ύλης και της ατμόσφαιρας. Τα καύσιμα και ο ατμοσφαιρικός αέρας αλληλεπιδρούν προσπαθώντας να φτάσουν στην υγρασία ισορροπίας. Αυτό συμβαίνει όταν τα καύσιμα και ο αέρας επιτύχουν ίση τάση υδρατμών (vapor pressure). Αυτό είναι δυνατόν να συμβεί σε μικρά λεπτά καύσιμα, αλλά δεν συμβαίνει σχεδόν ποτέ στα μεγαλύτερα καύσιμα καθώς ο χρόνος που απαιτείται για να επιτευχθεί η ισορροπία σε αυτά, είναι πολύ μεγαλύτερος και η υγρασία της ατμόσφαιρας δεν παραμένει για μεγάλα χρονικά διαστήματα σταθερή.

Ο τρόπος με τον οποίο το ποσοστό υγρασίας προσεγγίζει την τιμή ισορροπίας δεν εξαρτάται μόνο από το είδος της καύσιμης ύλης, αλλά και από άλλα χαρακτηριστικά όπως το σχήμα, το μέγεθος των καυσίμων και το βαθμό συμπαγότητας ή αερισμού των καυσίμων. Για κάθε καύσιμη ύλη, η τάση ξήρανσης ή διαβροχής είναι θεωρητικά ανάλογη με τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής περιεκτικότητας σε υγρασία και της υγρασίας ισορροπίας που

εξαρτάται και από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Επιπροσθέτως, η περιεχόμενη υγρασία προσεγγίζει την ισορροπία με μία αντίστροφη λογαριθμική πορεία. Δηλαδή όσο πιο πολύ πλησιάζει η πραγματική υγρασία στην υγρασία ισορροπίας, τόσο μικρότερη είναι η τάση αύξησης ή μείωσης.

5.4.2.3 Περιβαλλοντικοί Παράγοντες που Επηρεάζουν την Υγρασία της Καύσιμης Ύλης

Η υγρασία της καύσιμης ύλης εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία του αέρα και τις κατακρημνίσεις. Σημαντική παράμετρος που διαφοροποιεί την υγρασία της καύσιμης ύλης, είναι ο άνεμος, διότι επηρεάζει την ανταλλαγή της υγρασίας μεταξύ των καυσίμων και του ατμοσφαιρικού αέρα. Έμμεσες επιδράσεις στην υγρασία αποτελούν κάποιοι τοπικοί παράγοντες του καιρού (σύννεφα και ηλιακή ακτινοβολία) και της τοπογραφίας (υψόμετρο, έκθεση και κλίση) που μεταβάλλουν την ατμοσφαιρική θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα και κατά συνέπεια επηρεάζουν την υγρασία των καυσίμων.

Ο άνεμος επηρεάζει την υγρασία της καύσιμης ύλης επειδή αυξάνει το ρυθμό με τον οποίο τα καύσιμα φτάνουν την περιεχόμενη υγρασία τους σε ισορροπία με την ατμόσφαιρα. Ο αέρας επιταχύνει την ξήρανση με την ακόλουθη διαδικασία. Κατά τη διάρκεια συνθηκών χωρίς ρεύματα αέρα, ο αέρας που είναι κοντά στα καύσιμα τείνει να κορεστεί με υδρατμούς, ελαττώνοντας το ρυθμό εξάτμισης της υγρασίας από το καύσιμο. Ο άνεμος απομακρύνει τον κορεσμένο αέρα αντικαθιστώντας τον συνεχώς με ξηρότερο αέρα, επιταχύνοντας έτσι τη διαδικασία της εξάτμισης. Στην αντίθετη περίπτωση ένας άνεμος με μεγάλη σχετική υγρασία, αντικαθιστά συνεχώς τον ξηρότερο αέρα με πιο υγρό, αυξάνοντας το ρυθμό απορρόφησης υγρασίας από τα καύσιμα.

Μέτριοι ή ισχυροί άνεμοι επίσης, μπορεί να επηρεάσουν τις επιφανειακές θερμοκρασίες των καυσίμων, μεταβάλλοντας έτσι την επιφανειακή υγρασία της καύσιμης ύλης. Κατά τις θερμές ώρες της ημέρας, ο άνεμος μπορεί να απομακρύνει τα θερμά στρώματα αέρα που είναι πλησίον των καυσίμων και να τα αντικαταστήσει με ψυχρότερο αέρα. Αποτέλεσμα του γεγονότος αυτού, να αυξάνεται η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος αέρα, να μειώνεται η επιφανειακή θερμοκρασία της καύσιμης ύλης και να αυξάνεται η υγρασία της. Τις νυχτερινές ώρες, ο άνεμος μπορεί να αποτρέψει τις επιφανειακές θερμοκρασίες αέρα από το να φτάσουν στο σημείο δρόσου, περιορίζοντας έτσι την αύξηση της επιφανειακής υγρασίας της καύσιμης ύλης.

Με την αύξηση του υψόμετρου η θερμοκρασία συνήθως μειώνεται με ρυθμό $0,65^{\circ}\text{C}$ ανά 100 m. Όταν η θερμοκρασία όμως ελαττώνεται με το υψόμετρο, η σχετική υγρασία αυξάνεται με αποτέλεσμα η υγρασία της βλάστησης να μεγαλώνει. Αν υπολογιστεί η

καθυστερημένη τήξη του χιονιού και η μεγαλύτερη αναλογία ζωντανής προς νεκρής καύσιμης ύλης σε μεγαλύτερα υψόμετρα, η υγρασία της καύσιμης ύλης είναι δυνατόν να αυξηθεί περισσότερο περιορίζοντας την πιθανότητα ανάφλεξης μιας πυρκαγιάς και αν αυτό συμβεί, τις ταχύτητες εξάπλωσής της.

Οι νότιες πλαγιές δέχονται μεγαλύτερα ποσά θερμότητας κατά τη διάρκεια της ημέρας από τις βόρειες πλαγιές. Επομένως, οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες, η σχετική υγρασία χαμηλότερη και η υγρασία της καύσιμης ύλης είναι συνήθως χαμηλότερη στις νότιες πλαγιές. Είναι φανερό δηλαδή, ότι οι νότιες και νοτιοδυτικές εκθέσεις έχουν τη χαμηλότερη μέση περιεχόμενη υγρασία καύσιμης ύλης από τις άλλες εκθέσεις. Τους καλοκαιρινούς μήνες, το επίπεδο έδαφος δέχεται σχεδόν τα ίδια ποσά θερμότητας με τις νότιες εκθέσεις. Τη νύχτα, οι διαφορές της θερμοκρασίας στις διάφορες εκθέσεις ελαττώνεται και μέχρι να ξημερώσει, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία και η υγρασία της λεπτής καύσιμης ύλης έχουν σχεδόν σταθεροποιηθεί. Οι θερμοκρασίες στις νότιες πλαγιές και στους πυθμένες των κοιλάδων, κατά τη διάρκεια της νύχτας, είναι πιθανό να μεταβάλλονται εξαιτίας των αναστροφών και των θερμικών ζωνών που μπορεί να αναπτυχθούν. Επίσης, οι ανατολικές εκθέσεις αποκτούν τη χαμηλότερη υγρασία καύσιμης ύλης το μεσημέρι, ενώ οι νοτιοδυτικές εκθέσεις παρουσιάζουν τη χαμηλότερη περιεχόμενη υγρασία καύσιμης ύλης το απόγευμα.

Η κλίση της πλαγιάς επηρεάζει την υγρασία της καύσιμης ύλης στις διάφορες πλαγιές διότι διαφοροποιεί την ποσότητα της ακτινοβολίας που δέχονται τα καύσιμα. Είναι σημαντικό ότι επιφάνειες κάθετες στην προσπίπτουσα ακτινοβολία προσλαμβάνουν πολύ περισσότερη θερμότητα από επιφάνειες που είναι σχεδόν παράλληλες σε αυτή. Η γωνία με την οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία στις διάφορες επιφάνειες μεταβάλλεται μέσα στην ημέρα και την περίοδο του έτους.

5.4.3 Επίδραση των Κατακρημνίσεων και της Εδαφικής Υγρασίας στην Περιεχόμενη Υγρασία των Καυσίμων

Τα νεκρά καύσιμα χαρακτηρίζονται από δύο τύπους, οι οποίοι είναι σημαντικοί στη συμπεριφορά των πυρκαγιών. Οι κατακρημνίσεις επηρεάζουν τους δύο τύπους διαφορετικά μεταβάλλοντας τις περιεχόμενες υγρασίες τους. Οι τύποι είναι:

- ✓ Το κλαδιά και τα νεκρά φύλλα που είναι πάνω από το έδαφος ή στα δένδρα. Επηρεάζονται σαν μεμονωμένα καύσιμα, ανάλογα με το μέγεθος και το είδος τους, από τις κατακρημνίσεις και τις περιβαλλοντικές συνθήκες.

- ✓ Το επιφανειακό στρώμα νεκρών καυσίμων (συσσωρευμένη νεκρή στρωμή από φύλλα και κλαδιά) πάνω από το έδαφος. Η συμπεριφορά του στις αλλαγές της υγρασίας είναι σύνθετη. Αυτό συμβαίνει γιατί συνήθως αποτελείται από υλικά με διαφορετικό βαθμό αποσύνθεσης αναμειγμένα με οργανικό έδαφος. Άξιο αναφοράς είναι ότι μόνο η επάνω επιφάνεια είναι εκτεθειμένη στις ατμοσφαιρικές συνθήκες ενώ η κάτω επιφάνεια έρχεται σε επαφή με το έδαφος.

Όταν το στρώμα των φύλλων είναι πυκνό, η κυκλοφορία του αέρα στα κάτω στρώματα μπορεί να είναι σχεδόν ανύπαρκτη. Όμως μια καλή βροχόπτωση μπορεί να διαποτίσει το κάτω μέρος των καυσίμων και να φτάσει στο έδαφος. Αν υπάρξει στη συνέχεια περίοδος ξηρασίας το πάνω μέρος των καυσίμων αρχίζει να ξηραίνεται και να γίνεται αρκετά εύφλεκτο, ενώ τα χαμηλότερα στρώματα εξακολουθούν να είναι υγρά. Στην αντίθετη περίπτωση, μια παρατεταμένη ξηρασία είναι δυνατό να προκαλέσει τη στέγνωση μέχρι το κάτω μέρος των καυσίμων και στη συνέχεια η δροσιά το πρωί και η υψηλή σχετική υγρασία να αυξήσουν την υγρασία στο επάνω μέρος.

Οι κατακρημνίσεις ανάλογα με την ποσότητα και διάρκειά τους, επιδρούν διαφορετικά στην περιεχόμενη υγρασία των νεκρών καυσίμων. Μπορούν να αυξήσουν την υγρασία της λεπτής νεκρής καύσιμης ύλης πιο γρήγορα από κάθε άλλο παράγοντα. Τα λεπτά νεκρά καύσιμα με τη βροχή φτάνουν στο σημείο κορεσμού τους γρήγορα. Τα μεγάλα (χονδρά) νεκρά καύσιμα αντιδρούν πιο αργά στη βροχή διότι το περισσότερο νερό απορρέει από το καύσιμο.

5.4.4 Η Έννοια και η Σημασία της Χρονικής Υστέρησης για την Υγρασία της Καύσιμης Ύλης και τους Πυροσβέστες

Η χρονική υστέρηση δείχνει το ρυθμό που το καύσιμο κερδίζει ή χάνει υγρασία λόγω μεταβολών στο περιβάλλον του. Πιο συγκεκριμένα, είναι ο χρόνος όπου το καύσιμο κερδίζει ή χάνει το 63% περίπου της διαφοράς μεταξύ της αρχικής του περιεχόμενης υγρασίας (ΑΠΥ) και της περιεχόμενης υγρασίας του ισορροπίας (ΠΥΙ). Η έννοια της χρονικής υστέρησης (timelag) στην προσρόφηση (adsorption) ή εκρόφηση (desorption) της υγρασίας στην καύσιμη ύλη εκφράζεται από την εξίσωση (6):

$$y = a \times e^{-\lambda t} \quad (6)$$

όπου,

- y = η προσρόφηση ή εκρόφηση της υγρασία καύσιμης ύλης.
- a = ο συντελεστής παλινδρόμησης.
- e = η βάση των νεπέριων/φυσικών λογαρίθμων, ισούται περίπου με 2,7183.
- λ = ο συντελεστής αντίστροφης/φθίνουσας εκθετικής καμπύλης.
- t = η χρονική υστέρηση.

Ο ρυθμός που κερδίζει ή χάνει υγρασία ένα καύσιμο δεν είναι σταθερός. Η καύσιμη ύλη αντιδρά αρχικά γρήγορα όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες. Όσο η υγρασία του καυσίμου προσεγγίζει την υγρασία ισορροπίας, η μεταβολή στην περιεχόμενη υγρασία γίνεται πιο αργή. Στη φύση, τα καύσιμα χρειάζονται 5 περιόδους χρονικής υστέρησης για να προκύψει το 95% της μεταβολής. Η χρονική υστέρηση των λεπτών καυσίμων είναι μικρή και επομένως φτάνουν στην περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας γρήγορα. Τα μεγαλύτερα καύσιμα έχουν μεγαλύτερη χρονική υστέρηση και σπάνια φτάνουν την περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας.

Η νεκρή καύσιμη ύλη κατηγοριοποιείται σε τέσσερις κατηγορίες μεγέθους βασισμένες στη χρονική υστέρηση:

1. Χρονική υστέρηση 1 ώρας (1-h XY): καύσιμα διαμέτρου από 0 cm έως 0,5 cm.
2. Χρονική υστέρηση 10 ωρών (10-h XY): καύσιμα διαμέτρου από 0,5 έως 2,5 cm.
3. Χρονική υστέρηση 100 ωρών (100-h XY): καύσιμα διαμέτρου από 2,5 έως 7,5 cm.
4. Χρονική υστέρηση 1000 ωρών (1000-h XY): καύσιμα διαμέτρου από 7,5 έως 20 cm.

Τα καύσιμα χρονικής υστέρησης 100-h HY και 1000-h XY χρησιμοποιούνται κυρίως ως δείκτες ξηρασίας και γενικότερης δριμύτητας της περιόδου των πυρκαγιών. Τα καύσιμα των 10-h XY είναι σημαντικά στη δημιουργία προβλέψεων της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς αλλά δεν είναι τόσο σημαντικά όσο τα καύσιμα της 1-h XY. Πολύ σημαντικοί δείκτες συμπεριφοράς των πυρκαγιών είναι τα λεπτά καύσιμα με χρονική υστέρηση 1 ώρας (1-h XY) και διάμετρο έως 0,5 cm. Η κατηγορία αυτή είναι ο κύριος φορέας της πυρκαγιάς που καθορίζει όσο καμιά άλλη εάν θα υπάρξει ανάφλεξη και αν υπάρξει, ποια θα είναι η ταχύτητα εξάπλωσης. Είναι, επίσης, η ομάδα που μεταβάλλεται συνεχώς με τις αλλαγές της σχετικής υγρασίας.

5.4.5 Υγρασία Σβησίματος (*Moisture of Extinction*)

Τα καύσιμα αναφλέγονται όταν προθερμαίνονται έως το σημείο ανάφλεξης τους. Όμως, για την απομάκρυνση της υγρασίας των καυσίμων θα πρέπει να καταναλωθεί ένα ποσό θερμότητας που είναι τόσο μεγάλο όσο μεγάλη είναι η ποσότητα της περιεχόμενης υγρασίας του καυσίμου. Άρα, η περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης μπορεί μέχρι ένα σημείο, να επιβραδύνει την καύση και την προθέρμανση των νέων καυσίμων, με αποτέλεσμα να μην επιτυγχάνεται η θερμοκρασία ανάφλεξης στα νέα καύσιμα.

Επομένως υπάρχει μια υγρασία, στη λεπτή νεκρή καύσιμη ύλη, η οποία περιορίζει την καύση και την ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Η υγρασία αυτή λέγεται υγρασία σβησίματος και είναι η περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης πάνω από την οποία η πυρκαγιά δεν θα εξαπλωθεί ή θα εξαπλωθεί σποραδικά και απρόβλεπτα. Η υγρασία σβησίματος εξαρτάται από την κατάσταση της καύσιμης ύλης. Συγκεκριμένα, εξαρτάται από διάφορα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης όπως το μέγεθος, το φορτίο, τη διάταξη και τη χημική σύνθεση. Η υγρασία σβησίματος είναι μεγαλύτερη (περίπου 30%) για πιο συμπαγή καύσιμα, όπως οι πευκοβελόνες και είναι μικρότερη (περίπου 12%) για τα λεπτά και πορώδη χορτάρια. Στους θάμνους θα μπορούσε να φθάσει και μέχρι και 40%. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι μια πυρκαγιά που έχει πάρει διαστάσεις με μεγάλη ένταση ίσως να μην περιοριστεί αν επιτευχθεί η υγρασία σβησίματος όπως θα έκανε μία πυρκαγιά σε αρχικό στάδιο. Έτσι, η κυρίως πυρκαγιά θα συνεχίζει να εξαπλώνεται παρόλο που δεν επιτυγχάνεται η ολική καύση. Τέλος, παρατίθενται για τα παρακάτω είδη, τα εύρη της υγρασίας σβησίματος της λεπτής νεκρής καύσιμης ύλης:

❖ Θάμνοι:	20 – 40 %
❖ Χορτάρια:	12 – 25 %
❖ Στρωμνή δένδρων:	25 – 30 %
❖ Υπολείμματα υλοτομίας:	15 – 25 %

5.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΥΣΙΜΗΣ ΥΛΗΣ

5.5.1 Επίδραση της Ημερήσιας Ηλιακής Ακτινοβολίας και Νυχτερινή Απώλεια από διάφορες Επιφάνειες

5.5.1.1 Παράγοντες που Επηρεάζουν τις Θερμοκρασίες στην Επιφάνεια

- Η γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας και η διάρκειά της στην επιφάνεια.
- Η ποσότητα των αερολυμάτων και της υγρασίας στην ατμόσφαιρα.

- Οι επιφανειακές ιδιότητες του εδάφους και της βλάστησης όπως η θερμοχωρητικότητα - θερμική αγωγιμότητα, η υφή, το χρώμα, η διαφάνεια και η επιφανειακή υγρασία.

5.5.1.2 Πώς οι Ιδιότητες της Επιφάνειας Επηρεάζουν τις Επιφανειακές Θερμοκρασίες

Σε μια καλοκαιρινή ημέρα θα αναλυθούν οι επιφανειακές θερμοκρασίες τεσσάρων (4) χαρακτηριστικών περιοχών. Οι περιοχές είναι η λίμνη, το δάσος, το χορτάρι – θάμνοι και το οργωμένο χωράφι. Παρουσιάζουν διαφορετικές τιμές στις επιφανειακές θερμοκρασίες τους, γιατί έχουν διαφορετικές ιδιότητες εδάφους και βλάστησης.

Η **λίμνη** παρουσιάζει την μικρότερη θερμοκρασία εξαιτίας των παρακάτω:

- Το νερό έχει καλή αγωγιμότητα.
- Η θερμοχωρητικότητα του νερού είναι μεγαλύτερη από αυτήν του εδάφους. Χρειάζεται δηλαδή περισσότερη θερμότητα για να αυξηθεί η θερμοκρασία του νερού.
- Λόγω της διάφανης επιφάνειας του νερού, έχει τη δυνατότητα να μοιράζει τη θερμότητα βαθύτερα μέσα στη μάζα της.
- Το χρώμα και η υφή της επιφάνειας της μπορεί να ανακλούν και να απορροφούν θερμότητα την ίδια στιγμή.
- Η εξάτμιση του νερού θα έχει ως αποτέλεσμα την ψύξη.

Το **δάσος** παρουσιάζει μεγαλύτερη θερμοκρασία από τη λίμνη και μικρότερη από το χορτάρι και τους θάμνους εξαιτίας των ακόλουθων:

- Η δασώδης περιοχή καλύπτεται από βλάστηση με μικρή αγωγιμότητα.
- Το χρώμα και η υφή της ανακλά και απορροφά συγχρόνως την ηλιακή ακτινοβολία.
- Η σκίαση του εδάφους από τη δασική βλάστηση διατηρεί τη θερμοκρασία του χαμηλή.
- Λόγω της διαπνοής, η απώλεια υγρασίας από τα δέντρα έχει ως αποτέλεσμα την ψύξη.

Το **χορτάρι** και οι **θάμνοι** παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμοκρασία από το δάσος και τη λίμνη για τους επόμενους λόγους:

- Λαμβάνουν περισσότερη απευθείας ακτινοβολία.
- Έχουν λιγότερη βλάστηση και σκίαση.
- Απορροφούν σημαντικά ποσά θερμότητας λόγω του χρώματος.
- Παρουσιάζουν χαμηλή επιφανειακή υγρασία.
- Μικρή θερμοχωρητικότητα.
- Έλλειψη διαφάνειας.

Τέλος, το **οργωμένο χωράφι** θα έχει τη μεγαλύτερη επιφανειακή θερμοκρασία από τα παραπάνω εξαιτίας του ότι:

- Απορροφά τα μεγαλύτερα ποσά θερμότητας λόγω του χρώματος και της υφής του.
- Παρουσιάζει έλλειψη βλάστησης, σκίασης και αδιαφάνεια.
- Έχει τη μικρότερη θερμοχωρητικότητα.

5.5.1.3 Απώλεια Θερμότητας τη Νύχτα

Τη νύχτα, όταν υπάρχουν σύννεφα στον ουρανό, περιορίζονται οι απώλειες θερμότητας της επιφάνειας, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να μην ελαττώνεται πολύ. Αυτό συμβαίνει γιατί τα σύννεφα δρουν σαν μόνωση. Το ίδιο κάνει και η βλάστηση. Επομένως, περιοχές γυμνές από βλάστηση, όπως το οργωμένο χωράφι, χάνουν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν χαμηλότερες επιφανειακές θερμοκρασίες από άλλες οι οποίες έχουν βλάστηση, ιδίως όταν ο ουρανός είναι καθαρός.

5.5.2 Τυπικές Ημερήσιες Αλλαγές στη Θερμοκρασία

Ο ημερήσιος θερμοκρασιακός κύκλος παρουσιάζει τη χαμηλότερη θερμοκρασία συνήθως κοντά στην ανατολή του ηλίου και τη μεγαλύτερη κατά τα μέσα του μεσημεριού. Υπάρχουν διαφοροποιήσεις σε αυτές τις τιμές, λόγω των τοπικών κλιματικών συνθηκών και

της τοπογραφίας. Σε πολύ ξηρές περιοχές το ημερήσιο εύρος της θερμοκρασίας μπορεί να φθάσει και τους 10°C κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού.

5.5.3 Επιδράσεις του Ανάγλυφου, της Βλάστησης, του Ανέμου και των Νεφών στη Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία συνήθως μεταβάλλεται μέσα σε μία περιοχή, κυρίως σε ορεινή τοπογραφία με ανομοιόμορφη βλάστηση. Ακόμη και σε μια μικρή περιοχή, μεταβολές στο ανάγλυφο, στη βλάστηση, στον άνεμο και στη νεφοκάλυψη μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλα θερμοκρασιακά εύρη. Αυτό συμβαίνει γιατί εκτός του ανέμου, οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζουν την ποσότητα της εισερχόμενης και εξερχόμενης ακτινοβολίας που προσπίπτει στο έδαφος. Στην περίπτωση του ανέμου, αυτός επηρεάζει την ποσότητα της ανάμειξης του αέρα κοντά στο έδαφος, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της επιφανειακής θερμοκρασίας.

5.5.3.1 Ανάγλυφο

Το υψόμετρο και η έκθεση επηρεάζουν σημαντικά τη θερμοκρασία. Συνήθως, οι ημερήσιες θερμοκρασίες μειώνονται με την αύξηση του υψόμετρου. Τη νύχτα όμως με ξαστεριά, η μεταβολή της θερμοκρασίας με το υψόμετρο συνήθως αντιστρέφεται. Ο ψυχρός αέρας κατέρχεται και συγκεντρώνεται μέσα στις κοιλάδες, προκαλώντας χαμηλότερες θερμοκρασίες σε μικρότερο υψόμετρο παρά σε μεγαλύτερο. Όσον αφορά την έκθεση, οι νότιες πλαγιές είναι θερμότερες από τις βόρειες διότι προσλαμβάνουν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας από τον ήλιο. Κάτω από πλήρη ηλιοφάνεια, η μέγιστη θερμοκρασία των νότιων πλαγιών μπορεί να είναι κατά μέσο όρο περίπου 3°C μεγαλύτερη από αυτή των βόρειων μόνο λόγω της επίδρασης της έκθεσης.

5.5.3.2 Βλάστηση

Η βλάστηση επηρεάζει την επιφανειακή θερμοκρασία του εδάφους διότι εμποδίζει την εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία τη μέρα και την εξερχόμενη ακτινοβολία τη νύχτα. Άρα, προκαλεί μικρότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της ημέρας, λόγω σκίασης και μεγαλύτερες κατά τη νύχτα. Όσο πιο πυκνή και υψηλή είναι η βλάστηση τόσο μεγαλύτερη επίδραση έχει. Σε ένα πυκνό δάσος, οι μεγαλύτερες ημερήσιες θερμοκρασίες βρίσκονται κοντά στην κορυφή των δέντρων. Επίσης, κοντά στο έδαφος παρατηρούνται οι μικρότερες ημερήσιες θερμοκρασίες. Οι θερμοκρασίες μέσα σε ένα πυκνό δάσος είναι 3°C με 5°C χαμηλότερες από τις θερμοκρασίες σε κοντινές περιοχές χωρίς βλάστηση. Τη νύχτα παρατηρείται συνήθως το αντίθετο.

5.5.3.3 Άνεμος

Ο άνεμος επηρεάζει τη θερμοκρασία διότι αναμειγνύει και ανανεώνει τον αέρα κοντά στο έδαφος με τον αέρα σε μεγαλύτερα υψόμετρα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να περιορίζει τις αυξητικές τάσεις της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επομένως, οι ημερήσιες θερμοκρασίες θα είναι χαμηλότερες όταν υπάρχει άνεμος. Τη νύχτα, ο άνεμος έχει το αντίθετο αποτέλεσμα διατηρώντας τη θερμοκρασία σε υψηλότερες τιμές από όταν επικρατεί άπνοια.

5.5.3.4 Σύννεφα

Η νεφοκάλυψη επηρεάζει τη θερμοκρασία σχεδόν με την ίδια διαδικασία όπως και η βλάστηση. Μία πολύ πυκνή νεφοκάλυψη μπορεί να μειώσει την ημερήσια θερμοκρασία το καλοκαίρι μέχρι και 8°C ή 12°C. Αντίθετα, η νεφοκάλυψη τη νύχτα συγκρατεί τις μειωτικές τάσεις της θερμοκρασίας και κατά συνέπεια παρατηρούνται μεγαλύτερες επιφανειακές θερμοκρασίες.

5.6 ΑΝΑΓΛΥΦΟ

5.6.1 Η Επίδραση της Τοπογραφίας στην Καύσιμη Ύλη και στην Καύση της

Η τοπογραφία είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών. Είναι γεγονός ότι δεν μεταβάλλεται τόσο στο χρόνο όσο μεταβάλλεται στο χώρο. Είναι δυνατό να τροποποιήσει τα καιρικά φαινόμενα σε ένα μέρος δημιουργώντας ιδιόμορφα τοπικά καιρικά φαινόμενα που επηρεάζουν την κατάσταση της βλάστησης και της καύσιμης ύλης.

5.6.1.1 Υψόμετρο Πάνω από το Επίπεδο της Θάλασσας

Το υψόμετρο πάνω από το επίπεδο της θάλασσας επηρεάζει τη γενικότερη κλιματική κατάσταση και τη διαθέσιμη καύσιμη ύλη με:

1. Την ποσότητα κατακρημνισμάτων που λαμβάνεται
2. Τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα
3. Την ποσότητα και το χρόνο τήξης του χιονιού
4. Τους τύπους και την ποσότητα της καύσιμης ύλης

5. Τους ρυθμούς ανάπτυξης της βλάστησης.
6. Τη διάρκεια της περιόδου των πυρκαγιών
7. Τη δραστηριότητα των κεραυνών που πέφτουν και προκαλούν αναφλέξεις

5.6.1.2 Θέση της Πλαγιάς- Έκθεση

Ανάλογα με τη θέση και την έκθεση της πλαγιάς, διαφοροποιείται η ποσότητα της θερμότητας που προσλαμβάνεται, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του αέρα. Αυτό προκαλεί με τη σειρά του διαφοροποίηση στο φορτίο, στον τύπο, στην υγρασία της καύσιμης ύλης και στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Παράδειγμα, μια νότια πλαγιά παρουσιάζει: τη μεγαλύτερη μέση θερμοκρασία, την κατώτερη υγρασία καύσιμης ύλης, την ελαφρύτερη καύσιμη ύλη, τη γρηγορότερη ξήρανση της καύσιμης ύλης, τη νωρίτερη τήξη του χιονιού και τον ανώτερο ρυθμό εξάπλωσης πυρκαγιάς. Επίσης είναι σημαντική η ώρα που εκδηλώνεται μια πυρκαγιά. Μία μη ενεργή πυρκαγιά σε μία νότια πλαγιά, νωρίς το πρωί, μπορεί να μεταβληθεί σε ενεργή πυρκαγιά κόμης το ίδιο μεσημέρι, όταν η υγρασία της καύσιμης ύλης είναι στην ελάχιστη ημερήσια τιμή της και αναπτυχθούν μέτριοι ή δυνατοί άνεμοι.

5.6.2 Επίδραση της Τοπογραφίας στη Διεύθυνση και στην Ταχύτητα Εξάπλωσης των Δασικών Πυρκαγιών

- Κλίση: Η κλίση επηρεάζει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς αφού βοηθάει στην προθέρμανση της καύσιμης ύλης που βρίσκεται ψηλότερα στην πλαγιά. Επίσης, είναι δυνατό να προκαλέσει κηλίδωση από κυλιόμενα και αιωρούμενα φλεγόμενα υλικά. Όταν αυξάνεται η κλίση, αυξάνεται και η ταχύτητα εξάπλωσης όπως και το μήκος της φλόγας. Υπάρχει και η περίπτωση της αναστροφής της κλίσης. Οι αναστροφές της κλίσης προκύπτουν όταν η πυρκαγιά περάσει σε μία πλαγιά αντίθετης διεύθυνσης.
- Ράχες (Ridges): Οι ράχες μπορεί να προκαλέσουν μεταβαλλόμενους ανέμους και σε συνδυασμό με αυτούς, φαινόμενα κηλίδωσης.
- Στενά Φαράγγια (Narrow Canyons): Η αύξηση της έντασης μιας πυρκαγιάς σε ένα στενό φαράγγι είναι δυνατό να προκαλέσει φαινόμενα κόμης και κηλίδωσης, με την

πυρκαγιά να μπορεί να περάσει στην απέναντι πλαγιά που έχει προθερμανθεί μέσω ακτινοβολίας. Επίσης, στην περίπτωση που υπάρχει θερμοκρασιακή αναστροφή και σπάσει, θα αυξηθεί η ένταση των ανέμων μέσα στο φαράγγι και η πυρκαγιά θα ενισχυθεί. Τέλος, οι επιφανειακοί άνεμοι ενισχύονται καθώς περνούν μέσα από το στενό φαράγγι δημιουργώντας δίνες και ισχυρά ανοδικά ρεύματα πάνω από τις πλαγιές.

- Τεμνόμενες Λεκάνες Απορροής (Intersecting Drainages): Οι τεμνόμενες λεκάνες απορροής επηρεάζουν την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς. Εκεί που τέμνονται οι λεκάνες απορροής, η πυρκαγιά μπορεί να ακολουθήσει μία ή και τις δύο λεκάνες. Η περιοχή εξάπλωσης της πυρκαγιάς, εξαρτάται από τη διεύθυνση των ανέμων στο φαράγγι, τους ανέμους που κυριαρχούν, τις δίνες που αναπτύσσονται στην ένωση των φαραγγιών και τη διαθέσιμη καύσιμη ύλη στην ένωση των φαραγγιών.

5.6.3 Πως οι Αλλαγές στην Καύσιμη Ύλη και την Τοπογραφία Εμποδίζουν Ολικά ή Μερικά την Εξάπλωση μιας Πυρκαγιάς

Εμπόδιο σε μια πυρκαγιά, αποτελεί μια περιοχή με πολύ μεγάλη υγρασία καύσιμης ύλης ή παρουσιάζει πολύ αραιή καύσιμη ύλη. Ολικά εμπόδια μπορεί να είναι:

- Βράχια ή γυμνό έδαφος
- Δρόμοι, μονοπάτια, κατασκευαστικά έργα
- Ποτάμια, λίμνες, ρέματα και υγρά εδάφη
- Παλιά καμένα εδάφη
- Διαφοροποίηση στον τύπο και στην υγρασία της καύσιμης ύλης

Μερικό εμπόδιο στο πέρασμα μιας πυρκαγιάς είναι δυνατό να αποτελέσει μια αλλαγή στην υγρασία της λεπτής νεκρής καύσιμης ύλης, η οποία είναι υπεύθυνη για την διατήρηση της καύσης.

5.6.4 Το “Φαινόμενο της Καμινάδας” στην Τοπογραφία Φαραγγιού

Το “φαινόμενο της καμινάδας” δημιουργείται όταν υπάρχει αστάθεια στην επιφάνεια και έτσι δημιουργούνται ρεύματα μετάδοσης θερμότητας μέσα στο φαράγγι. Στη συνέχεια, ο αέρας ωθείται στη βάση του φαραγγιού και ενισχύει τα ρεύματα μεταφοράς θερμότητας. Τέλος, χρειάζεται να υπάρχει διαθέσιμη καύσιμη ύλη για να μπορεί να υποστηρίξει μία γρήγορη καύση στην κεφαλή του φαραγγιού. Το “φαινόμενο της καμινάδας” δημιουργεί ακραίες ταχύτητες εξάπλωσης, υψηλές θερμικές εντάσεις πυρκαγιάς, συχνά κηλίδωση με μεγάλη δυσκολία στην κατάσβεση και τεράστια προβλήματα στην ασφάλεια των επιχειρήσεων.

5.7 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

Κάθε πυρκαγιά που βρίσκεται σε εξέλιξη είναι επικίνδυνη να δημιουργήσει μεγάλες καταστροφές, κάτω από ορισμένες συνθήκες. Είναι γνωστές οι μετεωρολογικές, οι τοπογραφικές και οι βλαστητικές συνθήκες που μεταβάλλονται στο χώρο και στο χρόνο και επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πυρκαγιών. Κάποιες πυρκαγιές είναι πιο επικίνδυνες να λάβουν μεγάλες διαστάσεις από άλλες καθώς αυτές εξελίσσονται. Η σωστή πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς είναι το κλειδί της επιτυχίας για την αποτελεσματική κατάσβεσή της. Επειδή αρκετές φορές η ίδια η πυρκαγιά διαφοροποιεί τις συνθήκες του περιβάλλοντός της, θα πρέπει να υπάρχει συνεχή παρακολούθηση της συμπεριφοράς της, με αναπροσαρμογή των σχεδίων αντιμετώπισής της.

Σημαντικά στοιχεία στην παρακολούθηση και στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς, είναι κάποιοι δείκτες. Ο συνδυασμός τους με τη γνώση και την εμπειρία του επικεφαλής των δυνάμεων δασοπυρόσβεσης, βοηθούν στη σωστή εκτίμηση του τρόπου που θα κινηθεί μια πυρκαγιά. Οι δείκτες είναι οπτικές παρατηρήσεις ή μετρήσεις που λαμβάνονται στη γραμμή πυρός και χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση άποψης για το περιβάλλον της πυρκαγιάς και την αναμενόμενη συμπεριφοράς της.

5.7.1 Προβληματική Συμπεριφορά Πυρκαγιάς

Προβληματική συμπεριφορά της πυρκαγιάς είναι η δραστηριότητα που παρουσιάζει πιθανό κίνδυνο για τις δυνάμεις πυρόσβεσης εάν δεν χρησιμοποιούνται οι σωστές τακτικές. Η μη λήψη των κατάλληλων επιχειρησιακών τακτικών στο σωστό χρόνο, είναι δυνατό να μετατρέψει μια προβληματική πυρκαγιά σε ακραία. Η ακραία συμπεριφορά πυρκαγιάς είναι το τελευταίο στάδιο της εξέλιξης μιας προβληματικής συμπεριφοράς της πυρκαγιάς και μπορεί να περιγραφεί με κάποια συγκεκριμένα στοιχεία:

- Έντονη καύση
- Γρήγορος ρυθμός εξάπλωσης
- Πυρκαγιά κόμης
- Κηλίδωση

5.7.2 Δείκτες Συμπεριφοράς της Πυρκαγιάς

Η ακραία συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς συνήθως προκύπτει όταν συνυπάρχουν αρκετές δυσμενείς συνθήκες. Αυτές οι συνθήκες μπορούν να εκφραστούν από συγκεκριμένους δείκτες. Επομένως, είναι δυνατό να παρατηρηθούν κάποιοι δείκτες κάθε φορά οι οποίοι δηλώνουν τάσεις προβληματικής συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς. Οι δείκτες αυτοί δρουν προσθετικά, δηλαδή όσοι περισσότεροι παρατηρηθούν ή μετρηθούν τόσο πιο πιθανή είναι η προβληματική συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς. Σε κάθε περίπτωση η παρατήρηση ενός δείκτη σε ένα κρίσιμο στάδιο, δεν σημαίνει πάντα προβληματική συμπεριφορά πυρκαγιάς. Όμως δεν πρέπει να υπάρχει εφησυχασμός, αλλά αναζήτηση και άλλων δεικτών με πρώτο μέλημα την ασφάλεια του προσωπικού.

Οι δείκτες που μπορούν, με την παρατήρησή τους, να καταδείξουν τάσεις προβληματικής συμπεριφοράς είναι:

- Καλά ανεπτυγμένη στήλη καπνού
- Στήλη καπνού που μεταβάλλεται
- Στήλη καπνού που γέρνει
- Ψαλιδισμένη στήλη καπνού
- Έναρξη δημιουργίας δινών φωτιάς
- Πυρκαγιές που σιγοκαίνε και ξαφνικά δυναμώνουν
- Λαμπάδιασμα των δένδρων
- Συχνές πυρκαγιές κηλίδωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

6.1 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης και έρευνας της παρούσας διατριβής είναι η περιοχή της Αττικής, στην Ελλάδα και ειδικότερα στην ανατολική Αττική, οι περιοχές της Ραφήνας και του Νέου Βουτζά (Σχήμα 6.1). Σημαντικός λόγος στην επιλογή αυτή είναι η αύξηση της συχνότητας των καταστροφικών πυρκαγιών στη συγκεκριμένη περιοχή τα τελευταία χρόνια, λόγω αλλαγής της χρήσης γης και ότι οι πυρκαγιές κοντά σε αστικά περιβάλλοντα (περιαστικές πυρκαγιές) ενισχύουν την επικινδυνότητα και τη δυσκολία κατάσβεσης τους. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν μέσω ενός μοντέλου πυρκαγιάς, του FARSITE (Fire Area Simulator), δύο πυρκαγιές που ξέσπασαν στις 28 Ιουλίου 2005, στην ίδια περιοχή με διαφορά λίγων ωρών, καταστρέφοντας δάση, δασικές εκτάσεις, περιουσίες και απειλώντας ανθρώπινες ζωές. Για να χρησιμοποιηθεί το FARSITE (περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω) σε μια περιοχή διαφορετική από αυτή που δημιουργήθηκε, χρειάστηκε μια τοπική προσαρμογή, δηλαδή το κατάλληλο μοντέλο καυσίμου για τη συγκεκριμένη περιοχή, επομένως έγιναν κάποιες δοκιμές για την εύρεση των αντιπροσωπευτικότερων μοντέλων βλάστησης.

Ως πηγή για τα μετεωρολογικά δεδομένα εισόδου του FARSITE χρησιμοποιήθηκε ο μετεωρολογικός σταθμός του αεροδρομίου «Ελ. Βενιζέλος» και τα αποτελέσματα του μετεωρολογικού μοντέλου RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) το οποίο προσομοίωσε τον άνεμο και τη θερμοκρασία στον χώρο με την υψηλή ανάλυση του 1 km.

(α)



(β)



Σχήμα 6.1: α) Περιοχή της Αττικής – Νέος Βουτζάς και Ραφήνα β) Ελλάδα και η περιοχή της Αττικής στο τετράγωνο (Feidas et al. 2002)

Το FARSITE στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε στο να προσομοιώσει πιθανές πυρκαγιές στη περιοχή μελέτης κάτω από:

- Συνθήκες άπνοιας,
- Περίπτωση περάσματος θερμού μετώπου

- Περίπτωση περάσματος ψυχρού μετώπου
- Περίπτωση μηδενικής επίδρασης της τοπογραφίας

Για τη διερεύνηση της επίδρασης μιας πιθανής κλιματικής αλλαγής στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα χρησιμοποιήθηκε το κλιματικό μοντέλο MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change) και η βάση δεδομένων SCENGEN (SCENario GENerator). Τα κλιματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των πιθανών κλιματικών αλλαγών εφαρμόζουν βασικά σενάρια που αφορούν στις αναμενόμενες αυξήσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για τα επόμενα χρόνια. Με βάση αυτά τα σενάρια η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel for Climate Change-IPCC 2001) εκτιμά για τις επόμενες δύο δεκαετίες μια αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά 0,2°C ανά δεκαετία. Ακόμη και αν τα επίπεδα των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου για τα επόμενα χρόνια διατηρηθούν στα επίπεδα του 2000, αναμένεται μια επιπλέον αύξηση 0,1°C ανά δεκαετία (IPCC 2007).

Συγκεκριμένα, στην περιοχή των Βαλκανίων οι αναμενόμενες κλιματικές μεταβολές σύμφωνα με τις αναλύσεις των σεναρίων των κλιματικών μοντέλων δείχνουν μέχρι το έτος 2100, αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (1,5°C έως 3,6°C), μείωση των βροχοπτώσεων (-24,3% έως -1,2%), μείωση της νεφοκάλυψης (-4,3% έως -1,4%) και μικρή μείωση της ταχύτητας του ανέμου (-2,2% έως -0,1%) (Paragiannaki et al. 2003). Όμως παράλληλα την μεγάλη σημασία που έχει δοθεί τα τελευταία χρόνια στις κλιματικές επιστήμες, τα αποτελέσματα δεν είναι τα αναμενόμενα. Τα κλιματικά μοντέλα που κάνουν εκτιμήσεις για το κλίμα από το 1990 δεν έχουν καταφέρει να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε μικρότερη ή σε μεγαλύτερη κλίμακα, σε σύγκριση με τα ιστορικά δεδομένα (Koutsoyiannis 2008). Αδυνατούν να αναπαραστήσουν με επιτυχία το παρελθόν και δεν είναι αξιόπιστα για την πρόβλεψη του μελλοντικού κλίματος γιατί δεν μπορούν να προσομοιώσουν τις χαοτικές αλληλεπιδράσεις των κλιματικών συνιστωσών. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας του συστήματος οι λύσεις επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις αρχικές συνθήκες σε τέτοιο βαθμό που ακόμη και πολύ μικρές αλλαγές είναι δυνατόν να δώσουν τελείως διαφορετικά αποτελέσματα (Koutsoyiannis 2006).

Υπάρχουν επίσης πολυάριθμες μελέτες που αμφισβητούν τις εκτιμήσεις των κλιματικών μοντέλων, προβάλλοντας τις ασυνέπειές τους με την πραγματικότητα. Στον ευρύτερο χώρο της Μεσογείου η εμπειριστατωμένη έρευνα των Χ. Φείδα και Δ. Λάλα για παράδειγμα, με τίτλο «Κλιματικές αλλαγές στη Μεσόγειο» (Feidas and Lalas 2001), στηριζόμενοι και στα αποτελέσματα αρκετών άλλων επιστημονικών εργασιών για το κλίμα της περιοχής μας, διαπίστωσαν ότι στην Ελλάδα και στην Ανατολική Μεσόγειο δεν φαίνεται

να εμφανίζεται σταδιακή τάση θέρμανσης κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα. Αντίθετα, οι περισσότερες έρευνες δείχνουν πτωτική τάση, με εξαίρεση την αύξηση που εμφανίζεται στη θερμοκρασία από το 1997 και μετά η οποία, λόγω των λίγων χρόνων μέτρησης, δεν μπορεί να εδραιωθεί.

Για αυτό το λόγο έγιναν έλεγχοι ευαισθησίας (Σενάρια) στο FARSITE, όπου οι μεταβολές των μετεωρολογικών συνθηκών εισήχθησαν στο μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE αρχικά σύμφωνα με τις κλιματικές τάσεις. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν τυχαία πιθανά σενάρια, για την περιγραφή της μεταβολής της συμπεριφοράς της δασικής πυρκαγιάς και για την εξαγωγή πληροφοριών πάνω στην πυροεπικινδυνότητα των επόμενων δεκαετιών στη χώρα μας. Τέλος, στη περιοχή ενδιαφέροντος έγινε μελέτη της συμπεριφοράς της δασικής πυρκαγιάς αλλάζοντας το είδος καύσιμης ύλης, διαφοροποιώντας το ποσοστό κάλυψης βλάστησης, μηδενίζοντας την επίδραση της τοπογραφίας και μεταβάλλοντας την τιμή του δείκτη προσαρμογής (Adjustment Factor) για συγκεκριμένο μοντέλο καύσιμης ύλης.

6.2 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

6.2.1 Κλιματικές Συνθήκες – Βλάστηση – Ιστορική Αναδρομή Πυρκαγιών

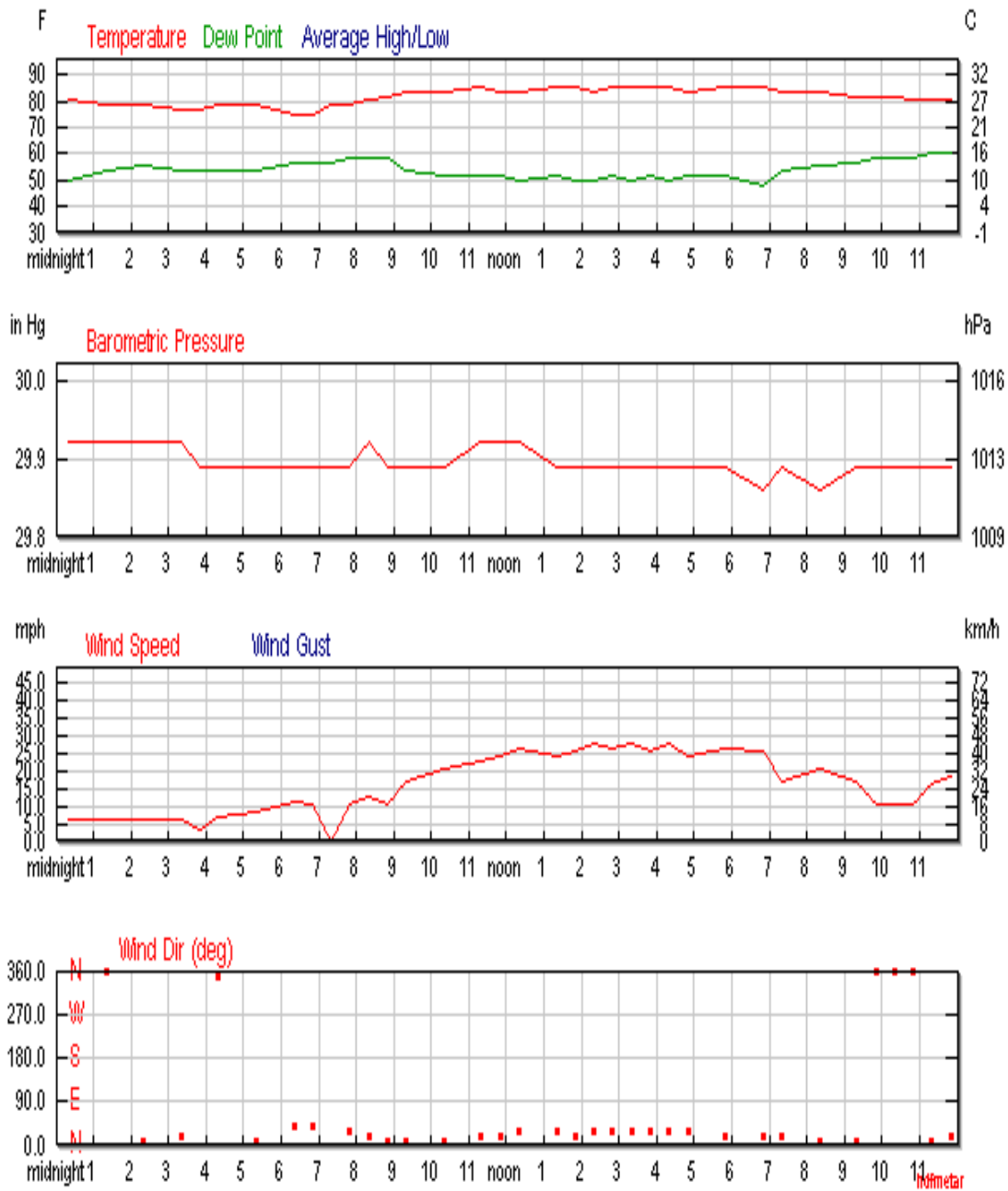
Η Ραφήνα και ο Νέος Βουτζάς, οι τοποθεσίες που ξέσπασαν οι δύο μεγάλες δασικές πυρκαγιές στις 28 Ιουλίου του 2005, έχουν απόσταση 2,8 km και βρίσκονται στην ανατολική Αττική, στην Ελλάδα (B: 38° 01', A: 24° 00') σε υψόμετρο 100 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, 25 km ανατολικά της Αθήνας. Η ανατολική Αττική χαρακτηρίζεται από το τυπικό ξηρό μεσογειακό κλίμα. Τον περισσότερο χρόνο δεν βρέχει εκτός από τους φθινοπωρινούς και χειμερινούς μήνες, με μέσο ετήσιο ύψος βροχής τα 397 mm, μέση ετήσια θερμοκρασία τους 17,3°C, αλλά την καλοκαιρινή περίοδο η μέση μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 30,9°C. Οι μέσες ταχύτητες των ανέμων είναι υψηλές χειμώνα-καλοκαίρι με κατά το πλείστον Β-ΒΑ ανέμους. Η τοπογραφία και η αύρα σε πολλές περιπτώσεις είναι δυνατόν να διαφοροποιούν την κατεύθυνση των ανέμων.

Η καμένη έκταση και των δύο πυρκαγιών εκτιμάται περίπου στα 9627 στρέμματα (962,7 ha) δάσους και δασικής έκτασης. Η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά έκαψε περί τα 6280 (628 ha) στρέμματα ενώ της Ραφήνας περί τα 3347 (334,7 ha) στρέμματα. Η περιοχή που κάηκε καλυπτόταν από την τυπική μεσογειακή βλάστηση με κυρίαρχα είδη τα: χαλέπιος πεύκη (*Pinus halepensis*), πουννάρι (*Quercus coccifera*), φιλλύκι (*Phillyrea latifolia*), σχίνος (*Pistacia lentiscus*) και αφάνα (*Genista acanthoclada*).

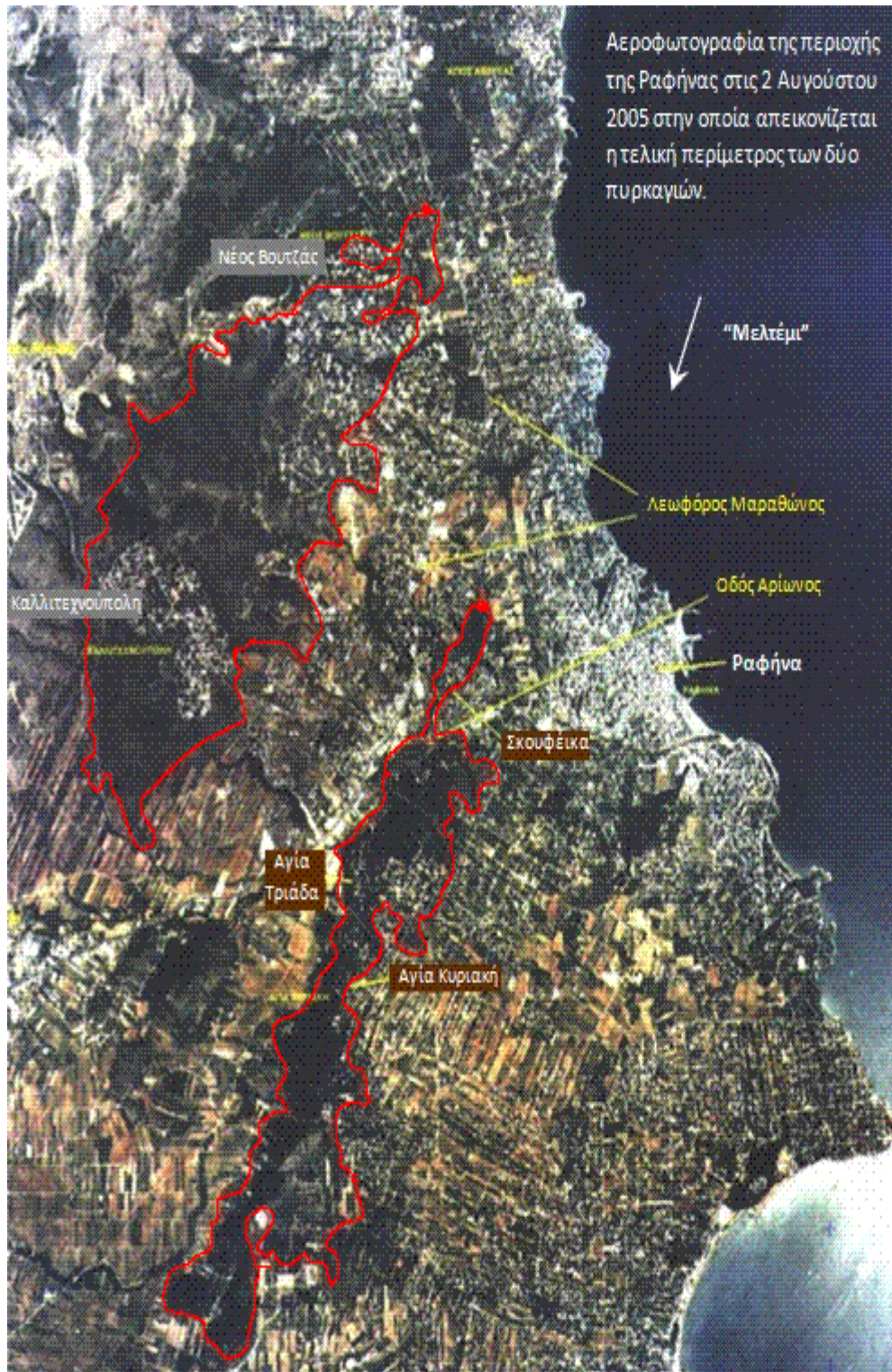
Στις 28 Ιουλίου του 2005, στις 10:45, ξέσπασε πυρκαγιά σε δασώδη έκταση στην περιοχή Σκουφέικα δυτικά της Ραφήνας. Η θερμοκρασία ήταν στους 29°C και ο άνεμος ήταν ισχυρός βορειοανατολικός (ετησίας) εντάσεως 35 km/h ή 10 m/s (Σχήμα 6.2) με ριπές στα 50-63 km/h ή 14-18 m/s ενώ η σχετική υγρασία του αέρα ήταν κατά τη διάρκεια της ημέρας

μεγαλύτερη από 30%. Η πυρκαγιά λόγω των ισχυρών ανέμων κινήθηκε με ταχύτητα νοτιοδυτικά καίγοντας δέντρα γινόμενη επικόρυφη όπου επιβραδύνθηκε στην οδό Αρίωνος (Σχήμα 6.3) λόγω περιορισμού των καυσίμων και των δυνάμεων πυρόσβεσης. Στη συνέχεια, εμφανίστηκε να ανεβαίνει την πλαγιά και να καίει πεύκα νότια της οδού Αρίωνος, είτε λόγω του φαινομένου της κηλίδωσης, είτε λόγω εμπρησμού (στις προσομοιώσεις στην οδό Αρίωνος τοποθετήθηκε σημείο έναρξης πυρκαγιάς παρόλο που δε βρέθηκε εστία). Έφτασε στον οικισμό Αγία Τριάδα (Σχήμα 6.4) περίπου στις 12:30 και στη συνέχεια, αφού έκαψε συστάδες χαλέπιου πεύκης, έφτασε στον οικισμό Αγίας Κυριακής στις 13:30 (Σχήμα 6.3). Τέθηκε υπό έλεγχο στις 18:00 την ίδια ημέρα αφού έκαψε τα πεύκα πάνω στο λόφο καθώς και την αραιή δασική βλάστηση με τις καλλιέργειες νότια του λόφου. Το συνολικό μήκος της πυρκαγιάς ήταν περίπου 5,6 km και η μέση ταχύτητά της, μαζί με τις προσπάθειες πυρόσβεσης, ήταν περί το 1 km/h (Ξανθόπουλος και Ευτυχίδης 2007).

Παράλληλα με την πυρκαγιά στην Ραφήνα, ξέσπασε στις 12:25 με θερμοκρασία στους 30°C, έξω από τον οικισμό του Νέου Βουτζά νέα εστία πυρκαγιάς 2,8 km βορειοδυτικά της πρώτης. Λόγω των πολύ ισχυρών ανέμων του ετησίου που έφταναν τα 41 km/h ή 11 m/s (Σχήμα 6.2), η πυρκαγιά έγινε επικόρυφη και κινήθηκε νοτιοδυτικά με μεγάλη ένταση και ταχύτητα. Εισήλθε μέσα στον οικισμό του Νέου Βουτζά, καίγοντας συστάδες χαλέπιου πεύκης σε δύο ρεματιές (Σχήμα 6.5) και στη συνέχεια κατευθύνθηκε σε αναγεννημένη περιοχή (από τις πυρκαγιές της Πεντέλης του 1995 και του 1998) καίγοντας θάμνους αειφύλλων πλατύφυλλων, επιταχύνοντας προς τον οικισμό της Καλλιτεχνούπολης όπου έφτασε γύρω στις 16:00 (Σχήμα 6.3). Πέρασε μέσα από τον οικισμό και προχώρησε σε καλλιέργειες όπου και τέθηκε υπό έλεγχο στις 20:00. Το συνολικό μήκος της πυρκαγιάς ήταν περίπου 5,1 km και η μέση ταχύτητά της, μαζί με τις προσπάθειες πυρόσβεσης, ήταν περί το 1 km/h (Ξανθόπουλος και Ευτυχίδης 2007).



Σχήμα 6.2: Μετεωρολογικό ιστορικό της 28 Ιουλίου 2005 από τον μετεωρολογικό σταθμό του Ελ. Βενιζέλου (Πηγή: wunderground.com)



Σχήμα 6.3: Οριογραμμή καμμένων περιοχών και σημεία ενδιαφέροντος με αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:40000 από την Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού, των πυρκαγιών στο Νέου Βουτζά και στη Ραφήνα στις 28 Ιουλίου του 2005 (Ξανθόπουλος και Ευτυχίδης 2007)



Σχήμα 6.4: Η καμένη έκταση της πυρκαγιάς της Ραφήνας. Φαίνεται ο οικισμός της Αγίας Τριάδας και στο βάθος η Καλλιτεχνούπολη (Ξανθόπουλος και Ευτυχίδης 2007)



Σχήμα 6.5: Η καμένη έκταση στον οικισμό του Νέου Βουτζά και η κατεύθυνση του ανέμου (Ξανθόπουλος και Ευτυχίδης 2007)

6.2.2 Μετεωρολογικό Μοντέλο RAMS

Οι πρώτες επιστημονικές προσπάθειες για την πρόγνωση του καιρού βασίζονταν σε συνοπτικούς χάρτες και η ακρίβεια της εξαρτιόταν από την εμπειρία και την κρίση των προγνοστών. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών, άρχισε να αναπτύσσεται η αριθμητική πρόγνωση του καιρού. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει σημαντική ανάπτυξη στην προσομοίωση των ατμοσφαιρικών συνθηκών με αριθμητικά μοντέλα. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται οι ατμοσφαιρικές συνθήκες συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.

Για την εκπόνηση της διατριβής χρησιμοποιήθηκε το υψηλής ανάλυσης ατμοσφαιρικό μοντέλο RAMS. Το Αριθμητικό Ατμοσφαιρικό μοντέλο RAMS (Regional Atmospheric Modeling System) είναι ένα αριθμητικό μοντέλο πολλαπλών εφαρμογών, που αναπτύχθηκε στο Colorado State University σε συνεργασία με την ASTER Division of Mission Research Corporation για προσομοίωση και πρόγνωση μετεωρολογικών φαινομένων και για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων (Pielke et al. 1992). Το RAMS είναι εξέλιξη προγενέστερων ατμοσφαιρικών μοντέλων, τα οποία αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Η διαδικασία συνδυασμού των μοντέλων αυτών σε ένα πολυδιάστατο κώδικα με τη γενική ονομασία RAMS ξεκίνησε το 1986. Η ανάπτυξη του νέου κώδικα βασίστηκε στα αριθμητικά σχήματα και τις παραμετροποιήσεις των προηγούμενων μοντέλων. Ο κύριος κώδικας του μοντέλου εξελίσσεται συνεχώς μέχρι σήμερα με βελτιώσεις και νέες δυνατότητες. Το μοντέλο επιτρέπει προσομοιώσεις των ατμοσφαιρικών φαινομένων σε κλίμακες από μερικές εκατοντάδες μέτρα μέχρι και μερικές χιλιάδες μέτρα. Μια γενική περιγραφή του μοντέλου και οι δυνατότητές του δίνεται στη δημοσίευση των Pielke et al. το 1992. Μερικές από τις δυνατότητες που διαθέτει το μοντέλο περιγράφονται παρακάτω:

- δομή επάλληλων πλεγμάτων δύο δρόμων (Clark and Farley 1984)
- σύστημα κατακόρυφων συντεταγμένων που ακολουθεί την τοπογραφία
- παραμετροποιημένο σχήμα μικροφυσικής των νεφών
- παραμετροποιημένο σχήμα μεταφοράς της ακτινοβολίας (μικρού και μεγάλου μήκους)
- διάφορες επιλογές για τα πλευρικά και τα ανώτερα όρια, όπως και διάφορα επίπεδα πολυπλοκότητας για παραμετροποίηση του επιφανειακού στρώματος

Οι κύριες συνιστώσες του μοντέλου είναι:

- ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο, το οποίο εκτελεί τις προσομοιώσεις
- ένα σύστημα ανάλυσης δεδομένων, το οποίο προετοιμάζει αρχικά δεδομένα από παρατηρήσεις που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν από το ατμοσφαιρικό μοντέλο

- ένα μοντέλο μετεπεξεργασίας που οπτικοποιεί και αναλύει τα αποτελέσματα του ατμοσφαιρικού μοντέλου με μια ποικιλία λογισμικών οπτικοποίησης και άλλα προγράμματα υποστήριξης

Το RAMS εφαρμόζεται πολύ συχνά σαν μοντέλο περιορισμένης περιοχής. Πολλά από τα σχήματα παραμετροποίησης του έχουν σχεδιασθεί για πλέγματα σε κλίμακα μέσης ή υψηλής ανάλυσης. Ωστόσο, το RAMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν μοντέλο παγκόσμιας κλίμακας με σκοπό την προσομοίωση συστημάτων μεγάλης κλίμακας. Αυτό επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση 2 ημισφαιρικών πλεγμάτων, τα οποία χρησιμοποιούν πολική στερεογραφική προβολή και συνεχή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των πλεγμάτων στα όρια. Δεν υπάρχει κατώτατο όριο για το μέγεθος της περιοχής ούτε για το πλέγμα πεπερασμένων διαφορών του μοντέλου. Με τον ίδιο κώδικα έχουν προσομοιωθεί φαινόμενα μικρής κλίμακας, όπως ανεμοστρόβιλοι και στρόβιλοι στο οριακό στρώμα, καθώς επίσης και μικρότερης κλίμακας τυρβώδεις ροές πάνω από κτίρια και αεροσύραγγες. Η εφαρμογή επάλληλων αλληλεπιδρώντων πλεγμάτων δύο δρόμων επιτρέπει τη χρησιμοποίηση πλεγμάτων με υψηλή ανάλυση, με σκοπό την επίλυση μικρής κλίμακας ατμοσφαιρικών συστημάτων, όπως οι τυφώνες, ενώ ταυτόχρονα επιλύει μεγάλης κλίμακας φαινόμενα στο πλέγμα χαμηλής ανάλυσης.

Τα ατμοσφαιρικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της ατμοσφαιρικής κατάστασης, βασίζονται σε ένα σύστημα εξισώσεων που περιγράφουν βασικούς νόμους της φυσικής, όπως:

- Την αρχή διατήρησης της μάζας (εξίσωση συνέχειας)
- Την αρχή διατήρησης της θερμοκρασίας (πρώτος θερμοδυναμικός νόμος)
- Την αρχή διατήρησης της κίνησης (δεύτερος νόμος του Newton)
- Την αρχή διατήρησης της ποσότητας νερού
- Την αρχή διατήρησης της συγκέντρωσης των ατμοσφαιρικών συστατικών.

Οι παραπάνω νόμοι της φυσικής περιγράφονται από ένα σύστημα διαφορικών εξισώσεων, που περιέχουν μη γραμμικούς όρους εξαρτημένων μεταβλητών με τη μορφή μερικών και ολικών παραγώγων ως προς το χώρο και το χρόνο. Με το σύστημα των εξισώσεων επιδιώκεται να περιγραφεί ένα ευρύ φάσμα ατμοσφαιρικών διεργασιών επιλύοντας το ταυτόχρονα για όλες τις εξαρτημένες μεταβλητές.

6.2.2.1 Παράμετροι για την Εφαρμογή του Μέσης Κλίμακας Μοντέλου RAMS

Η ανάγκη για την ακριβή προσομοίωση των ατμοσφαιρικών συνθηκών σε μια περιοχή απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στον καθορισμό των παραμέτρων που χρησιμοποιεί το

μέσης κλίμακας μοντέλο. Οι παράμετροι αυτοί σχετίζονται με τον ακριβή καθορισμό των πλεγμάτων, τη χωρική τους ευκρίνεια, το χρονικό βήμα κατά το οποίο θα επιλύονται οι εξισώσεις καθώς και με την επιλογή των σχημάτων που περιγράφουν την ακτινοβολία, την τύρβη, την μικροφυσική και τις οριακές συνθήκες. Ειδικότερα με την παρούσα μελέτη:

- Έγινε οριοθέτηση της περιοχής εφαρμογής του μοντέλου για την αποφυγή παρουσίας μεγάλων ορεινών όγκων στα όρια, γεγονός που θα αλλοίωνε τη ροή.
- Καθορίστηκε ο αριθμός των επάλληλων πλεγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν.
- Προσδιορίστηκε η καταλληλότερη ευκρίνεια του πλέγματος για την όσο το δυνατό καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων του μοντέλου.
- Έγινε επιλογή στα αρχεία τύπου εδάφους και βλάστησης για να διαπιστωθεί η χωρίς προβλήματα εισαγωγή τους στα αρχεία εισόδου του μοντέλου και η καλή συνεργασία με τα υπόλοιπα αριθμητικά σχήματα που εφαρμόζονται από το μοντέλο.
- Προσδιορίστηκε το κατάλληλο χρονικό βήμα για την επίλυση των εξισώσεων ώστε να οδηγεί σε ευστάθεια το μοντέλο και τα αποτελέσματα να περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια τα μέσης κλίμακας μετεωρολογικά φαινόμενα.
- Επιλέχθηκαν τα κατάλληλα σχήματα για την παραμετροποίηση της ακτινοβολίας, της τύρβης και της μικροφυσικής.

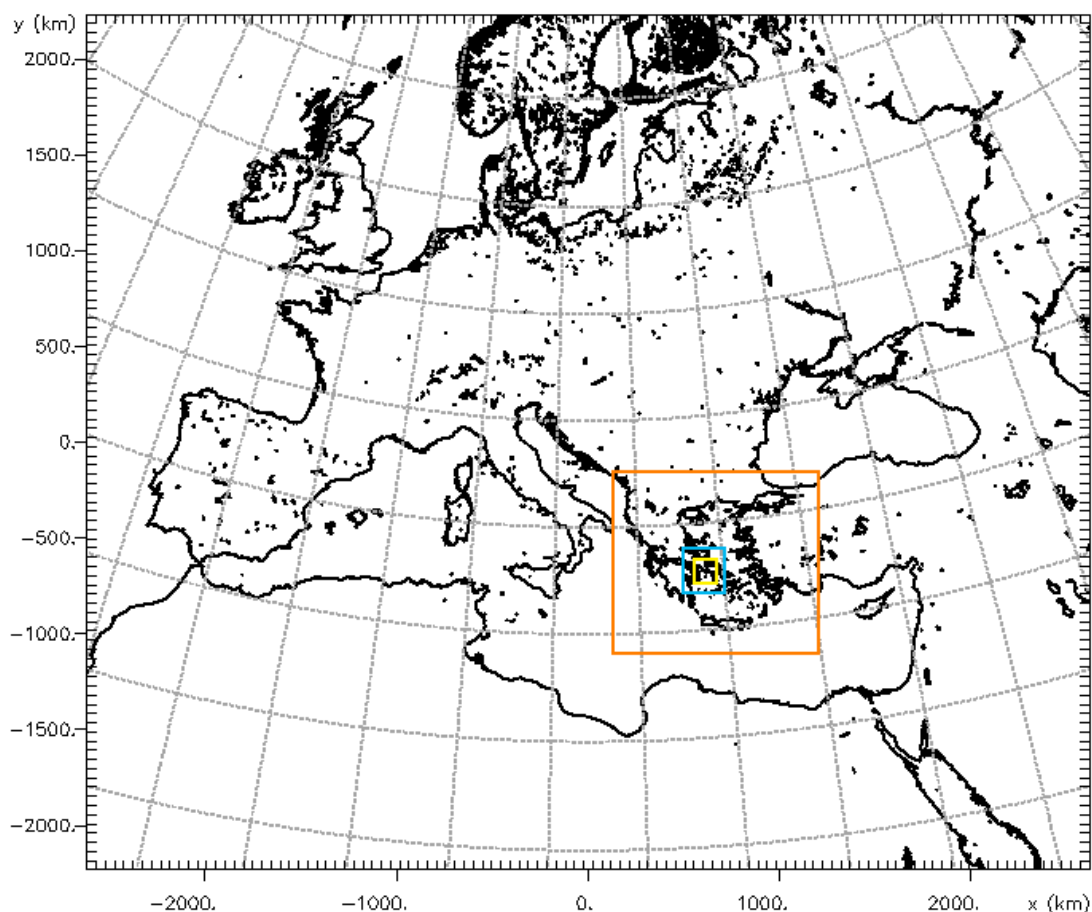
Το RAMS προσομοίωσε τον άνεμο και τη θερμοκρασία στην περιοχή της Ραφήνας και του Νέου Βουτζά από τις 27 Ιουλίου 2005 12:00 UTC έως τις 29 Ιουλίου 2005 12:00 UTC (48 ώρες) και καθορίστηκαν τέσσερα πλέγματα με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Το εξωτερικό με οριζόντια ανάλυση πλέγματος 48 km αποτελείται από 110x94 σημεία.
- Το δεύτερο με οριζόντια ανάλυση πλέγματος 16 km αποτελείται από 86x77 σημεία.
- Το τρίτο με οριζόντια ανάλυση πλέγματος 4 km αποτελείται από 82x74 σημεία.
- Το τέταρτο (το εσωτερικό) με οριζόντια ανάλυση πλέγματος 1 km αποτελείται από 80x72 σημεία

Τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.6. Το κέντρο της περιοχής μελέτης καθορίστηκε 38,01 N – 24,00 E. Όσον αφορά την κατακόρυφη ανάλυση χρησιμοποιήθηκε τηλεσκοπικό πλέγμα σημείων που αποτελείται από 35 επίπεδα μέχρι το ύψος των 18 km. Η μεγάλη έκταση των πλεγμάτων θεωρείται αναγκαία για την αποφυγή σφαλμάτων που προκύπτουν κοντά στα όρια. Για χρονικό βήμα επιλέχθηκαν 60 - 30 - 10 - 5 δευτερόλεπτα αντίστοιχα για το κάθε πλέγμα. Η επιλογή έγινε με βάση αφενός την όσο το

δυνατόν καλύτερη ευστάθεια του μοντέλου και αφετέρου την δυνατότητα αναπαράστασης των τοπικών κυκλοφοριών με τη μέγιστη λεπτομέρεια. Ως αρχικά πεδία χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα σε μορφή πλέγματος του Ευρωπαϊκού Κέντρου Μεσοπρόθεσμης Πρόγνωσης Καιρού (ECMWF) ανάλυσης $0,5^\circ$. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται και για την επαναπροσαρμογή των πλευρικών συνθηκών του μοντέλου κάθε ώρα. Επίσης, για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν: κλιματολογικές τιμές επιφανείας θάλασσας ανάλυσης 1° , τοπογραφία ανάλυσης 30 arcsec, δεδομένα βλάστησης ανάλυσης 30 arcsec.

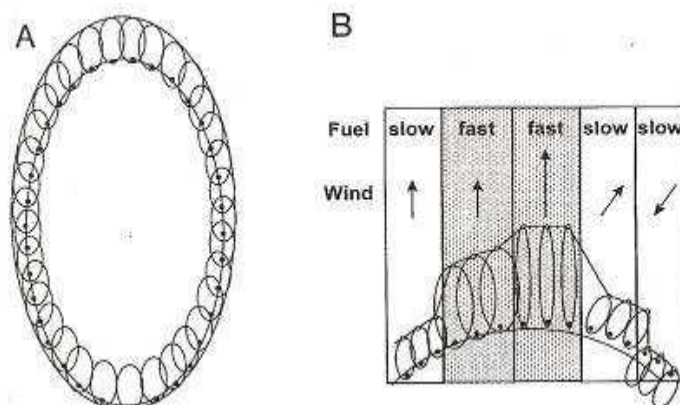
Το RAMS προσομοίωσε τον άνεμο (το σημαντικότερο παράγοντα επηρεασμού μιας δασικής πυρκαγιάς) (Miranda and Borrego 1996) και τη θερμοκρασία καθώς και τις χρονικές μεταβολές τους (όπως Gómez-Tejedor et al. 1999). Τα αποτελέσματα των ατμοσφαιρικών προσομοιώσεων του RAMS για συγκεκριμένες περιπτώσεις εισάχθηκαν στο μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE.



Σχήμα 6.6: Σχηματική παρουσίαση των τεσσάρων πλεγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στις αριθμητικές προσομοιώσεις- Από το μεγαλύτερο πλέγμα προς το μικρότερο με χρωματισμούς μαύρο, πορτοκαλί, θαλασσί και κίτρινο αντίστοιχα.

6.2.3 Μοντέλο Πυρκαγιάς FARSITE (Fire Area Simulator)

Το FARSITE (προσομοιωτής περιοχής πυρκαγιάς), είναι ένα χωροχρονικό μοντέλο προσομοίωσης της διάδοσης και της συμπεριφοράς των πυρκαγιών σε εξάρτηση του τοπίου, των καυσίμων και του καιρού. Χρησιμοποιεί μια εφαρμογή της αρχής Huygens της διάδοσης κυμάτων για την προσομοίωση της αύξησης ενός μετώπου πυρκαγιάς. Η Αρχή του Huygens δηλώνει ότι ένα κύμα μπορεί να μεταδοθεί από πολλά σημεία στην άκρη του, τα οποία συμπεριφέρονται ως ανεξάρτητες πηγές μικρότερων κυμάτων (Σχήμα 6.7) (Finney 1998). Το μοντέλο FARSITE ενώνει όλα αυτά τα σημεία στην άκρη των μικρών κυμάτων για να καθορίσει το μέτωπο της πυρκαγιάς.

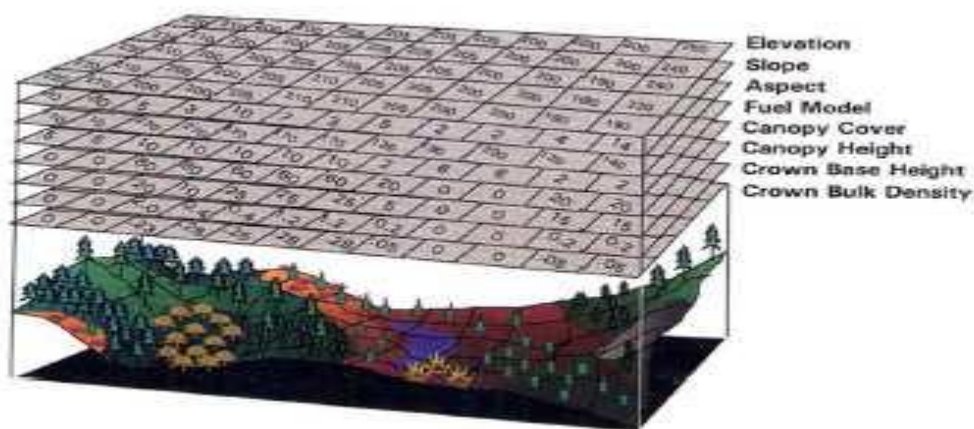


Σχήμα 6.7: Απεικόνιση της αρχής του Huygens χρησιμοποιώντας μικρά ελλειπτικά κύματα: (α) σε σταθερές συνθήκες τα μικρά κύματα σταθερού μήκους και μεγέθους διατηρούν το ελλειπτικό σχήμα της φωτιάς στο χρόνο, (β) σε μεταβαλλόμενες συνθήκες το μικρό κύμα εξαρτάται από το μοντέλο καύσιμης ύλης και το διάνυσμα του ανέμου - υπάρχει διαφοροποίηση του ελλειπτικού σχήματος (Finney 1998).

Όσο αναφορά τις επικόρυφες πυρκαγιές, το FARSITE συνδυάζει το μοντέλο του Rothermel (1972, 1991) με τα κριτήρια πυρκαγιάς κόμης του Van Wangner (1977, 1993) για την προσομοίωση μετάβασης επιφανειακής πυρκαγιάς σε επικόρυφη και χρησιμοποιεί το μοντέλο του Albin (1979) για την προσομοίωση της απόστασης που πετάγονται οι καύτρες (Finney 1998). Η διαδικασία είναι στην πραγματικότητα πολύ κοντά στις ευρέως χρησιμοποιημένες μεθόδους που υιοθετούνται με το χέρι για τον ίδιο σκοπό (Rothermel 1983). Η διαφορά του είναι ότι η διαδικασία είναι αυτοματοποιημένη, γρηγορότερη, και πιο λεπτομερής.

Το FARSITE είναι ένα από τα κύρια συστήματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς που αναπτύχθηκε την τελευταία δεκαετία για να περιγράψει τη εξάπλωση και τη συμπεριφορά

των δασικών πυρκαγιών στο χώρο. Υπολογίζει ένταση πυρκαγιάς και ταχύτητα εξάπλωσης για πολυάριθμα σημεία κατά μήκος του τοπίου χρησιμοποιώντας το μοντέλο συμπεριφοράς πυρκαγιάς του Rothermel (1972). Απαιτούμενα δεδομένα για την προσομοίωση πυρκαγιάς στο χωροχρονικό μοντέλο FARSITE είναι οι παράγοντες που συγκροτούν το τρίγωνο της φωτιάς (τοπογραφία, χαρακτηριστικά καύσιμης ύλης και καιρικές συνθήκες). Τα χωρικά δεδομένα τύπου κανάβου (raster) που χρησιμοποιούνται είναι το υψόμετρο (elevation), η κλίση (slope), ο προσανατολισμός - έκθεση (aspect), η καύσιμη ύλη (fuels), η κάλυψη κόμης (canopy cover), το ύψος κόμης (canopy height), το ύψος έναρξης της ζωντανής κόμης ή το ύψος της βάσης της ζωντανής κόμης (crown base height) και η πυκνότητα όγκου κόμης (crown bulk density) (Σχήμα 6.8). Τα πέντε πρώτα χωρικά δεδομένα είναι απαραίτητα για την προσομοίωση μιας επιφανειακής πυρκαγιάς. Για την προσομοίωση επικόρυφων πυρκαγιών απαιτούνται και τα υπόλοιπα τρία χωρικά στοιχεία δηλαδή, το ύψος κόμης, το ύψος έναρξης της ζωντανής κόμης και η πυκνότητα όγκου κόμης. Όλα αυτά τα χωρικά στοιχεία εισάγονται και τελικά περιέχονται σε ένα αρχείο τοπίου (με επέκταση LCP). Το αρχείο τοπίου περιέχει τόσο τα δεδομένα που αφορούν το έδαφος και τη μορφολογία του, όσο και της καύσιμης ύλης.



Σχήμα 6.8: Χωρικά δεδομένα που απαιτούνται για προσομοίωση στο FARSITE (Finney 1998)

Η γνώση της κάλυψης κόμης είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της σκίασης και της ελάττωσης της ταχύτητας του ανέμου. Κάλυψη κόμης είναι το οριζόντιο ποσοστό της γης που καλύπτεται με κόμη δέντρων. Οι μονάδες κάλυψης εισέρχονται στο FARSITE με τους αριθμούς (κατηγορίες) 1-4 που αντιστοιχούν στις παρακάτω ποσοστιαίες μονάδες (%). Ο αριθμός 0 ή 99 δηλώνει τη μηδενική κάλυψη κόμης. Οι κατηγορίες θα πρέπει να διαβαθμίζονται ως εξής:

1: 1-20%

2: 21-50%

3: 50-80%

4: 81-100%

0 ή 99: 0%

Το ύψος της κόμης σε συνδυασμό με τη κάλυψη κόμης, χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ελάττωσης του ανέμου σε ύψος περίπου 6 m από την επιφάνεια του εδάφους (Albini and Baughmann 1979), την απόσταση πετάγματος καυτρών και τα χαρακτηριστικά της επικόρυφης πυρκαγιάς (Albini 1979). Το ύψος έναρξης της ζωντανής κόμης σε συνδυασμό με την ένταση της πυρκαγιάς και την υγρασία του φυλλώματος, είναι σημαντικό για τον καθορισμό της μετάβασης μιας επιφανειακής δασικής πυρκαγιάς σε επικόρυφη (Van Wagner 1977, Alexander 1988). Επίσης, η πυκνότητα όγκου κόμης είναι κρίσιμη παράμετρος στον καθορισμό των χαρακτηριστικών διάδοσης των πυρκαγιών κόμης (Van Wagner 1977, 1993).

Τα μετεωρολογικά δεδομένα χωρίζονται σε δύο αρχεία (.txt). Το ένα αρχείο περιλαμβάνει δεδομένα θερμοκρασίας, υγρασίας και βροχόπτωσης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αλλαγών στη νεκρή καύσιμη ύλη. Το άλλο αρχείο περιλαμβάνει δεδομένα ταχύτητας - διεύθυνσης ανέμου και νεφοκάλυψης που χρησιμοποιούνται στην γενικότερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς

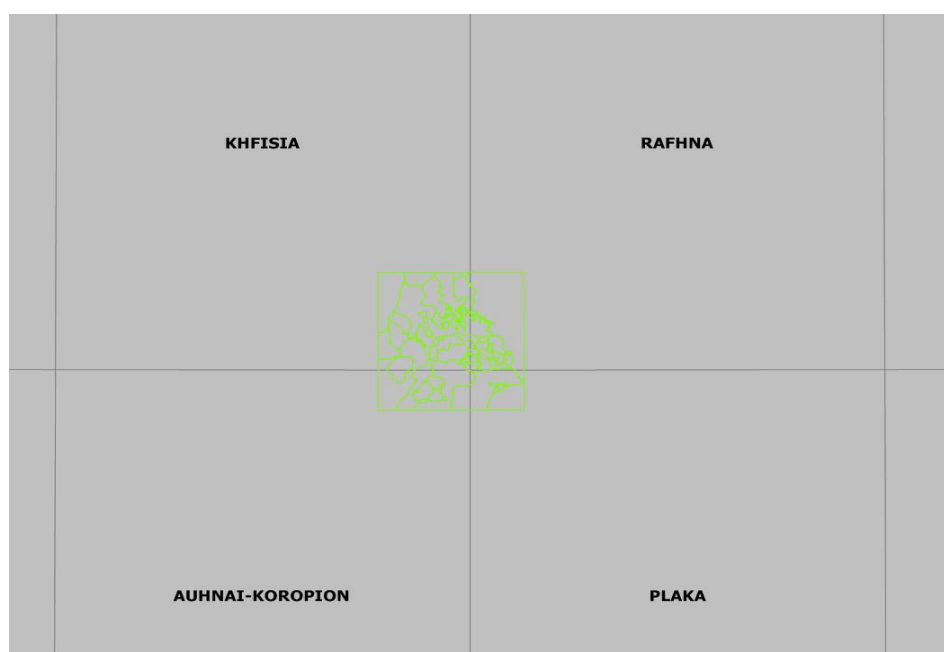
Για την περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε συλλογή και προ-επεξεργασία των δεδομένων ώστε να εμφανιστούν σε ψηφιακή μορφή και σε τέτοιο λογισμικό ώστε να εισαχθούν στο FARSITE. Τα πέντε χωρικά θέματα σε raster μορφή θα πρέπει να είναι γραμμένα σε GRASS ASCII ή ARC GRID ASCII μορφή και να ενωθούν σε ένα φάκελο τοπίου (Landscape (.LCP) File). Τα raster αρχεία πρέπει:

- Να έχουν τις ίδιες μονάδες και το ίδιο σημείο αναφοράς.
- Το μέγεθος των κελιών να είναι το ίδιο για όλα τα θέματα.
- Να έχουν την ίδια έκταση.
- Να έχουν τις ίδιες προβολές και δεδομένα.
- Να χρησιμοποιούν τετραγωνικό σύστημα αξόνων.

Αρχικά, ψηφιοποιήθηκε ορθοφωτοχάρτης των χρήσεων γης διακριτικής ικανότητας 1:20.000 του 1991, του Υπουργείου Γεωργίας και της Γενικής Διεύθυνσης Δασών (Τμήμα Χαρτογράφησης), για την εξαγωγή των μοντέλων της καύσιμης ύλης/βλάστησης που ανταποκρίνονται στο τοπίο της Ανατολικής Αττικής. Με την ψηφιοποίηση δημιουργήθηκαν διανυσματικά δεδομένα (πολύγωνα βλάστησης) που μετατρέπονται σε raster με χωρική ανάλυση pixel 25 m. Συγκεκριμένα για τα θέματα του υψόμετρου, της κλίσης και της έκθεσης χρησιμοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Ψ.Μ.Ε ή DEM) της Ανατολικής Αττικής από την Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού με χωρική ανάλυση pixel 25 x 25 m από το

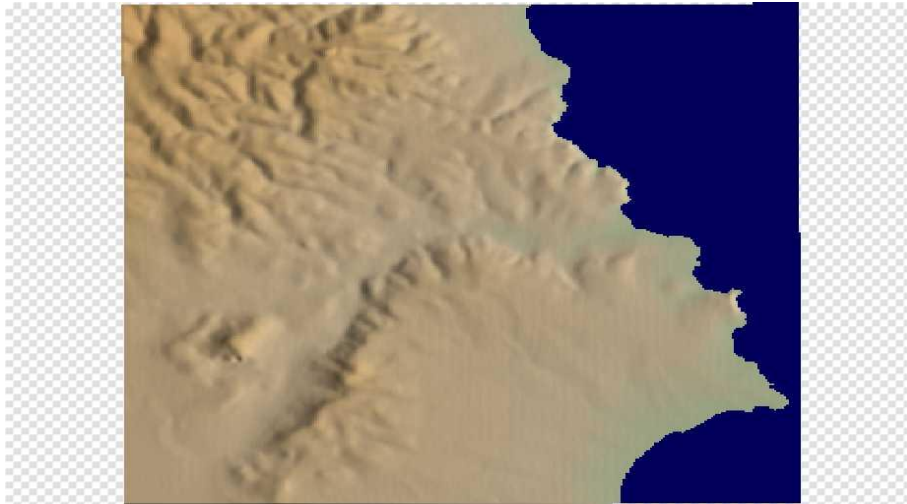
οποίο προέκυψε ο χάρτης των κλίσεων του εδάφους. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) δημιουργήθηκε από ισοϋψείς γραμμές με ισοδιάσταση 20 m από τα φύλλα χάρτου 1:50.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού, τα οποία σαρώθηκαν σε μορφή εικόνας (TIFF) και στη συνέχεια γεωαναφέρθηκαν με βάση τη διανομή τους στον Ελλαδικό χώρο. Τα φύλλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα παρακάτω (Σχήμα 6.9):

- ΚΗΦΙΣΙΑ
- ΡΑΦΗΝΑ
- ΑΘΗΝΑΙ-ΚΟΡΩΠΙ
- ΠΛΑΚΑ

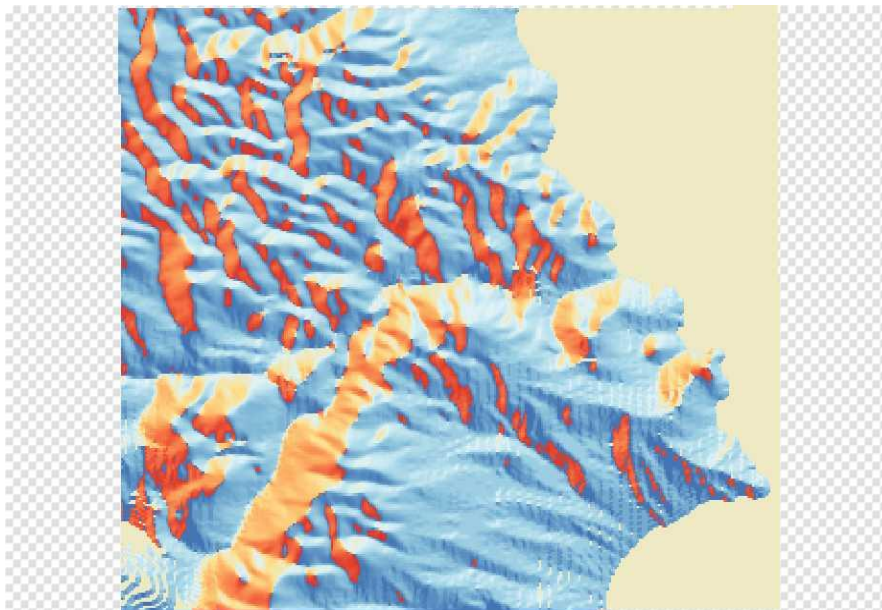


Σχήμα 6.9: Η περιοχή ενδιαφέροντος σε σχέση με τα φύλλα χάρτου 1:50.000 της ΓΥΣ

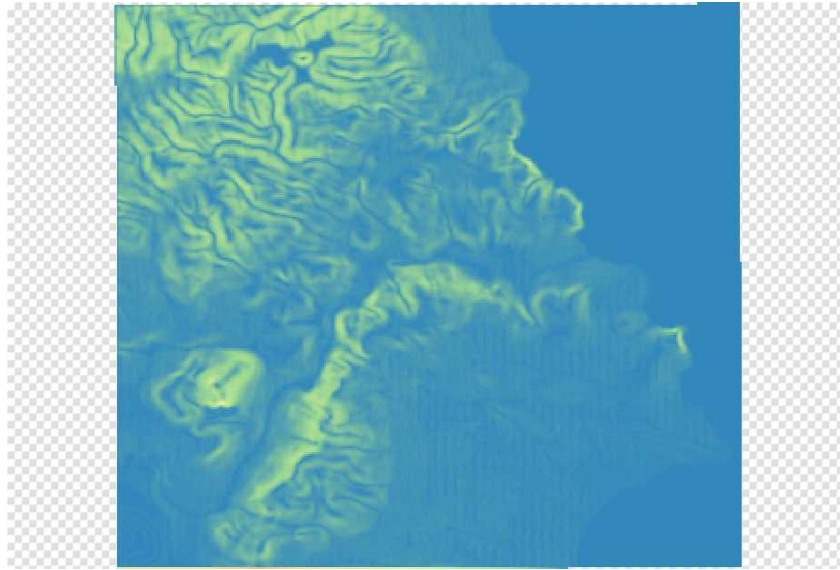
Η ψηφιοποίηση έγινε στο σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών Manifold System GIS (Manifold Net Ltd) και στην συνέχεια δημιουργήθηκε ψηφιακό μοντέλο εδάφους μεγέθους pixel 25x25 m για την περιοχή ενδιαφέροντος, με την μέθοδο “flat triangulation”. Από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους πέρα από την υψομετρική πληροφορία λήφθηκε η απαραίτητη πληροφορία για την κλίση και την έκθεση προς τον ορίζοντα. Στη συνέχεια έγινε εξαγωγή των τριών παραπάνω επιπέδων πληροφορίας (υψόμετρο, έκθεση και κλίση) – Σχήμα 6.10 (υψομετρική πληροφορία της περιοχής μελέτης), Σχήμα 6.11 (πληροφορία έκθεσης της περιοχής μελέτης) και Σχήμα 6.12 (πληροφορία κλίσης της περιοχής μελέτης) αντίστοιχα - σύμφωνα με τα πεδία τιμών που απαιτούνται από το λογισμικό FARSITE και σε τύπο δεδομένων ESRI ASCII GRD, με χρήση του Manifold System GIS. Το προβολικό σύστημα εξαγωγής των δεδομένων αυτών ήταν το UTM Z34.



Σχήμα 6.10: Υψομετρική πληροφορία της περιοχής μελέτης από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους μεγέθους pixel 25x25 m με χρήση του Manifold System GIS



Σχήμα 6.11: Πληροφορία έκθεσης της περιοχής μελέτης από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους μεγέθους pixel 25x25 m με χρήση του Manifold System GIS



Σχήμα 6.12: Πληροφορία κλίσης της περιοχής μελέτης από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους μεγέθους pixel 25x25 m με χρήση του Manifold System GIS

Η αντιστοίχιση των μοντέλων καύσιμης ύλης στη δεδομένη βλάστηση, όπως αποτυπώθηκε, για την περιοχή μελέτης, μέσω της ψηφιοποίησης του ορθοφωτοχάρτη των χρήσεων γης του 1991 του Υπουργείου Γεωργίας και της Γενικής Διεύθυνσης Δασών (Τμήμα Χαρτογράφησης), παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.1

Βλάστηση Ορθοφωτοχάρτη του 1991	Μοντέλα Καύσιμης Ύλης
Άγρονο	99
Γεωργική Καλλιέργεια	7
Θάμνοι – Θαμνώδεις Εκτάσεις	6
Λιβαδικές Εκτάσεις	3
Λοιπές Χρήσεις	99
Οικισμοί	99
Οικισμοί με μίξη με χαλέπιο πεύκη	2
Οικισμοί με μίξη με γεωργικές καλλιέργειες	7
Οικισμοί με μίξη με κυπαρίσσι	2
Πεύκη Χαλέπιο	10
Πεύκη Χαλέπιο σε μίξη με θάμνο	8
Πεύκη Χαλέπιο σε μίξη με γεωργικές καλλιέργειες	2
Πεύκη Χαλέπιο σε μίξη με οικισμό	10
Πεύκη Χαλέπιο σε μίξη με κυπαρίσσι	10

Πίνακας 6.1: Αντιστοίχιση της βλάστησης του ορθοφωτοχάρτη των χρήσεων γης του 1991 με τα μοντέλα καύσιμης ύλης (Anderson, 1982)

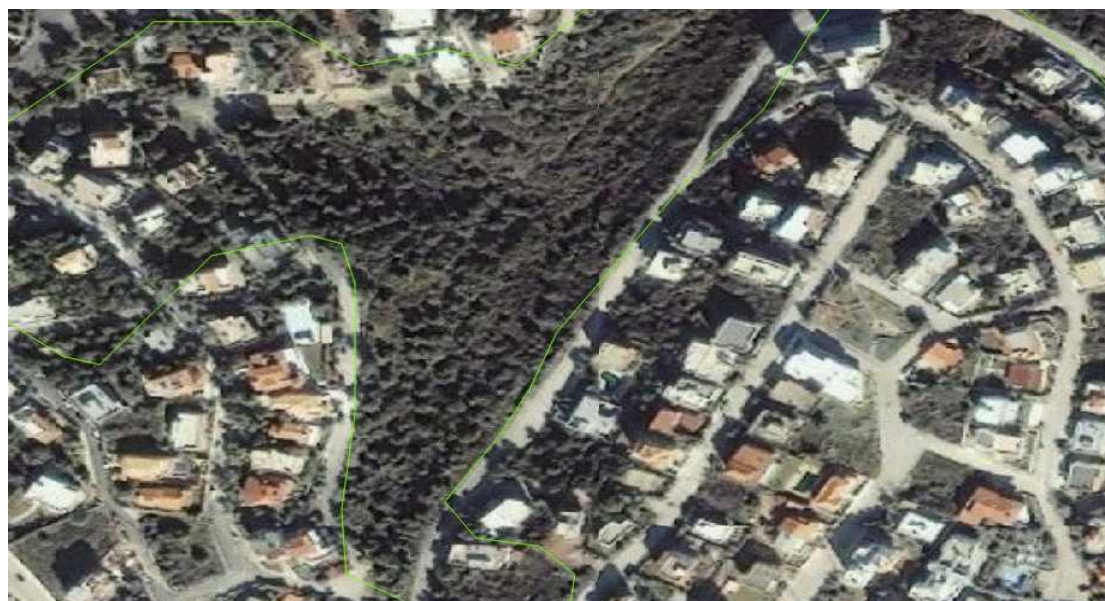
Για τον υπολογισμό της κάλυψης φυλλοστρώματος, χρησιμοποιήθηκαν αρχικά οι ορθοφωτοχάρτες του Υπουργείου Γεωργίας και της Γενικής Διεύθυνσης Δασών (Τμήμα Χαρτογράφησης) διακριτικής ικανότητας 1:20000 όπου και ψηφιοποιήθηκαν. Για την

μετατροπή των τριών κλιμάκων στη κάλυψη φυλλοστρώματος των ορθοφωτοχαρτών στις τέσσερες κλίμακες του FARSITE έγινε με εκτίμηση η παρακάτω αντιστοίχιση (Πίνακας 6.2).

Κάλυψη Φυλλοστρώματος (%)		Κάλυψη Φυλλοστρώματος(%)	
<i>Ορθοφωτοχάρτης 1:20000</i>		<i>FARSITE</i>	
10-40	1	1-20	1
10-40	1	21-50	2
40-70	2	51-80	3
70-100	3	81-100	4

Πίνακας 6.2: Αντιστοίχιση κάλυψης φυλλοστρώματος μεταξύ ορθοφωτοχαρτών διακριτικής ικανότητας 1:20000 και FARSITE

Επειδή η αντιστοίχιση των μοντέλων καύσιμης ύλης στη δεδομένη βλάστηση, όπως αποτυπώθηκε 14 χρόνια πριν τις πυρκαγιές που εξετάζουμε, για την περιοχή μελέτης, μέσω της ψηφιοποίησης του ορθοφωτοχάρτη των χρήσεων γης του 1991, δεν ανταποκρίνεται στη πραγματικότητα (αλλαγή χρήσης γης, πυρκαγιές κλπ.), αντιστοιχίστηκαν ξανά τα μοντέλα καύσιμης ύλης με φωτοερμηνεία της περιοχής μελέτης με χρήση εικόνας Quickbird του 2004, η οποία μεταφορτώθηκε στο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών από τους διαδικτυακούς διακομιστές εικόνων της Google, επίπεδο εικόνας αντίστοιχου της διακριτικής ικανότητας 1: 5.000 (Σχήμα 6.13).



Σχήμα 6.13: Λεπτομέρεια της εικόνας Quickbird του 2004 στην οποία βασίστηκε η φωτοερμηνεία

Κατά την φωτοερμηνεία έγινε επίσης και χρήση του δείκτη NDVI, που προέκυψε από σκηνή λήψης ASTER τον Ιούλιο του 2004 για όλη την Αττική, για όσο το δυνατόν καλύτερη εκτίμηση του ποσοστού κάλυψης των περιοχών από την αναλογούσα βλάστηση. Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης είναι ο περισσότερο χρησιμοποιημένος δείκτης Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) που ορίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (4) ως εξής (Rouse et al. 1974):

$$NDVI = NIR - RED / NIR + RED \quad (4)$$

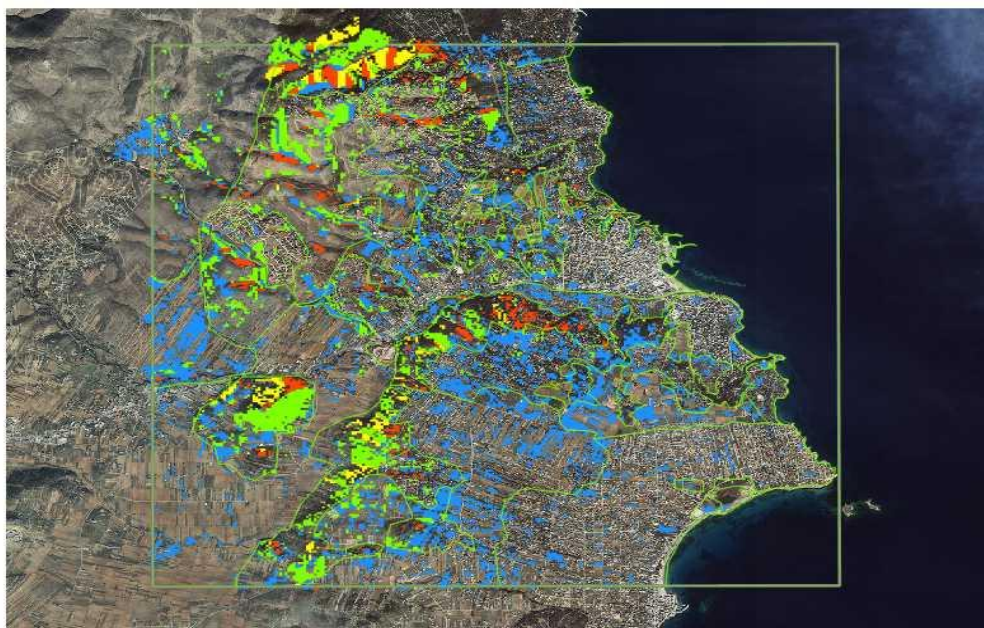
όπου,

NIR: η ανακλαστικότητα στο κοντινό υπέρυθρο και

RED: η ανακλαστικότητα στο ερυθρό κανάλι

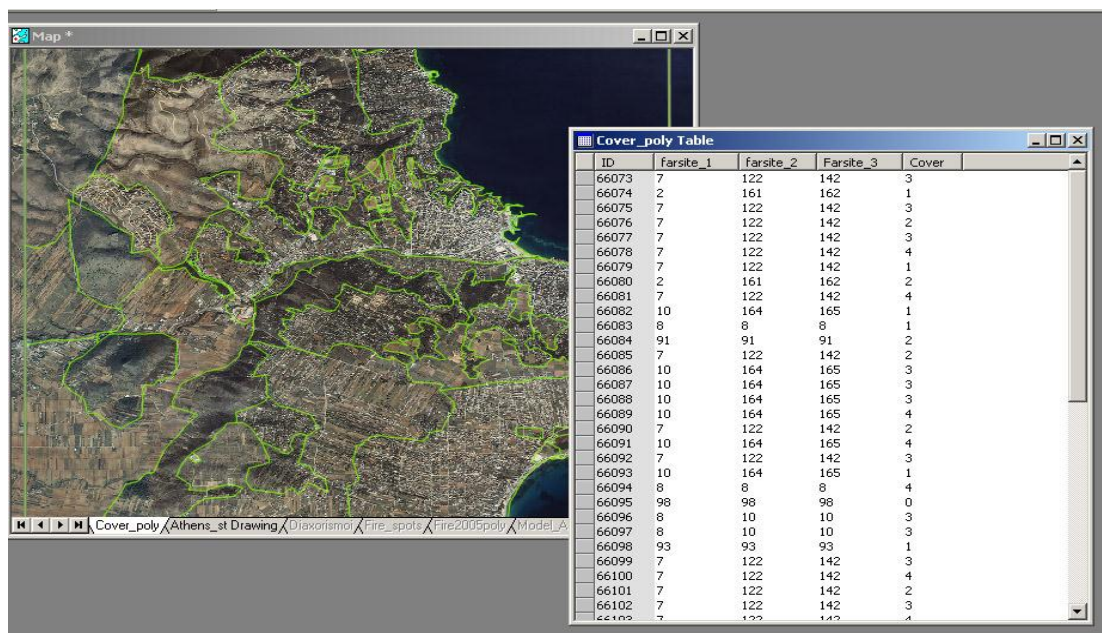
Ο λόγος που ο δείκτης βλάστησης (NDVI) σχετίζεται με τη βλάστηση είναι ότι στο κοντινό υπέρυθρο, η ανάκλαση της υγιούς βλάστησης αυξάνει πάρα πολύ (40-50%) λόγω της εσωτερικής δομής των φύλλων, ενώ στην περιοχή του ορατού (μπλε ως ερυθρό) η ανάκλαση της υγιούς βλάστησης είναι πολύ μικρότερη (20% ή λιγότερη) εξαιτίας της μεγάλης απορρόφησης της ακτινοβολίας από τη χλωροφύλλη για τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Το εύρος των τιμών του NDVI κυμαίνεται από -1 έως +1. Μεγάλες τιμές του δείκτη αντιπροσωπεύουν πυκνή βλάστηση με υγιές και πράσινο φύλλωμα, εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς ανακλαστικότητας μεταξύ του κοντινού υπέρυθρου και του ορατού φάσματος.

Συγκεκριμένα στη περιοχή μελέτης στο Σχήμα 6.14 παρατηρούμε τους χρωματισμούς για δείκτη NDVI >0.2. Ο χάρτης δημιουργήθηκε από ένα συνδυασμό μιας πολυφασματικής εικόνας Aster τον Ιούλιο του 2004 με την οποία παράχθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους διακριτικής ικανότητας 30 m και του δείκτη NDVI, ο οποίος προέκυψε από δύο κανάλια σάρωσης σε συγκεκριμένα τμήματα του φάσματος και δίνει ένα μέτρο της παρουσίας της βλάστησης στο έδαφος. Οι εικόνες αυτές εισήχθησαν σε ένα απλό μοντέλο που λαμβάνει υπόψη του τις κλίσεις εδάφους, την έκθεση και τη διεύθυνση των επικρατούντων ανέμων το καλοκαίρι στην Αττική (BA) και χρησιμοποιήθηκε από την Πυροσβεστική Υπηρεσία στο Σχέδιο Αντιμετώπισης Δασικών Πυρκαγιών του Νομού Αττικής το έτος 2007. Οι πράσινες, οι κίτρινες και οι κόκκινες τιμές καταδεικνύουν περιοχές με βλάστηση και έντονη κλίση με έκθεση Α-Δ, Β-ΒΔ και Β-ΒΑ αντίστοιχα, ενώ οι μπλε καταδεικνύουν περιοχές με βλάστηση και ήπια κλίση. Άρα σύμφωνα με τα παραπάνω, η πυρκαγιά στη Ραφήνα παρουσιάζει μεγαλύτερη δυσκολία στην αντιμετώπισή της σε σχέση με την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά λόγω μεγαλύτερων κλίσεων και πυκνότερης βλάστησης (Σχήμα 6.14).



Σχήμα 6.14: Περιοχή μελέτης και Δείκτης NDVI>0.2. Οι πράσινες, οι κίτρινες και οι κόκκινες τιμές καταδεικνύουν περιοχές με βλάστηση και έντονη κλίση με έκθεση Α-Δ, Β-ΒΔ και Β-ΒΑ αντίστοιχα, ενώ οι μπλε καταδεικνύουν περιοχές με βλάστηση και ήπια κλίση

Κατά την εισαγωγή των πολυγωνικών γραμμών που αποτελούσαν τις μονάδες βλάστησης – μοντέλου καύσιμης ύλης έγινε ταυτόχρονα εισαγωγή στον πίνακα των κωδικών των μοντέλων καύσιμης ύλης που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκεκριμένη περιοχή (Σχήμα 6.15).



Σχήμα 6.15: Πολύγωνα χωρικού διαχωρισμού μοντέλων καύσιμης ύλης και πίνακας περιγραφής

Κατόπιν, έγινε μετατροπή των διανυσματικών πολυγώνων της απόδοσης τιμών σύμφωνα με τα μοντέλα καύσιμης ύλης σε δομή raster με μέγεθος pixel 25x25 m και στην συνέχεια εξαγωγή σε δομή ESRI ASCII GRID, για την τροφοδοσία του λογισμικού FARSITE. Για την συγκεκριμένη περιοχή το ύψος κόμης (canopy height) εκτιμήθηκε βιβλιογραφικά στα 10 m (ο μέσος όρος των 4 m έως 16 m), το ύψος έναρξης της ζωντανής κόμης (crown base height) εκτιμήθηκε στα 4,8 m (ο μέσος όρος των 3 m έως 6,5 m), η πυκνότητα όγκου κόμης (crown bulk density) εκτιμήθηκε στα 0,16 kg/m³ (ο μέσος όρος των 0,09 kg/m³ έως 0,22 kg/m³), και η πυκνότητα πεσμένου φυλλοστρώματος (duff loading) εκτιμήθηκε στα 14 Mg/ha (ο μέσος όρος των 9,6 Mg/ha έως 18 Mg/ha) (Mitsopoulos and Dimitrakopoulos 2006). Στη συνέχεια, εισήχθησαν στο FARSITE οι περιεχόμενες υγρασίες ζωντανής και νεκρής καύσιμης ύλης ανά Μοντέλο Καύσιμης Ύλης (Μέτρηση από το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών, Γ. Ξανθόπουλος). Περιεχόμενη υγρασία νεκρής καύσιμης ύλης: 1-hr χρονικής υστέρησης (Time Lag - TL): 5%, 10-hr TL: 6% και 100-hr TL: 10%. Περιεχόμενη υγρασία ζωντανής καύσιμης ύλης χορτολιβαδικής: 100% και ξυλώδους: 100%. Επόμενο βήμα αποτέλεσε ο καθορισμός των παραμέτρων του μοντέλου που ρυθμίζουν τη χωρική και χρονική ανάλυση της προσομοίωσης (χρονικό βήμα, βήμα οπτικοποίησης, ανάλυση περιμέτρου και απόστασης εξάπλωσης). Χρονικό βήμα (time step) είναι το μέγιστο χρονικό διάστημα που οι συνθήκες σε ένα ορισμένο σημείο θεωρούνται ως σταθερές έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η προβολή του μετώπου πυρκαγιάς. Στην περίπτωση της πυρκαγιάς που μελετάμε, ορίστηκε ως χρονικό βήμα τα 30 min, οπτικό βήμα η 1 hr, ανάλυση της περιμέτρου τα 60 m και ανάλυση απόστασης εξάπλωσης τα 30 m.

Τέλος, για τις προσομοιώσεις των πυρκαγιών καθορίστηκαν οι διάρκειές τους, οι οποίες ήταν οι χρονικές περίοδοι από την έναρξη μιας πυρκαγιάς μέχρι την στιγμή του ελέγχου της, για τη Ραφήνα (από 28/7/2005 στις 10:45 έως 28/7/2005 στις 18:00) και για το Νέο Βουτζά (από 28/7/2005 στις 13:25 έως 28/7/2005 στις 20:00) καθώς και τα σημεία ανάφλεξης τα οποία εντοπίστηκαν με επιτόπου έρευνα από τη Διεύθυνση Αντιμετώπισης Εγκλημάτων Εμπρησμού (Δ.Α.Ε.Ε.) της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας. Εκτιμήθηκε κατά προσέγγιση ότι η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά εκδηλώθηκε στην περιοχή με συντεταγμένες B: 38° 02' 57'', A: 23° 58' 54'' ενώ η πυρκαγιά στη Ραφήνα εκδηλώθηκε στην περιοχή με συντεταγμένες B: 38° 01' 26'', A: 23° 59' 16''.

Τα δεδομένα εισόδου στο μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE παρουσιάζονται συνοπτικά στον Πίνακα 6.3.

Δεδομένα Εισόδου στο Μοντέλο FARSITE	
Ύψος κόμης	10 m
Ύψος έναρξης της ζωντανής κόμης	4,8 m
Πυκνότητα όγκου κόμης	0,16 kg/m ³
Πυκνότητα πεσμένου φυλλοστρώματος	14 Mg/ha
Υγρασία νεκρής καύσιμης ύλης 1-hr	5%
Υγρασία νεκρής καύσιμης ύλης 10-hr	6%
Υγρασία νεκρής καύσιμης ύλης 100-hr	10%
Υγρασία ζωντανής καύσιμης ύλης χορτολιβαδικής	100%
Υγρασία ζωντανής καύσιμης ύλης ξυλώδους	100%
Χρονικό βήμα προσομοίωσης	30 min
Οπτικό βήμα προσομοίωσης	1 h
Ανάλυση περιμέτρου	60 m
Ανάλυση απόστασης εξάπλωσης	30 m

Πίνακας 6.3: Δεδομένα εισόδου στο μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE

Η χρήση του FARSITE σε περιοχές διαφορετικές από εκείνες στις οποίες αναπτύχθηκε το μοντέλο, απαιτεί αρχικά μια τοπική βαθμονόμηση για να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τα μεσογειακά οικοσυστήματα, όπου οι κοινότητες των φυτών χαρακτηρίζονται από μεγάλη ανομοιογένεια και πολυπλοκότητα. Για να βαθμονομηθεί το FARSITE είναι αναγκαίο το κατάλληλο μοντέλο καυσίμων για τη συγκεκριμένη περιοχή. Σε αυτή τη μελέτη προσομοιώθηκαν με το FARSITE δύο πυρκαγιές στην περιοχή της Μεσογείου και συγκεκριμένα στην Ελλάδα στην ανατολική Αττική, που χρησιμοποιούν διαφορετικά μοντέλα καυσίμου και μετεωρολογικών συνθηκών.

6.2.3.1 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης Περιοχής Μελέτης

Εξαιτίας της μεγάλης χωρικής και χρονικής ανομοιογένειας που χαρακτηρίζει τη δασική καύσιμη ύλη είναι πολύ δύσκολη η μέτρηση των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων της, επομένως η δημιουργία αντιπροσωπευτικών μοντέλων καύσιμης ύλης αποτελεί την πλέον χρησιμοποιούμενη παγκόσμια μέθοδο για την αποτίμησή της (Δημητρακόπουλος κ.α. 2001). Τα μοντέλα καύσιμης ύλης είναι δημιούργημα της προσπάθειας να ταξινομηθούν τα είδη βλάστησης με βάση τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες κατά την καύση και χρησιμοποιούνται για να ταξινομηθεί η βλάστηση που είναι επιρρεπής στη φωτιά. Είναι χρήσιμα διότι τυποποιούν μια πληθώρα πολύπλοκων και δύσκολων να μετρηθούν πυρικών παραμέτρων.

Για τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών διερευνώνται ανά τον κόσμο διάφοροι μέθοδοι μοντελοποίησης της καύσιμης ύλης. Στη χώρα μας, έχουν δημιουργηθεί αντιπροσωπευτικά

μοντέλα καύσιμης ύλης για τους σημαντικότερους δασικούς τύπους από τους Δημητρακόπουλος και άλλοι (2001) και Dimitrakopoulos (2002) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά αν αξιολογηθούν σε σχέση με πραγματικές πυρκαγιές. Επίσης, για την περιφέρεια της Αττικής, έχουν δημιουργηθεί αντιπροσωπευτικά μοντέλα δασικής καύσιμης ύλης (Ξανθόπουλος κ.α. 2009). Σταθμό έχουν αποτελέσει τα δεκατρία (13) μοντέλα καύσιμης ύλης (MKY) που αναπτύχθηκαν αρχικά για το Σύστημα Πρόβλεψης Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς BEHAVE (Andrews 1986), όπου η ταξινόμηση της βλάστησης βασίστηκε σε επιτόπια μέτρηση της καύσιμης ύλης (Πίνακας 6.4). Επομένως, για την περιοχή μελέτης (Ραφήνα-Νέος Βουτζάς, Ν. Αττικής) κάθε τύπος κάλυψης γης ήρθε αρχικά σε αντιστοιχία με ένα από τα δεκατρία (13) μοντέλα καύσιμης ύλης (MKY) σύμφωνα με τον Anderson (1982) και στη συνέχεια έγιναν δοκιμές χρησιμοποιώντας ένα από τα νέα σαράντα (40) πρότυπα μοντέλων καύσιμης ύλης των Scott & Burgan (2005) (Πίνακας 6.5) καθώς και κάποια από τα μοντέλα καύσιμης ύλης που αντιστοιχούν σε τύπους χρήσεων γης του Corine.

Το FARSITE προσομοίωσε τις πυρκαγιές στη Ραφήνα και στο Νέο Βουτζά όπως έχουν κάνει με μεγάλη επιτυχία, για τρεις πυρκαγιές στη Βόρεια Σαρδηνία, οι Bachisio Arca et al. σε εργασία τους το 2007. Το FARSITE χρησιμοποίησε τα εξής μοντέλα καύσιμης ύλης: 2, 7, 8 και 10 (Anderson 1982). – δοκιμή 1 στην συνέχεια τα μοντέλα καύσιμης ύλης: 8, 122 και 164 (Scott & Burgan 2005) – δοκιμή 2 και στο τέλος τα μοντέλα καύσιμης ύλης: 243 (7) και 312 (10) (Corine) – δοκιμή 3 (Πίνακας 6.6). Σε όλες τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης προσαρμογής (Adjustment factor). Ο δείκτης προσαρμογής σύμφωνα με τις τεχνικές οδηγίες του FARSITE, μας επιτρέπει την προσέγγιση προσομοιωμένων δεδομένων στα παρατηρούμενα, τροποποιώντας τη ταχύτητα της προσομοιωμένης πυρκαγιάς για συγκεκριμένο μοντέλο βλάστησης. Έχει τιμή ίση με 1 για κάθε μοντέλο βλάστησης και η τροποποίηση της τιμής του έχει να κάνει και με την εμπειρία του προγνώστη. Για τον έλεγχο της ακρίβειας των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ο μη συμμετρικός στατιστικός δείκτης Sørensen (SC), ο οποίος μετράει την ομοιότητα μεταξύ της πραγματικής και προσομοιωμένης καμένης έκτασης (Bachisio Arca et al. 2007). Η αντιστοιχία έγινε με βάση την επιτόπου παρατήρηση της βλάστησης στην περιοχή μελέτης με αυτή που κυριαρχεί σε κάθε μοντέλο (κωνοφόρα, πλατύφυλλα, θάμνοι, χορτολίβαδα, άγρινη έκταση). Ακολούθως παρουσιάζεται η αντιστοίχιση των μοντέλων καύσιμης ύλης.

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

Πίνακας 6.4: Τα μοντέλα καύσιμης ύλης που αναπτύχθηκαν για το σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς BEHAVE (Andrews 1986) και η προσαρμογή τους στις συνθήκες της ελληνικής βλάστησης (Kalabokidis 2004)

Μοντέλο καύσιμης ύλης	Αντιστοίχιση
2 (Anderson 1982)	Δασολίβαδα
7 (Anderson,1982)	Θαμνότοποι μερικώς δασοσκεπείς
8 (Anderson 1982)	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
10 (Anderson 1982)	Σύμπυκνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
122 (Scott-Burgan)	Θαμνολίβαδα (τουλάχιστον 50% κάλυψη θάμνων)
164 (Scott-Burgan)	Σύμπυκνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
91,93,98 και 99	Μηδενική κάλυψη

Πίνακας 6.5: Η αντιστοίχιση των μοντέλων καύσιμης ύλης (Anderson 1982, Scott-Burgan 2005) που χρησιμοποιήθηκαν στην περιοχή μελέτης με τις συνθήκες της Ελληνικής βλάστησης (Kalabokidis 2004).

Η αντιστοίχιση των τύπων χρήσεων γης του CORINE με τα μοντέλα καύσιμης ύλης του BEHAVE παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.6 (Καλαμποκίδης κ.α 2004).

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

Πίνακας 6.6: Αντιστοίχιση των τύπων χρήσεων γης του CORINE με τα μοντέλα καύσιμης ύλης του BEHAVE

6.2.4 Κλιματικό Μοντέλο *MAGICC-SCENGEN*

Για τη διερεύνηση του αν και πως η κλιματική αλλαγή στον πλανήτη θα επηρεάσει τις καιρικές συνθήκες στην χώρα μας χρησιμοποιήθηκε το κλιματικό μοντέλο *MAGICC* (Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change) και η βάση δεδομένων *SCENGEN* (SCENario GENerator). Αλλάζοντας τις διάφορες παραμέτρους του μοντέλου όπως την ευαισθησία του κλίματος, το κλιματικό σενάριο, τη χρονική περίοδο ενδιαφέροντος και τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (GCM), που αποτελούν τη βάση δεδομένων *SCENGEN*, μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες που αφορούν τις κλιματικές τάσεις της βροχόπτωσης, της νέφωσης, του ανέμου, της μέσης και της μέγιστης θερμοκρασίας στους θερμούς μήνες, δηλαδή των σημαντικότερων μετεωρολογικών παραγόντων που επηρεάζουν τη δημιουργία και την εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών στη χώρα μας (Wigley et al. 2000). Επίσης, οι κλιματικές τάσεις μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο πυρκαγιάς *FARSITE* για την προσομοίωση της μελλοντικής συμπεριφοράς της.

6.2.4.1 *Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change (MAGICC)*

Το MAGICC είναι ένα μοντέλο για την αξιολόγηση των εκτιμήσεων αλλαγής κλίματος από το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Είναι ένα σύνολο συνδεδεμένων απλών μοντέλων που συλλογικά καταλήγει να συμπεριφέρεται σαν ένα απλό μοντέλο κλίματος. Δεν είναι ένα παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο (GCM), αλλά χρησιμοποιεί μια σειρά μοντέλων απλής μορφής για να μιμηθεί τη συμπεριφορά ενός πλήρους τρισδιάστατου δυναμικού GCM (Harvey et al. 1997). Το MAGICC υπολογίζει τη μέση ετήσια παγκόσμια επιφανειακή θερμοκρασία αέρα και τα μέσα επίπεδα θάλασσας (sea-levels) από τις επιπτώσεις των σεναρίων εκπομπών για τα αέρια θερμοκηπίου και το διοξείδιο του θείου (Raper et al. 1996). Οι χρήστες είναι σε θέση να επιλέξουν τα σεναρία εκπομπών για χρήση ή να καθορίσουν δικά τους καθώς και να αλλάξουν τις διάφορες παραμέτρους του μοντέλου για να ερευνήσουν την αβεβαιότητα.

Στο MAGICC η παράμετρος D_{n80s} (είναι ο μέσος όρος δεκαετίας 1980, της αλλαγής στη συγκέντρωση του CO_2 από την αποψίλωση των δασών και την επίδραση της λίπανσης) ορίζεται 1,1 Gt C σύμφωνα με τη δεύτερη έκθεση αξιολόγησης του IPCC (Schimel et al. 1995). Επίσης η επίδραση της έντασης ακτινοβολίας των αερολυμάτων έχει μεγάλη σημασία για την αλλαγή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας. Η ένταση ακτινοβολίας των αερολυμάτων χωρίζεται στην άμεση, λόγω της άμεσης ακτινοβολίας σε ανέφελο ουρανό των αερολυμάτων των θεικών αλάτων που σχηματίζονται από τη καύση των ορυκτών, στην έμμεση, που προκαλείται από τις αλλαγές στη λευκαύγεια των νεφών και στη βιοσφαιρική, από τις εκπομπές των αερολυμάτων από τη βιομάζα που καίγεται. Η άμεση ένταση ακτινοβολίας των αερολυμάτων ορίζεται στο MAGICC : $-0,3 \text{ W/m}^2$, η έμμεση: $-0,8 \text{ W/m}^2$ και η βιοσφαιρική: $-0,2 \text{ W/m}^2$. Οι τιμές αυτές χρησιμοποιούνται στη δεύτερη έκθεση αξιολόγησης του IPCC (Kattenberg et al. 1996). Επίσης στο MAGICC ορίζεται η ευαισθησία του κλιματικού μοντέλου (ΔT_{2x}) στην τιμή των $2,5^\circ\text{C}$ (ως η μέση τιμή της διακύμανσης, σύμφωνα με την Τρίτη Έκθεση του IPCC). Ως ευαισθησία κλιματικού μοντέλου ορίζεται η μεταβολή της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας του αέρα στον πιθανό διπλασιασμό της συγκέντρωσης του ατμοσφαιρικού CO_2 .

6.2.4.2 *SCENario GENerator (SCENGEN)*

Το SCENGEN δεν είναι ένα κλιματικό μοντέλο αλλά είναι μια απλή βάση δεδομένων που περιέχει τα αποτελέσματα ενός μεγάλου αριθμού πειραμάτων GCM, όπως και παγκόσμιες παρατηρήσεις καθώς και τέσσερα σύνολα αρχείων κλίματος. Εκμεταλλεύεται τα διάφορα σύνολα αρχείων κλίματος χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες για το ποσοστό και το

μέγεθος της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου που παρέχονται από το MAGICC. Το SCENGEN χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο κλίμακας για να παρέχει τις πληροφορίες για τα σενάρια της αλλαγής κλίματος. Ο αρχικός σκοπός του λογισμικού MAGICC-SCENGEN είναι να επιτραπεί στους μη ειδικούς χρήστες να ερευνήσουν τις επιπτώσεις των διαφορετικών σεναρίων εκπομπής για τη μελλοντική μέση και πλανητική κλιματική αλλαγή και για να ποσοτικοποιήσουν τις αβεβαιότητες σε αυτές τις αλλαγές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων του μετεωρολογικού μοντέλου RAMS, του κλιματικού μοντέλου MAGICC-SCENGEN και του μοντέλου πυρκαγιάς FARSITE στην περιοχή ενδιαφέροντος. Η περιοχή ενδιαφέροντος είναι η ανατολική Αττική – Ραφήνα - Νέος Βουτζάς, όπου εκδηλώθηκαν οι δύο καταστροφικές πυρκαγιές στις 28 Ιουλίου του 2005. Το RAMS προσομοίωσε την επιφανειακή θερμοκρασία και τον άνεμο, τα οποία παρουσιάζονται στο τέταρτο πλέγμα του μοντέλου (στο πιο αναλυτικό πλέγμα, ανάλυσης 1 km) για το διάστημα 27-29 Ιουλίου του 2005. Τα αποτελέσματα του RAMS και οι παρατηρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού του Ελ. Βενιζέλου αποτέλεσαν δεδομένα εισόδου του μοντέλου πυρκαγιάς FARSITE.

Στη συνέχεια, το κλιματικό μοντέλο MAGICC-SCENGEN χρησιμοποιήθηκε με σκοπό τη διερεύνηση των κλιματικών τάσεων των μετεωρολογικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στα επόμενα χρόνια. Επομένως, παρουσιάζονται οι κλιματικές τάσεις της μέσης και μέγιστης θερμοκρασίας, του μέσου ανέμου και της μέσης βροχόπτωσης για τους θερινούς μήνες της περιόδου 2060-2089 για δύο πιθανά σενάρια. Τα αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου εισάγονται στο μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE, για την εκτίμηση της μελλοντικής συμπεριφοράς των πυρκαγιών στην περιοχή μελέτης.

Τέλος, το μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει τις καμένες εκτάσεις δύο παράλληλων πυρκαγιών στη Ραφήνα και στο Νέο Βουτζά χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα μοντέλα καύσιμης ύλης. Για την εύρεση των κατάλληλων μοντέλων καύσιμης ύλης χρησιμοποιήθηκε αρχικά ο χάρτης βλάστησης του 1991 και ακολούθησε μια σειρά από τρία (3) Τεστ με σκοπό τη βαθμονόμηση του FARSITE στην περιοχή ενδιαφέροντος. Στο τέλος, έγινε προσομοίωση των πυρκαγιών του μέλλοντος, πρώτα σύμφωνα με τα αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου MAGICC-SCENGEN και στη συνέχεια σύμφωνα με πιθανές μεταβολές της βλάστησης, των μετεωρολογικών παραγόντων και της τοπογραφίας.

7.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ RAMS

Τη θερμή περίοδο του έτους τα βαρομετρικά χαμηλά του Βόρειου Ατλαντικού Ωκεανού εκτείνονται ως την Ευρώπη και μόνο οι άκρες των μετώπων φτάνουν έως την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (Kallos et al. 1993, Kassomenos et al. 1995), διότι η συγκεκριμένη περιοχή κυριαρχείται από αντικυκλωνική κυκλοφορία. Όταν οι υψηλές πιέσεις που καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της Μεσογείου και της Νότιας Ευρώπης το καλοκαίρι

εξασθενούν πάνω από τα Βαλκάνια και την Ανατολική Μεσόγειο, το θερμικό χαμηλό των Ινδιών επεκτείνεται έως την περιοχή της Δυτικής Μικράς Ασίας και του Ανατολικού Αιγαίου με συνέπεια, τη δημιουργία μιας ισχυρής βαροβαθμίδας στην περιοχή των Δαρδανελίων και την εμφάνιση ισχυρών ΒΑ ανέμων στο Αιγαίο, των γνωστών ως Ετησίες (μελέτμια). Η περίπτωση που εξετάζουμε (δασικές πυρκαγιές στη Ραφήνα - Νέου Βουτζά στις 28-07-2005) παρουσιάζει ισχυρή βόρεια ροή λόγω της βαροβαθμίδας μεγέθους 15 hPa που αναπτύχθηκε στη περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου και την εμφάνιση των Ετησίων, σύμφωνα με τους ισοβαρικούς χάρτες επιφανείας του Μετεωρολογικού Κέντρου του Βερολίνου (Σχήμα 7.1).

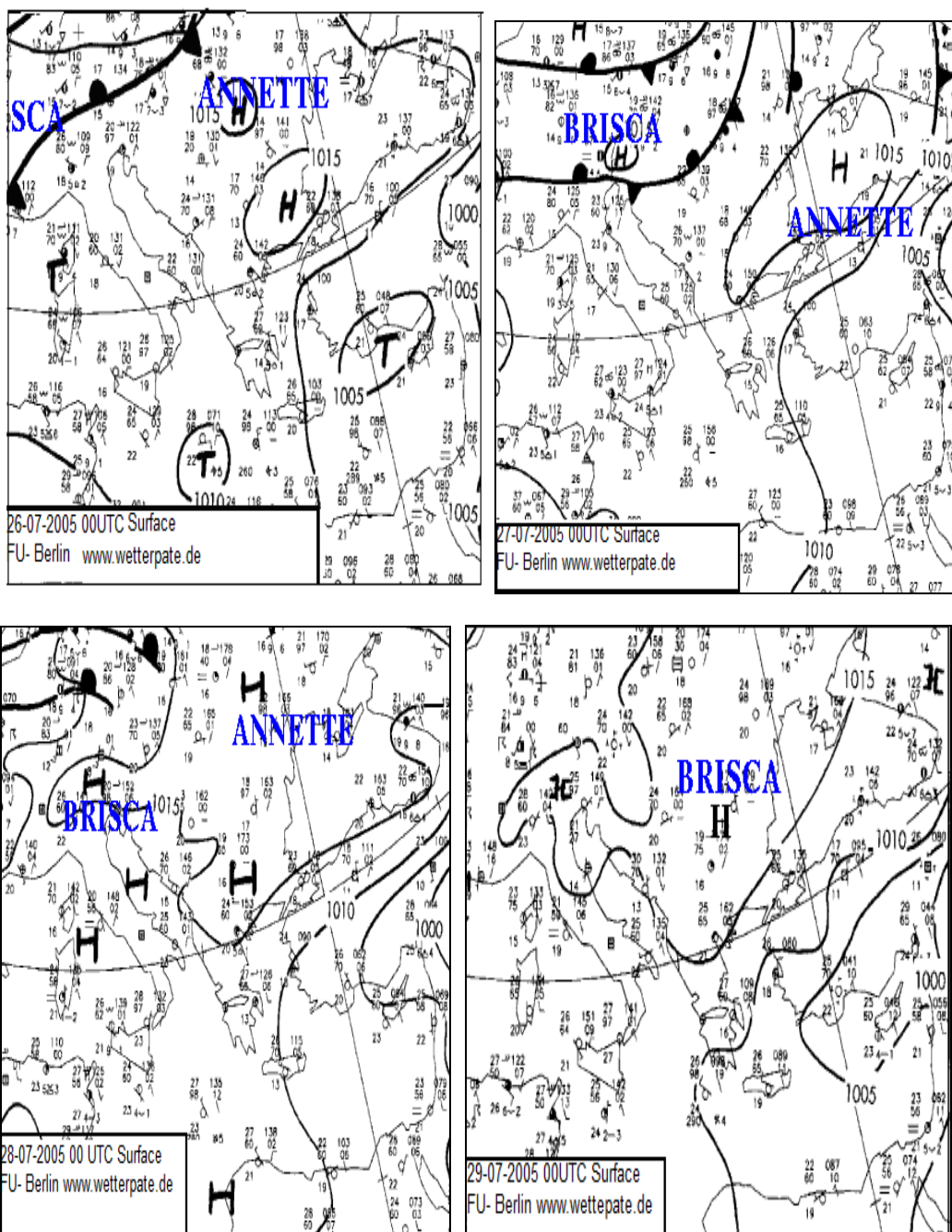
Το RAMS προσομοίωσε την επιφανειακή θερμοκρασία και τον άνεμο το διάστημα από τις 27 Ιουλίου 2005 12:00 UTC έως τις 29 Ιουλίου 2005 12:00 UTC και τα αποτελέσματα, από το πλέγμα με την υψηλότερη ανάλυση, παρατίθενται παρακάτω. Στις 12:00 UTC της 27ης Ιουλίου παρατηρείται η πολύ ισχυρή B-BA ροή στην Αττική (ετησίας) με ένταση μέχρι 14 m/s (Σχήμα 7.2). Η ροή αυτή αναπτύσσει μέγιστη ένταση στην Ανατολική Αττική και την Εύβοια ενώ στην Δυτική Αττική μειώνεται. Οι θερμοκρασίες που επικρατούν στις περιοχές αυτές δεν ξεπερνούν τους 31°C (Σχήμα 7.3) με τις μέγιστες στην περιοχή της Δυτικής Αττικής λόγω εξασθένησης του Ετησία. Ειδικότερα, στην περιοχή της Ραφήνας επικρατούν θερμοκρασίες της τάξης των 26°C με ΒΑ άνεμους έντασης 10 m/s.

Στις 07:00 UTC της 28ης Ιουλίου, 45 λεπτά πριν από την εκδήλωση της πυρκαγιάς στα Σκουφέικα Ραφήνας, η ένταση του ανέμου στην Αττική πλησιάζει τα 16 m/s, ενώ η διεύθυνσή του παραμένει B-BA (Σχήμα 7.4). Η μέγιστη ένταση του ανέμου παρατηρείται στην Ανατολική Αττική και την Εύβοια ενώ στην Δυτική Αττική μειώνεται. Οι θερμοκρασίες στις περιοχές αυτές φτάνουν τους 26°C (Σχήμα 7.5) Συγκεκριμένα, στην περιοχή της Ραφήνας επικρατούν θερμοκρασίες της τάξης των 26°C με B-BA άνεμους έντασης 9 m/s ή 36 km/h. Στις 10:00 UTC της 28ης Ιουλίου, 35 λεπτά μετά την εκδήλωση της δεύτερης πυρκαγιάς στον Νέου Βουτζά- Ραφήνας, παρατηρείται ένα πολύ ισχυρό B-BA ρεύμα ανέμου στην Αττική (Ετησίας) με ένταση μέχρι τα 16 m/s (Σχήμα 7.6). Οι θερμοκρασίες που επικρατούν πλησιάζουν τους 34°C (Σχήμα 7.7). Για την ευρύτερη περιοχή της Ραφήνας η θερμοκρασία είναι κοντά στους 29°C με B-BA άνεμους έντασης 12 m/s ή 42 km/h. Στις 12:00 UTC της 28ης Ιουλίου, ο άνεμος εξακολουθεί να είναι B-BA στην Αττική (Ετησίας) εντάσεως 14 m/s (Σχήμα 7.8). Οι θερμοκρασίες που καταγράφονται στην περιοχή της Αττικής προσεγγίζουν τους 36°C (Σχήμα 7.9). Αναλυτικότερα στην περιοχή ενδιαφέροντος (Ραφήνα), η θερμοκρασία είναι 30°C με B-BA άνεμους έντασης 12 m/s (Pliorou et al. 2010). Στις 18:00 UTC της 28ης Ιουλίου, εξασθενεί ο Ετησίας και η ένταση των B-BA ανέμων πλησιάζει τα 12m/s (Σχήμα 7.10). Οι θερμοκρασίες που επικρατούν στην περιοχή της Ραφήνας είναι κοντά στους 31°C, με B-BA άνεμους έντασης 8 m/s (Σχήμα 7.11).

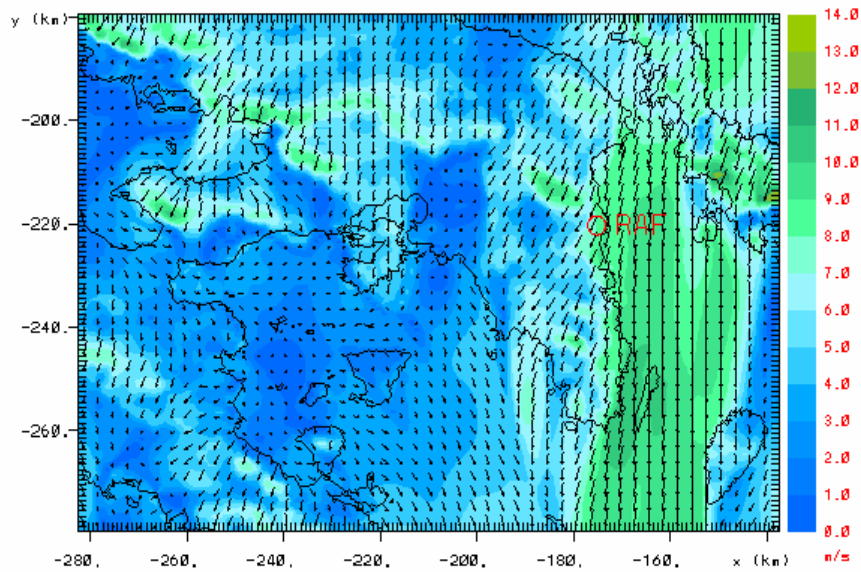
Στις 00:00 UTC της 29ης Ιουλίου, παρατηρούνται για την περιοχή της Ραφήνας, B-BA άνεμος έντασης 10 m/s και θερμοκρασίες της τάξης των 28°C (Σχήματα 7.12 και 7.13).

Στις 12:00 UTC της 29ης Ιουλίου, ενισχύεται ο Ετησίας και παρατηρείται μια πολύ ισχυρή B-BA ροή στην Αττική με ένταση μέχρι 16 m/s, ενώ στην περιοχή της Ραφήνας δεν ξεπερνά τα 13 m/s (Σχήμα 7.14). Η θερμοκρασία που επικρατεί στην Αττική πλησιάζει τους 34°C, ενώ στην περιοχή ενδιαφέροντος δεν ξεπερνά τους 32°C (Σχήμα 7.15).

Από τα αποτελέσματα των παραπάνω προσομοιώσεων του ατμοσφαιρικού μοντέλου RAMS για τον άνεμο, στην περιοχή μελέτης και για το χρόνο εκδήλωσης των δύο πυρκαγιών, παρατηρείται μια πολύ ισχυρή B-BA ροή εντάσεως 12 m/s. Τα γεγονόσ αυτό επιβεβαιώνεται από τις μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού του Ελ. Βενιζέλου όπου μετρούν διεύθυνση ανέμου B-BA και ένταση ανέμου κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών από 36 km/h – 42 km/h, δηλαδή από 10 m/s -13 m/s περίπου (Σχήμα 6.2).

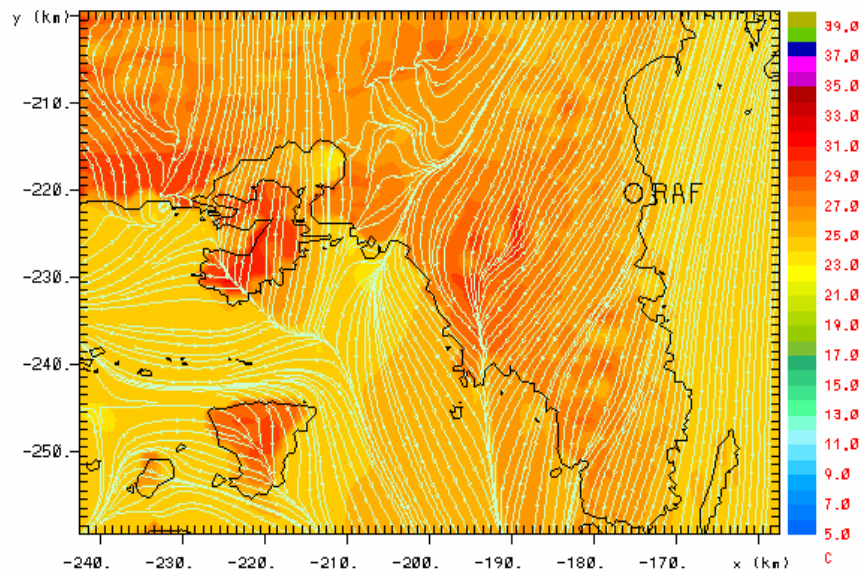


Σχήμα 7.1: Χάρτες επιφανείας για την περιοχή της Ανατολικής Μεσογείου όπου παρουσιάζεται ισχυρή βαροβαθμίδα μεγέθους 15 hPa από τις 26 έως τις 29 Ιουλίου 2005 (www.wetterpate.de). Τα BRISCA και ANNETTE είναι ονόματα των συστημάτων που δίνονται από το Μετεωρολογικό Κέντρο του Βερολίνου όταν αυτά περνούν τον Ατλαντικό Ωκεανό.



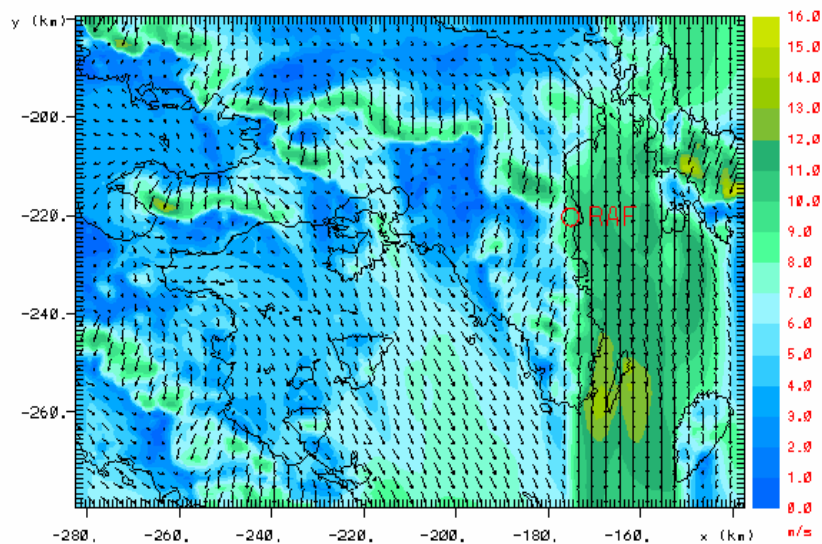
RAMS 4.3 for Linux		grid 4			
	2005-07-27-1200.00 UTC	min	max	inc	lab*
contours	speed - 10m AGL (m/s)	0.2254E-01	13.79	1.000	1e 0
vectors	+	4 m/s horiz			

Σχήμα 7.2: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 27 Ιουλίου 2005



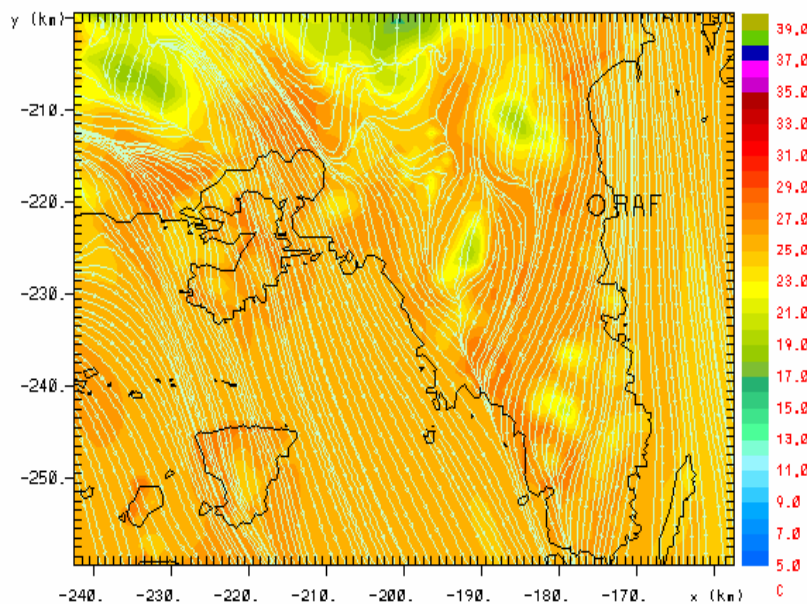
RAMS 4.3 for Linux		grid 4			
	2005-07-27-1200.00 UTC	min	max	inc	lab*
contours	temp - 2m AGL (C)	23.89	31.29	1.000	1e 0

Σχήμα 7.3: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 27 Ιουλίου 2005



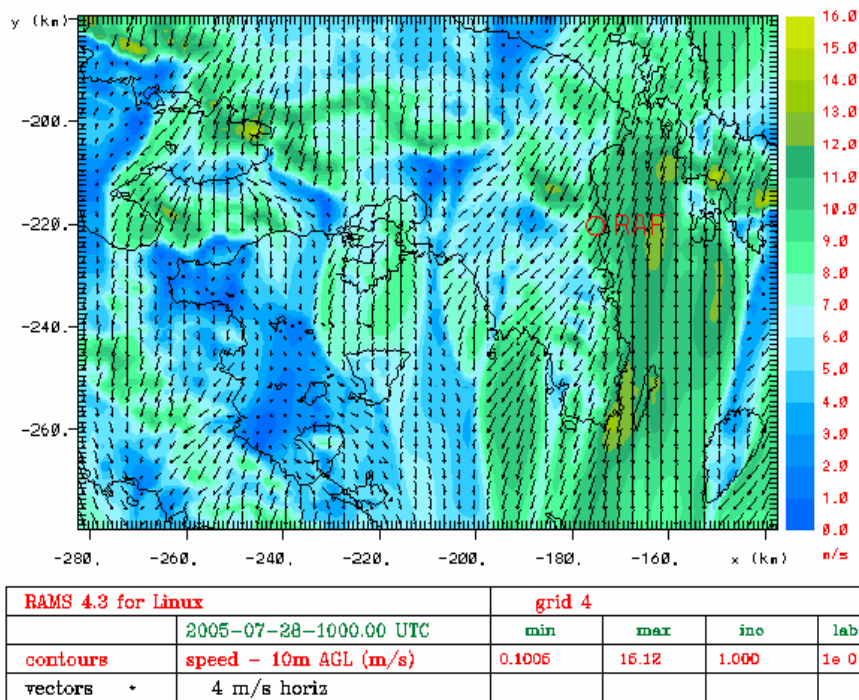
RAMS 4.3 for Linux		grid 4			
	2005-07-28-0700.00 UTC	min	max	inc	lab*
contours	speed - 10m AGL (m/s)	0.1678	15.86	1.000	1e 0
vectors	4 m/s horiz				

Σχήμα 7.4: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 07:00 UTC 28 Ιουλίου 2005

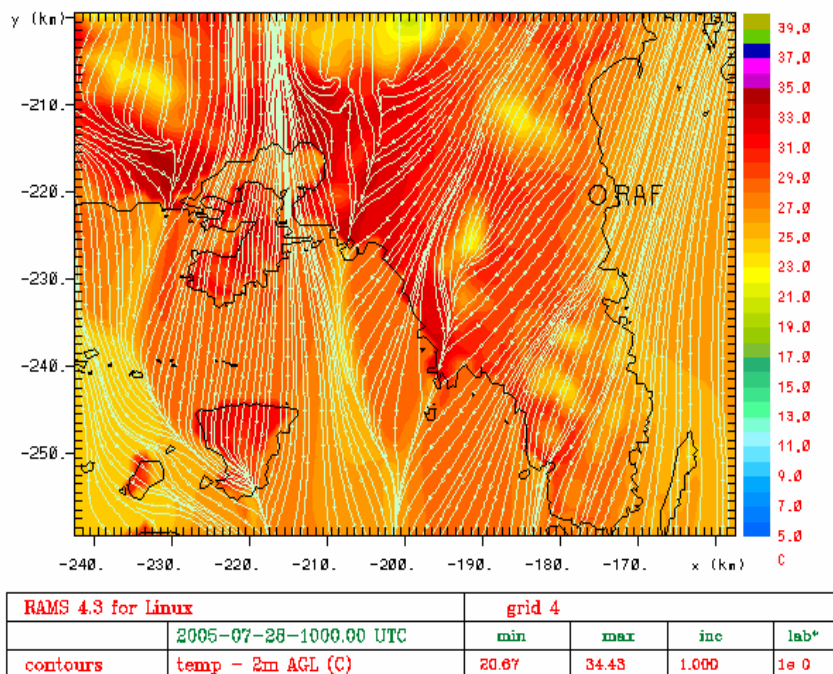


RAMS 4.3 for Linux		grid 4			
	2005-07-28-0700.00 UTC	min	max	inc	lab*
contours	temp - 2m AGL (C)	16.79	28.07	1.000	1e 0

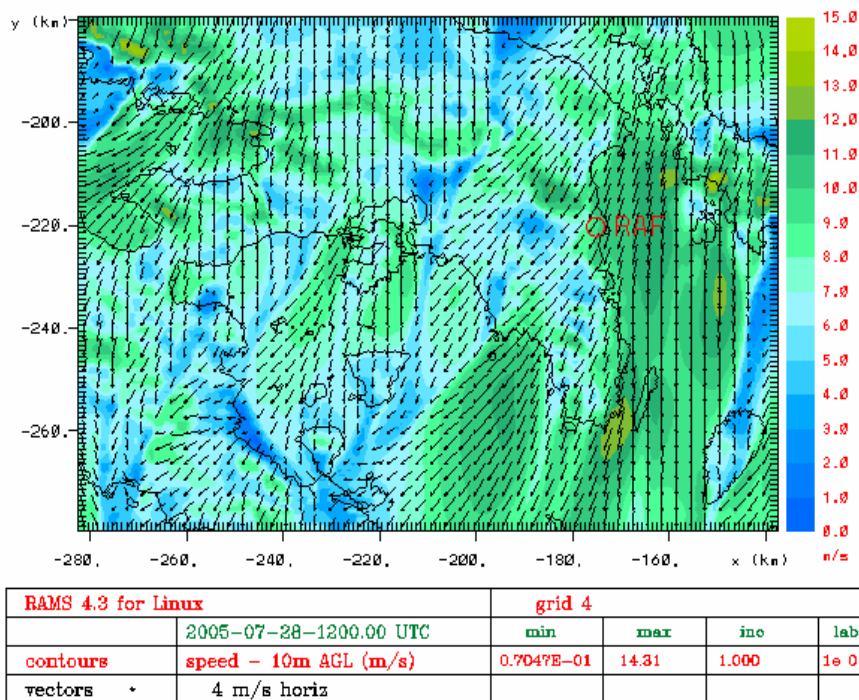
Σχήμα 7.5: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 07:00 UTC 28 Ιουλίου 2005



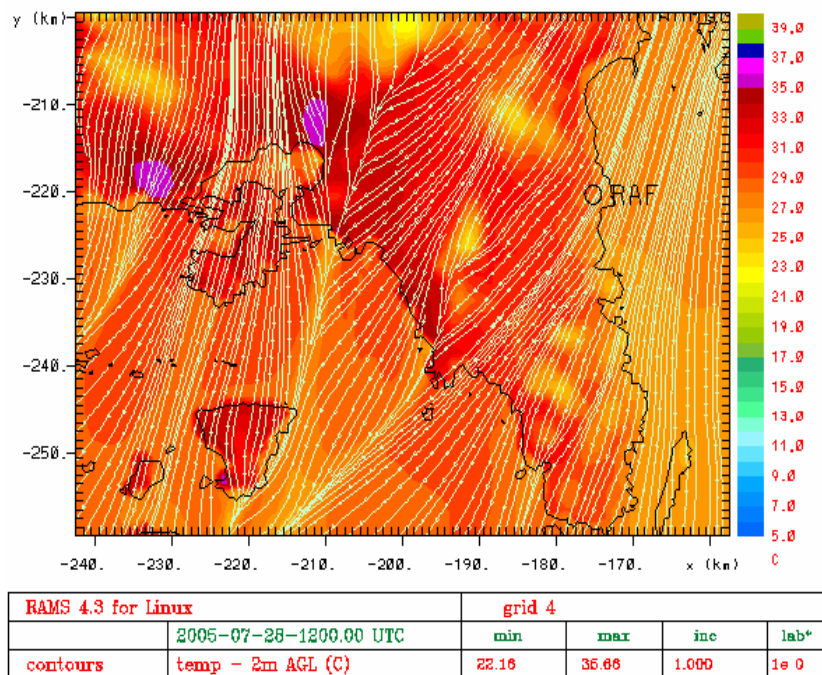
Σχήμα 7.6: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 10:00 UTC 28 Ιουλίου 2005



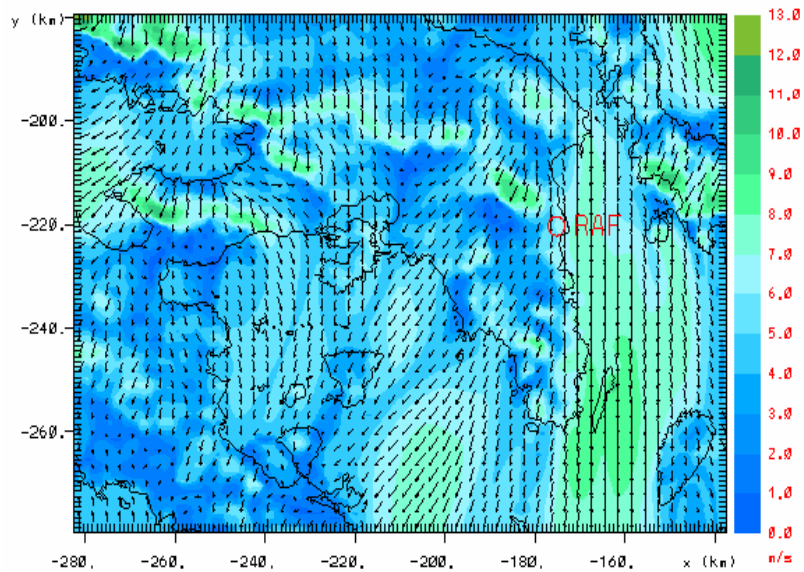
Σχήμα 7.7: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 10:00 UTC 28 Ιουλίου 2005



Σχήμα 7.8: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 28 Ιουλίου 2005

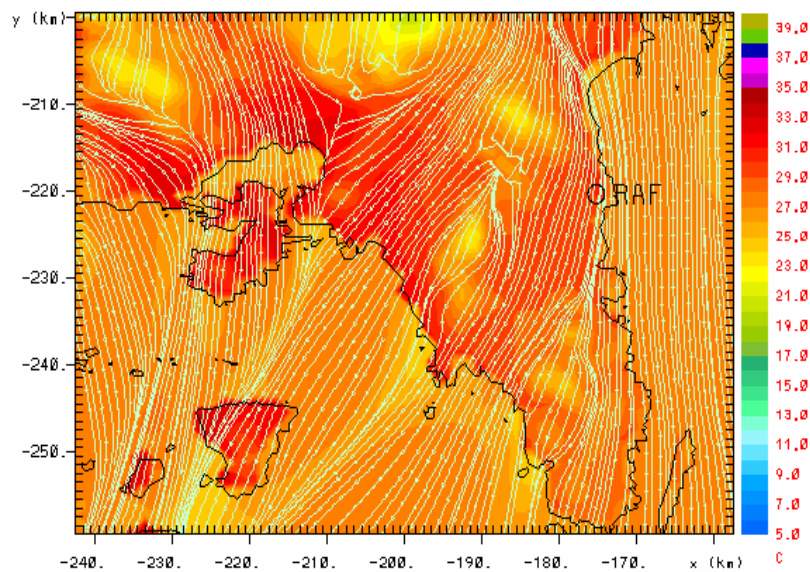


Σχήμα 7.9: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 28 Ιουλίου 2005



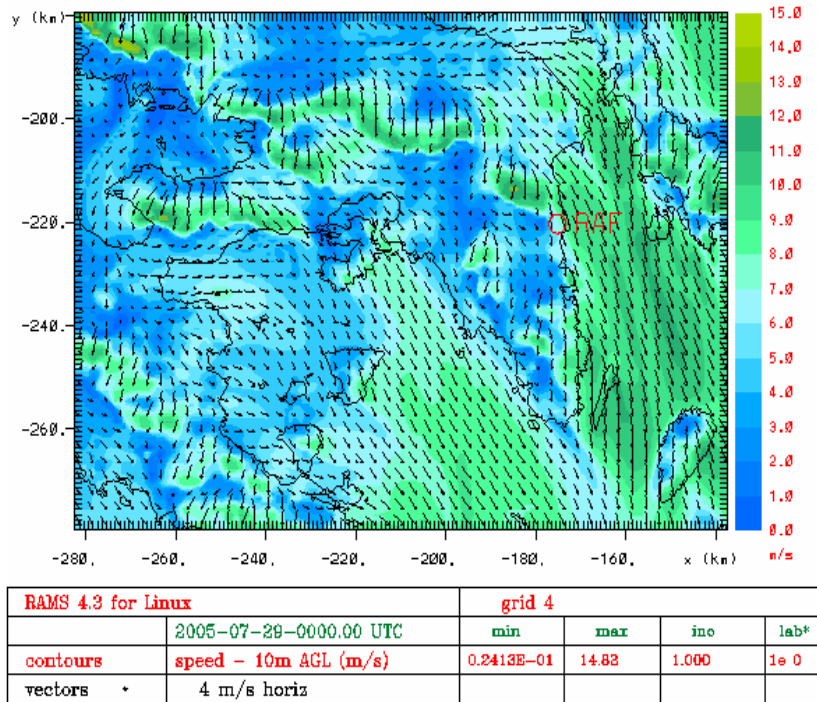
RAMS 4.3 for Linux		grid 4			
	2005-07-28-1800.00 UTC	min	max	inc	lab*
contours	speed - 10m AGL (m/s)	0.1770	12.74	1.000	1e 0
vectors	3 m/s horiz				

Σχήμα 7.10: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 18:00 UTC 28 Ιουλίου 2005

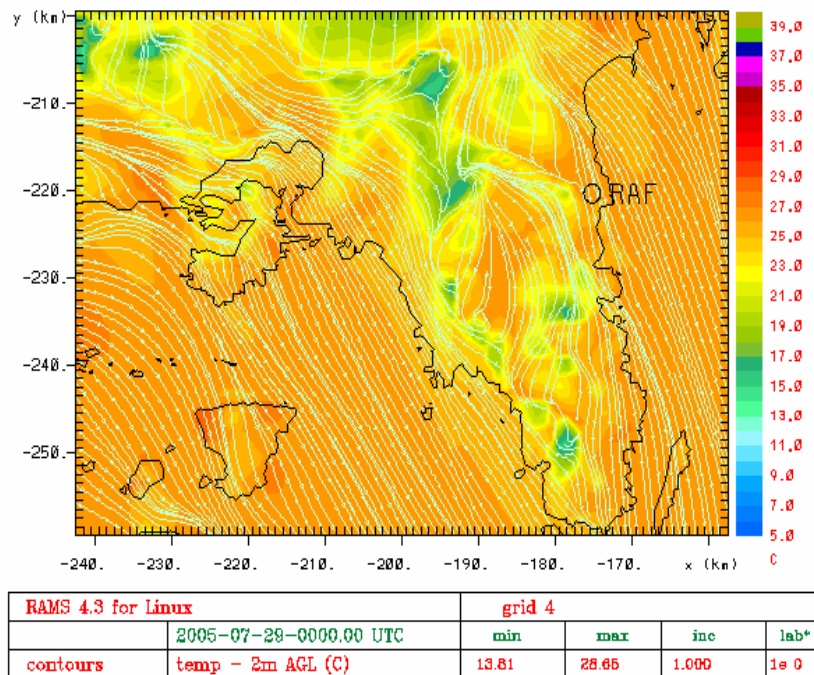


RAMS 4.3 for Linux		grid 4			
	2005-07-28-1800.00 UTC	min	max	inc	lab*
contours	temp - 2m AGL (C)	20.72	33.43	1.000	1e 0

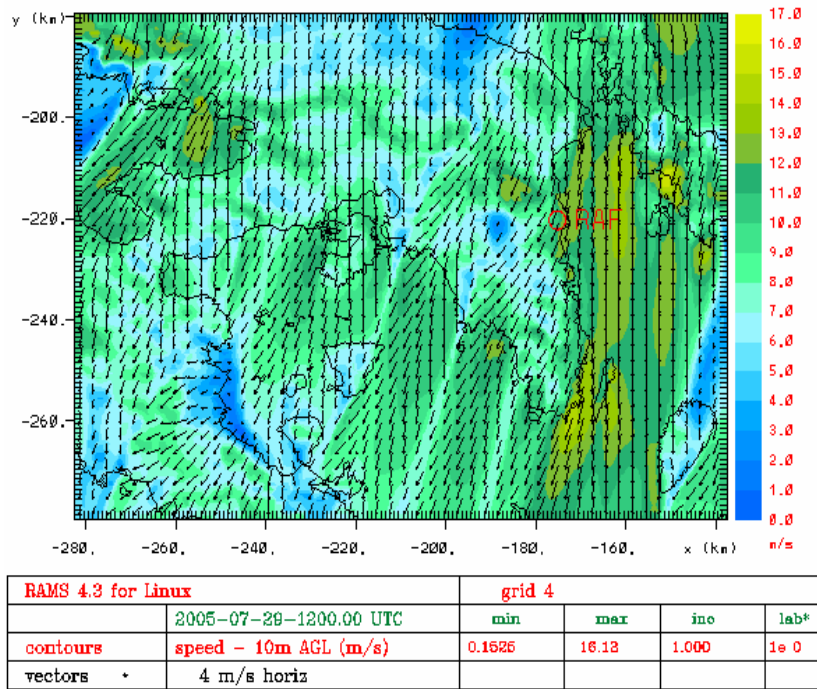
Σχήμα 7.11: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 18:00 UTC 28 Ιουλίου 2005



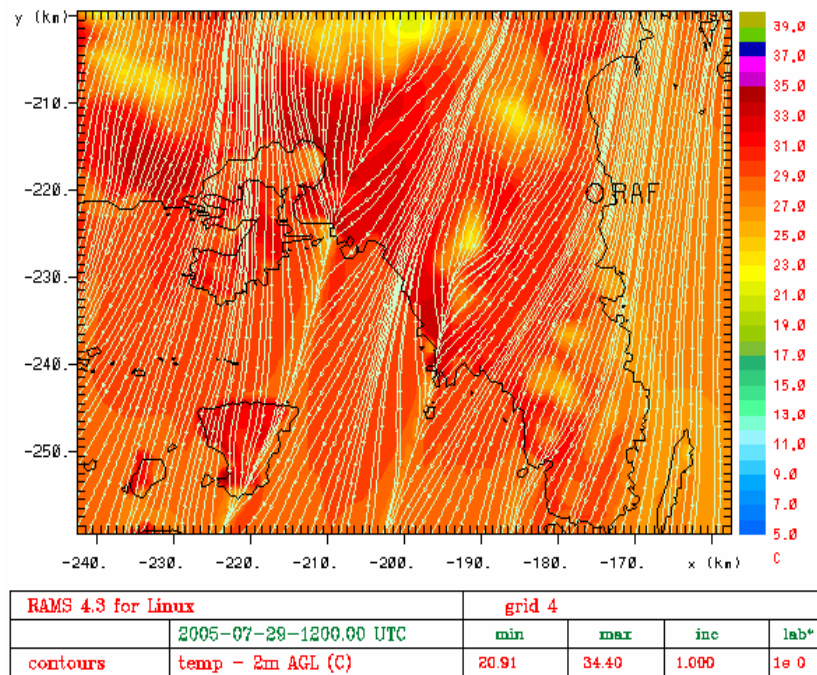
Σχήμα 7.12: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 00:00 UTC 29 Ιουλίου 2005



Σχήμα 7.13: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 00:00 UTC 29 Ιουλίου 2005



Σχήμα 7.14: Πεδίο ανέμου σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 29 Ιουλίου 2005



Σχήμα 7.15: Πεδίο θερμοκρασίας - ρευματογραμμών ανέμου σε ύψος 2 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους από το τέταρτο πλέγμα του RAMS στις 12:00 UTC 29 Ιουλίου 2005

7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MAGICC-SCENGEN

Για τη διερεύνηση του αν και πώς η κλιματική αλλαγή στον πλανήτη θα επηρεάσει τις καιρικές συνθήκες στη χώρα μας, χρησιμοποιήθηκε το κλιματικό μοντέλο MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change) και η βάση δεδομένων SCENGEN (SCENario GENerator). Αλλάζοντας τις διάφορες παραμέτρους του μοντέλου, όπως την ευαισθησία του κλίματος, το κλιματικό σενάριο, τη χρονική περίοδο ενδιαφέροντος και τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (GCM), που αποτελούν τη βάση δεδομένων SCENGEN, μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες, που αφορούν τις κλιματικές τάσεις της βροχόπτωσης, της νέφωσης, του ανέμου, της μέσης και της μέγιστης θερμοκρασίας στους θερμούς μήνες.

Τα πειράματα, τα οποία πραγματοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των κλιματικών τάσεων των μετεωρολογικών παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών για την περίοδο 2060 – 2089, είναι τα παρακάτω:

- Κλιματική προσομοίωση της περιόδου 1961-1990 (η οποία παγκοσμίως θεωρείται ως περίοδος αναφοράς).
- Κλιματική προσομοίωση της περιόδου 2060-2089 για το σενάριο IS92A της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel for Climate Change-IPCC 1992).
- Κλιματική προσομοίωση της περιόδου 2060-2089 για το σενάριο IS92C (IPCC 1992).

Η περίοδος 2060 – 2089 επιλέχθηκε ως κατάλληλη για να προσομοιωθούν οι πιθανές κλιματικές τάσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων, αφού βρίσκεται στα μέσα του δεύτερου μισού του 21^{ου} αιώνα. Τα σενάρια IS92A και IS92C, που χρησιμοποιήθηκαν για τις παραπάνω προγνώσεις, αφορούν τις αναμενόμενες αυξήσεις των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, κατά τα επόμενα 100 χρόνια. Τα σενάρια διαφέρουν στις παραδοχές της μεταβολής του πληθυσμού της υφελίου, της παγκοσμιοποίησης της οικονομίας και της διάδοσης της τεχνολογίας (Leggett et al. 1992). Στη συνέχεια, δίνονται τα αποτελέσματα των σεναρίων IS92A (Σχήμα 7.16) και IS92C (Σχήμα 7.17). Το IS92A είναι ένα μετριοπαθές προς δυσοίωνα σενάριο σε ό,τι αφορά την αύξηση των μελλοντικών εκπομπών. Παρατηρείται ότι στο σενάριο αυτό το CO₂ φτάνει στη τιμή των 20,40 Gt άνθρακα (C) το 2100 από την τιμή των 6,10 Gt C το 1990. Αντίθετα, το σενάριο IS92C είναι το πιο ευοίωνα σενάριο σχετικά με τις εκπομπές αυτές. Το CO₂ φτάνει στη τιμή των 4,80 Gt C το 2100 από την τιμή των 6,10 Gt C το 1990 (Σχήμα 7.17). Ας σημειωθεί, ότι οι κλιματικές προσομοιώσεις αποτελούν μια εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία, καθώς αφορούν «ολοκληρώσεις» διάρκειας 30 ετών και

παράγουν έναν τεράστιο όγκο δεδομένων. Στις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν τα εξής κλιματικά μοντέλα: HadCM2, UKTR, CSIRO-TR, ECHAM4, UKHI-EQ, CSIRO-EQ, ECHAM3, UIUC-EQ, CCC-EQ, GFDL-TR, BMRC-EQ, CGCM1-TR, NCAR-DOE και CCSR-NIES.

Εκείνο, όμως, που φαίνεται να έχει πολύ μεγάλη σημασία, ειδικότερα για την Ελλάδα, είναι η αύξηση των θερμοκρασιών το καλοκαίρι και συγκεκριμένα, οι κλιματικές προσομοιώσεις της μέσης και μέσης μέγιστης θερμοκρασίας των θερινών μηνών την περίοδο 2060-2089 για την χώρα μας, δείχνουν μια αύξηση της μέσης θερμοκρασίας περίπου 2,5°C - 3,5°C για το σενάριο IS92A και μια αύξηση της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας που προσεγγίζει τους 3,5°C (2,5 °C στην περιοχή μελέτης) και 1,5°C - 2°C για τα σενάρια IS92A και IS92C, αντίστοιχα (Σχήματα 7.18, 7.19, 7.20 και 7.21). Επίσης παρατηρείται μια μικρή μείωση της μέσης τιμής του ανέμου στη νότια Ελλάδα (- 2%) και μια ταυτόχρονη μικρή αύξηση στη Βόρεια Ελλάδα και τα νησιά (+ 2%) και για τα δύο σενάρια (Σχήματα 7.22 και 7.23). Τέλος, όσον αναφορά τη βροχόπτωση και πιο συγκεκριμένα, την αλλαγή του υδρολογικού κύκλου, τα πρώτα στοιχεία μας δείχνουν ότι τους καλοκαιρινούς μήνες θα έχουμε μείωση της μέσης βροχόπτωσης κατά 20% έως 40% κατά μέσο όρο (Ηλιόπουλος κ.α. 2010) (Σχήματα 7.24 και 7.25).

Αυτό σημαίνει, για την περιοχή μας, ότι αυξάνεται σημαντικά ο κίνδυνος των καταστρεπτικών πυρκαγιών το καλοκαίρι. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών, αν δεν κάνουμε σωστή αρδευτική χρήση, το πρόβλημα της λειψυδρίας θα εντείνεται ενώ το φαινόμενο της ερημοποίησης είναι προ των πυλών σε πολλές περιοχές της χώρας μας.

76 Edit emissions scenario "IS92A"

Description: IPCC emissions scenario 92a

New row		Fos. CO2 (Gt C)	Def. CO2 (Gt C)	CH4 (Tg CH4)	N2O (Tg N)	NAM-EUR	ASIA SO2 (Tg S)	RoW
Copy	Del 1990	6.10	1.30	506.0	12.90	0.0	0.0	0.0
Paste	Del 1995	6.60	1.30	525.0	13.30	-2.026	0.895	2.756
	Del 2000	7.10	1.30	545.0	13.80	-4.109	1.761	5.743
	Del 2005	7.94	1.26	568.0	14.10	-3.075	3.441	9.5
	Del 2010	8.68	1.22	588.0	14.50	-2.313	5.287	13.878
	Del 2015	9.42	1.18	611.0	14.90	-1.584	7.409	18.154
Help	Del 2020	10.26	1.14	632.0	15.40	-1.024	9.952	24.407
Print	Del 2025	11.10	1.10	659.0	15.80	-0.565	12.706	31.047
Save	Del 2050	13.70	0.80	785.0	16.60	-2.330	23.730	55.556
Cancel	Del 2075	16.15	0.15	845.0	16.70	-5.915	21.452	59.955
	Del 2100	20.40	-0.10	917.0	17.00	-8.328	23.339	55.596

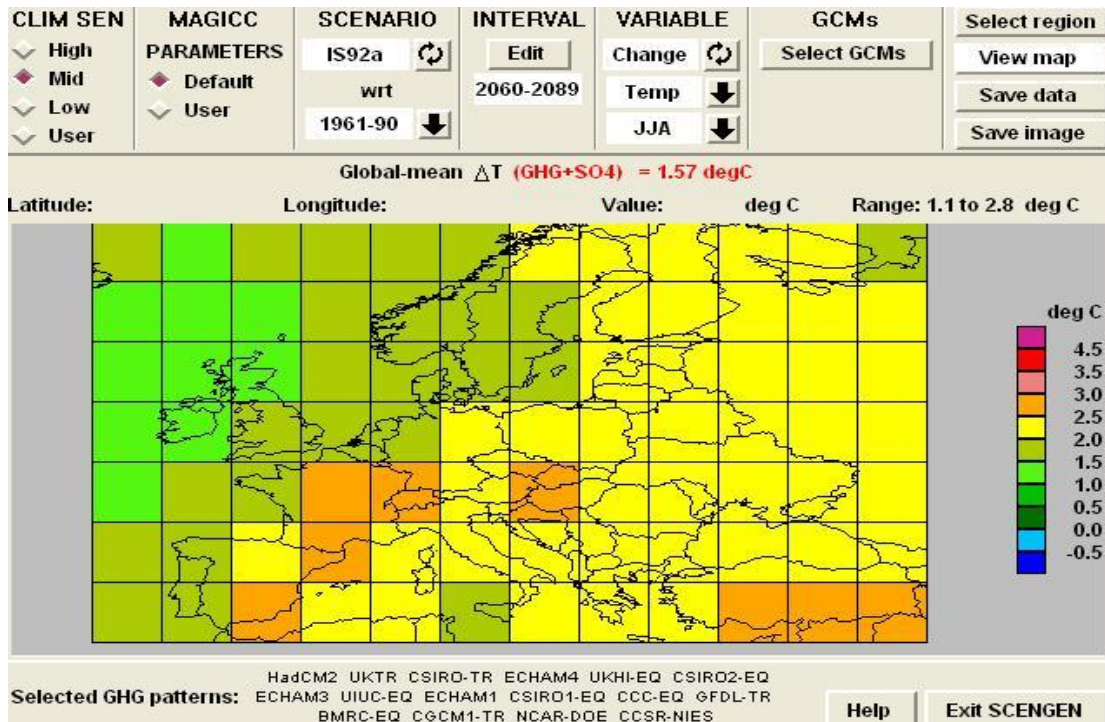
Σχήμα 7.16: Κλιματικό σενάριο IS92A που αφορά στις αναμενόμενες αυξήσεις των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά τα επόμενα 100 χρόνια. Από αριστερά προς τα δεξιά εμφανίζονται ο άνθρακας (C) που προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα και από τις χρήσεις γης, το μεθάνιο (CH₄), το μονοξείδιο του αζώτου (N₂O), και το διοξείδιο του θείου (SO₂) στη βόρεια Αμερική και Ευρώπη, στην Ασία και στον υπόλοιπο κόσμο

76 Edit emissions scenario "IS92C"

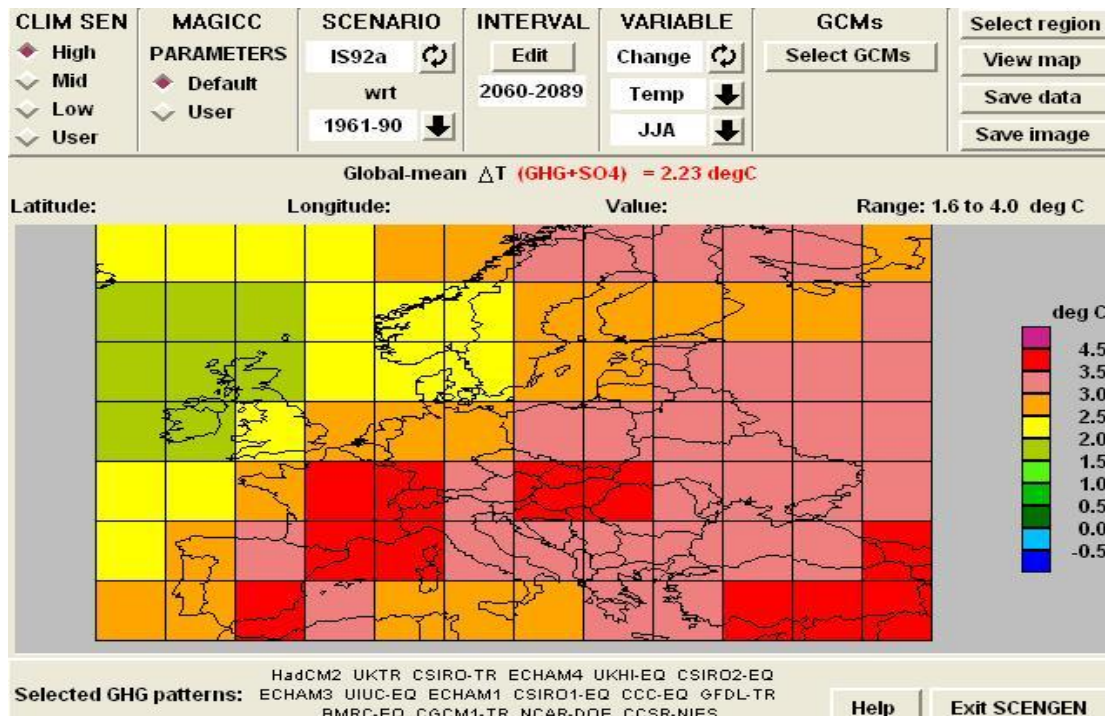
Description: IPCC emissions scenario 92c

New row		Fos. CO2 (Gt C)	Def. CO2 (Gt C)	CH4 (Tg CH4)	N2O (Tg N)	NAM-EUR	ASIA SO2 (Tg S)	RoW
Copy	Del 1990	6.10	1.30	506.0	12.90	0.0	0.0	0.0
Paste	Del 1995	5.90	1.30	510.0	13.10	-3.060	-0.520	0.506
	Del 2000	6.20	1.30	526.0	13.60	-5.307	-0.278	2.131
	Del 2005	6.50	1.30	540.0	13.80	-5.107	0.358	4.145
	Del 2010	6.90	1.20	551.0	14.10	-5.005	1.215	6.799
	Del 2015	7.10	1.20	563.0	14.40	-4.887	2.009	9.678
Help	Del 2020	7.40	1.10	574.0	14.70	-4.642	2.889	13.094
Print	Del 2025	7.70	1.10	589.0	15.00	-4.464	3.827	17.381
Save	Del 2050	6.80	0.70	613.0	15.00	-8.156	3.881	20.401
Cancel	Del 2075	5.30	0.30	584.0	14.20	-19.816	-1.995	16.378
	Del 2100	4.80	-0.20	546.0	13.70	-25.979	-4.848	9.335

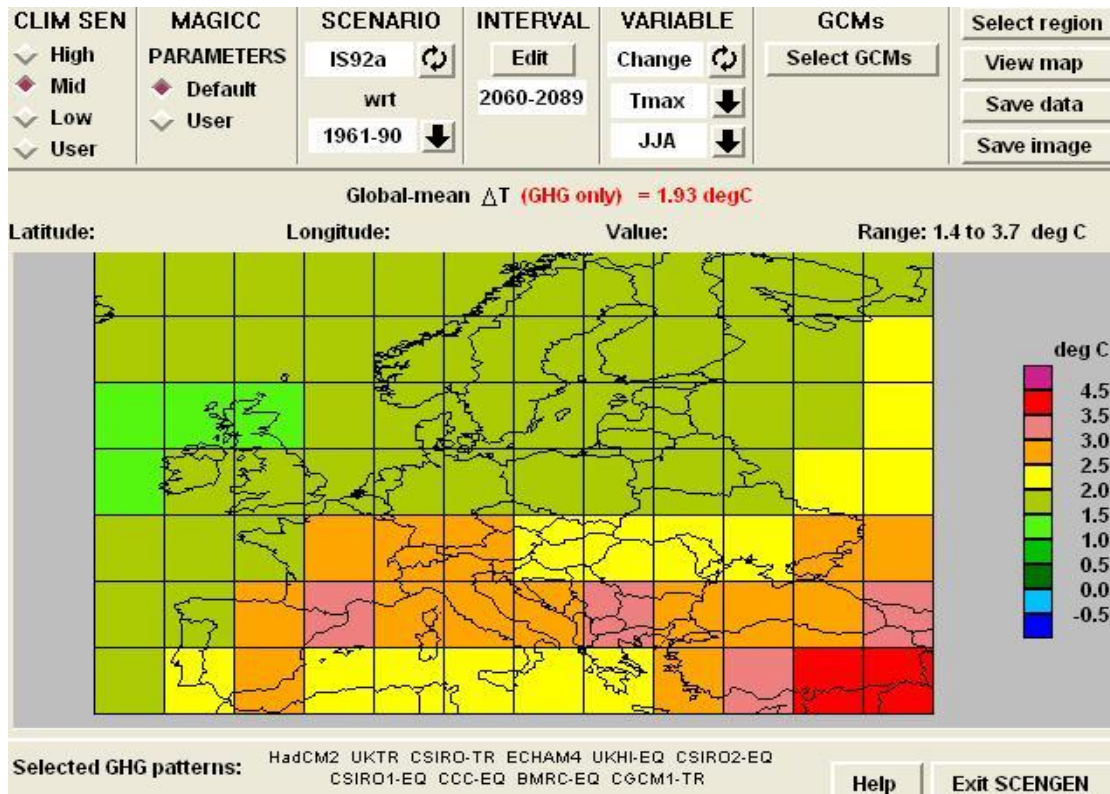
Σχήμα 7.17: Κλιματικό σενάριο IS92C που αφορά στις αναμενόμενες αυξήσεις των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά τα επόμενα 100 χρόνια. Από αριστερά προς τα δεξιά εμφανίζονται ο άνθρακας (C) που προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα και από τις χρήσεις γης, το μεθάνιο (CH₄), το μονοξείδιο του αζώτου (N₂O), και το διοξείδιο του θείου (SO₂) στη βόρεια Αμερική και Ευρώπη, στην Ασία και στον υπόλοιπο κόσμο



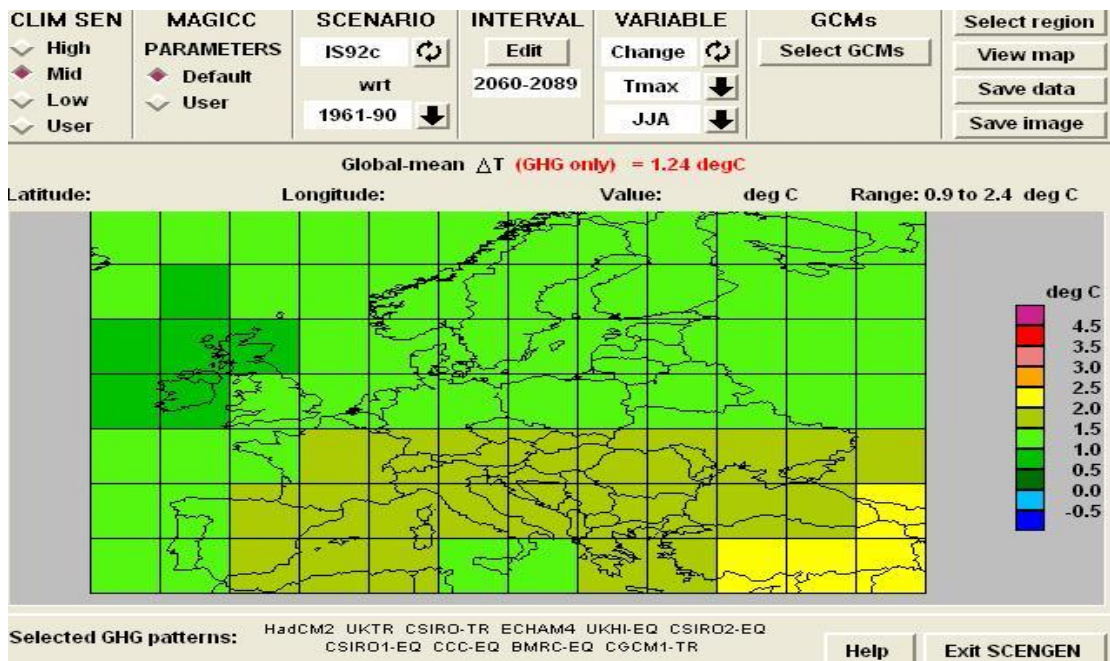
Σχήμα 7.18:Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας της θερινής περιόδου, που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92A με μέση ευαισθησία κλίματος



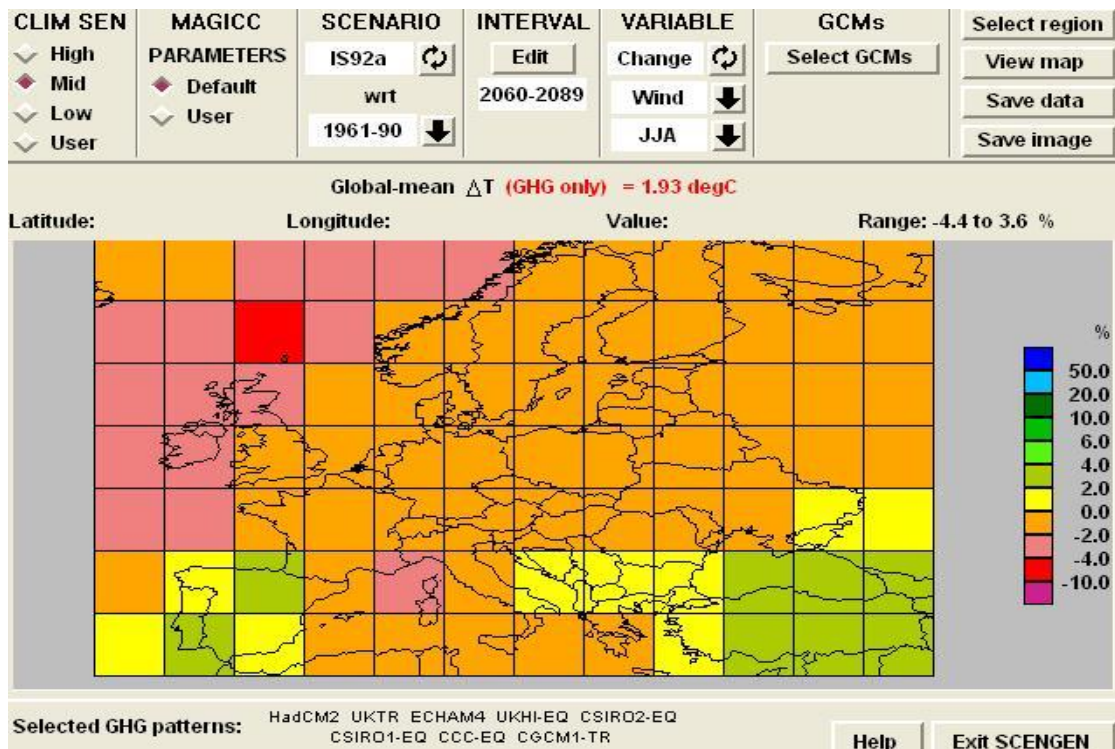
Σχήμα 7.19:Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης θερμοκρασίας της θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92A με υψηλή ευαισθησία κλίματος



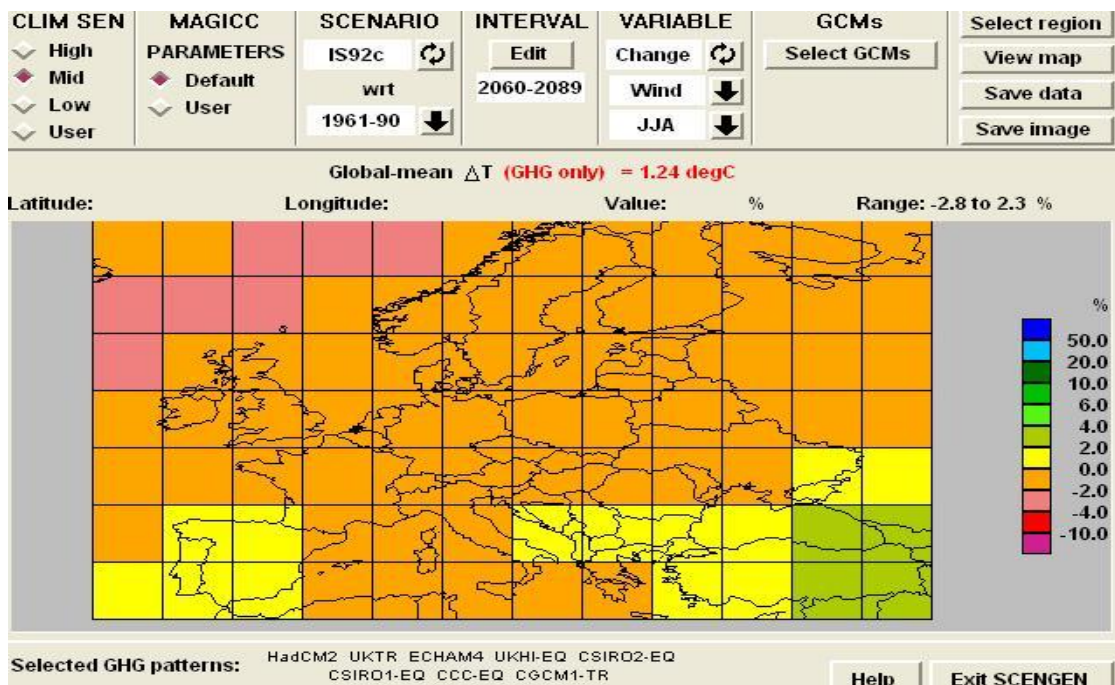
Σχήμα 7.20:Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας της θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92A με μέση ευαισθησία κλίματος



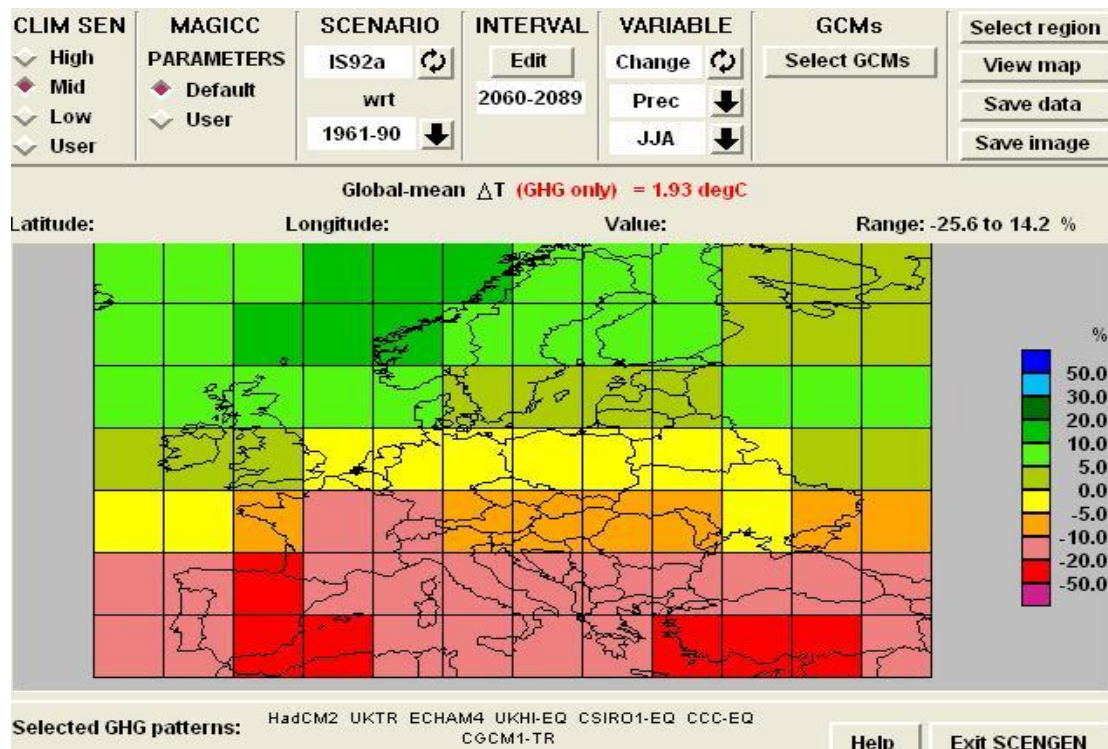
Σχήμα 7.21:Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας της θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92C με μέση ευαισθησία κλίματος



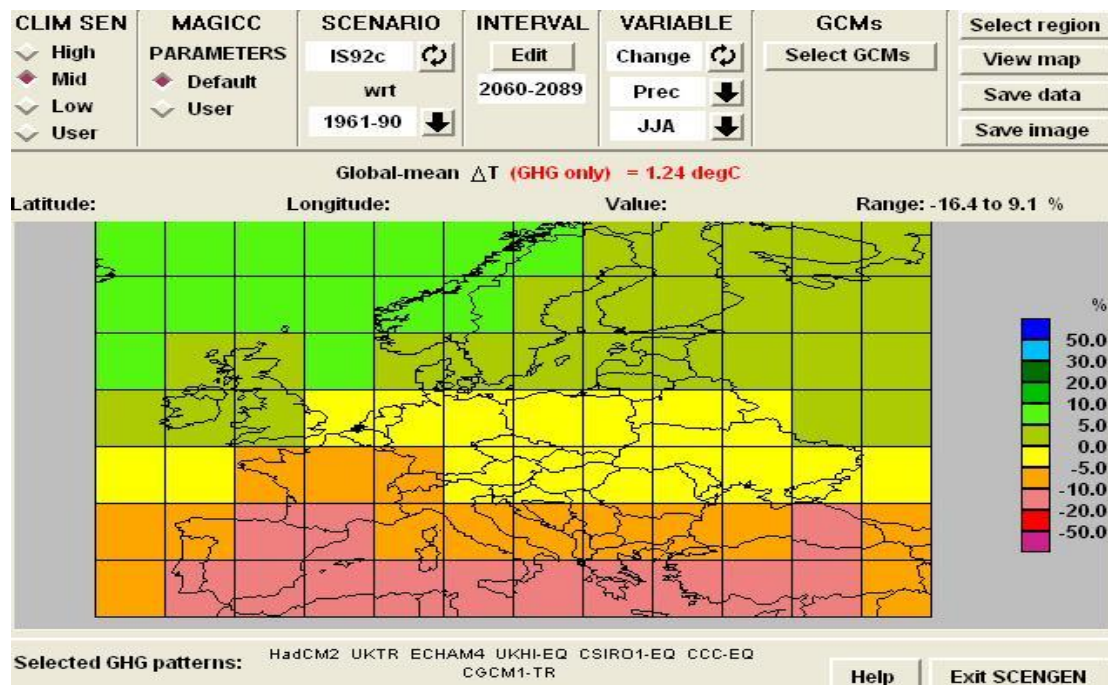
Σχήμα 7.22: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής του μέσου ανέμου θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92A με μέση ευαισθησία κλίματος



Σχήμα 7.23: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής του μέσου ανέμου θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92C με μέση ευαισθησία κλίματος



Σχήμα 7.24: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης βροχόπτωσης θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92A με μέση ευαισθησία κλίματος

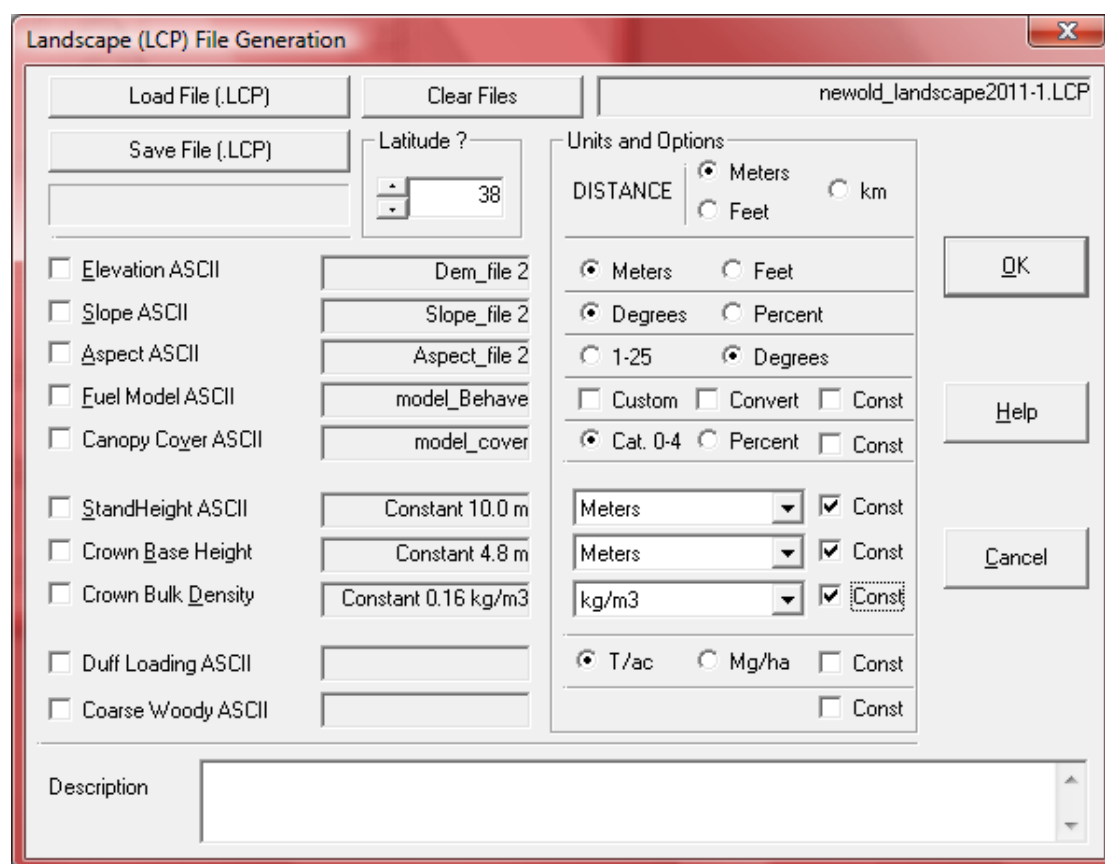


Σχήμα 7.25: Κλιματική προσομοίωση της μεταβολής της μέσης βροχόπτωσης θερινής περιόδου που αφορά την περίοδο 2060-2089, σε σχέση με την περίοδο 1961-90 για το σενάριο IS92C με μέση ευαισθησία κλίματος

7.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ FARSITE

7.3.1 Προσομοίωση Πυρκαγιών με τη Βλάστηση του 1991

Στην προσπάθεια προσομοίωσης με το μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE, των δύο πυρκαγιών που ξέσπασαν στις 28 Ιουλίου του 2005, στη Ραφήνα και στο Νέο Βουτζά χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως βλάστηση η αντιστοίχιση των μοντέλων καύσιμης ύλης με τη βλάστηση του ορθοφωτοχάρτη των χρήσεων γης του 1991. Στο μοντέλο FARSITE εισήχθησαν το υψόμετρο η έκθεση και η κλίση (Σχήματα 6.10, 6.11 και 6.12) και στη συνέχεια τα μοντέλα καύσιμης ύλης μέσω της ψηφιοποίησης του ορθοφωτοχάρτη των χρήσεων γης του 1991 και της αντιστοίχισης με τα μοντέλα του Anderson (1982) που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Η κάλυψη φυλλοστρώματος προέκυψε από τον Πίνακα 6.2. Το αρχείο περιγραφής τοπίου (landscape file) που δημιουργήθηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.26. Το αρχείο της υγρασίας της νεκρής καύσιμης ύλης προέκυψε ύστερα από μέτρηση από το Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών και παρουσιάζεται στον Πίνακα 7.1, ενώ τα αρχεία καιρού και ανέμου που αφορούν την περίοδο 26-30 Ιουλίου του 2005 προέρχονται από τον Μετεωρολογικό Σταθμό του Ελ. Βενιζέλου και παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.2 και 7.3 αντίστοιχα.



Σχήμα 7.26: Το αρχείο περιγραφής τοπίου της περιοχής ενδιαφέροντος με τη βλάστηση του 1991

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 1h X.Y. (%)	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 10h X.Y. (%)	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 100h X.Y. (%)	Υγρασία Ζωντανής Ποώδους (LH) Καύσιμης Ύλης (%)	Υγρασία Ζωντανής Ξυλώδους (LW) Καύσιμης Ύλης (%)
2	5	6	10	100	100
7	5	6	10	100	100
8	5	6	10	100	100
10	5	6	10	100	100
122	5	6	10	100	100
161	5	6	10	100	100
164	5	6	10	100	100
2 (Corine)	5	6	10	100	100
7 (Corine)	5	6	10	100	100
8 (Corine)	5	6	10	100	100
10(Corine)	5	6	10	100	100

Πίνακας 7.1: Οι υγρασίες (%) της νεκρής καύσιμης ύλης (1h, 10h, 100h), της ζωντανής ποώδους (LH) και της ζωντανής ξυλώδους (LW) για κάθε ένα από τα μοντέλα καύσιμης ύλης της περιοχής ενδιαφέροντος

Μήνας	Ημέρα	Βροχόπτωση (mm)	Ωρα Tmin	Ωρα Tmax	Tmin (°F)	Tmax (°F)	Μέγιστη Σχετ. Υγρασία (%)	Ελάχιστη Σχετ. Υγρασία (%)	Υψόμετρο (ft)
7	26	0	01:00	15:00	72	90	61	29	450
7	27	0	06:00	15:00	75	91	50	23	450
7	28	0	06:30	16:00	75	86	53	27	450
7	29	0	07:00	18:30	77	88	57	37	450
7	30	0	07:00	16:30	79	88	48	29	450

Πίνακας 7.2: Τα αρχείο καιρού από τις 26-30 Ιουλίου του 2005 όπου παρουσιάζονται ο μήνας, η ημέρα, η βροχόπτωση (mm), η τοπική ώρα της ελάχιστης θερμοκρασίας, η τοπική ώρα της μέγιστης θερμοκρασίας, η ελάχιστη θερμοκρασία (Φαρενάιτ), η μέγιστη θερμοκρασία (Φαρενάιτ), η μέγιστη σχετική υγρασία (%), η ελάχιστη σχετική υγρασία και το υψόμετρο (ft). Τα μετεωρολογικά στοιχεία προέρχονται από τον Μετεωρολογικό Σταθμό του Ελ. Βενιζέλου και είναι στις μονάδες που απαιτούνται για την εισαγωγή τους στο FARSITE

Αρχείο Ανέμου					
Μήνας	Ημέρα	Τοπική Ώρα	Ταχύτητα Ανέμου (km/h)	Διεύθυνση Ανέμου (Μοίρες)	Νεφοκάλυψη (%)
7	28	06:00	16	1	0
7	28	07:00	8	30	0
7	28	08:00	16	15	0
7	28	09:00	20	5	0
7	28	10:00	32	1	0
7	28	11:00	36	5	0
7	28	12:00	40	10	0
7	28	13:00	40	25	0
7	28	14:00	40	22	0
7	28	15:00	42	24	0
7	28	16:00	41	30	0
7	28	17:00	39	30	0
7	28	18:00	42	25	0
7	28	19:00	36	20	0
7	28	20:00	31	5	0
7	28	21:00	29	2	0

Πίνακας 7.3: Τα αρχείο ανέμου όπου παρουσιάζονται ο μήνας, η ημέρα, η τοπική ώρα, η ταχύτητα του ανέμου (km/h), η διεύθυνση του ανέμου (μοίρες) και η νεφοκάλυψη (%) από τον Μετεωρολογικό Σταθμό του Ελ. Βενιζέλου

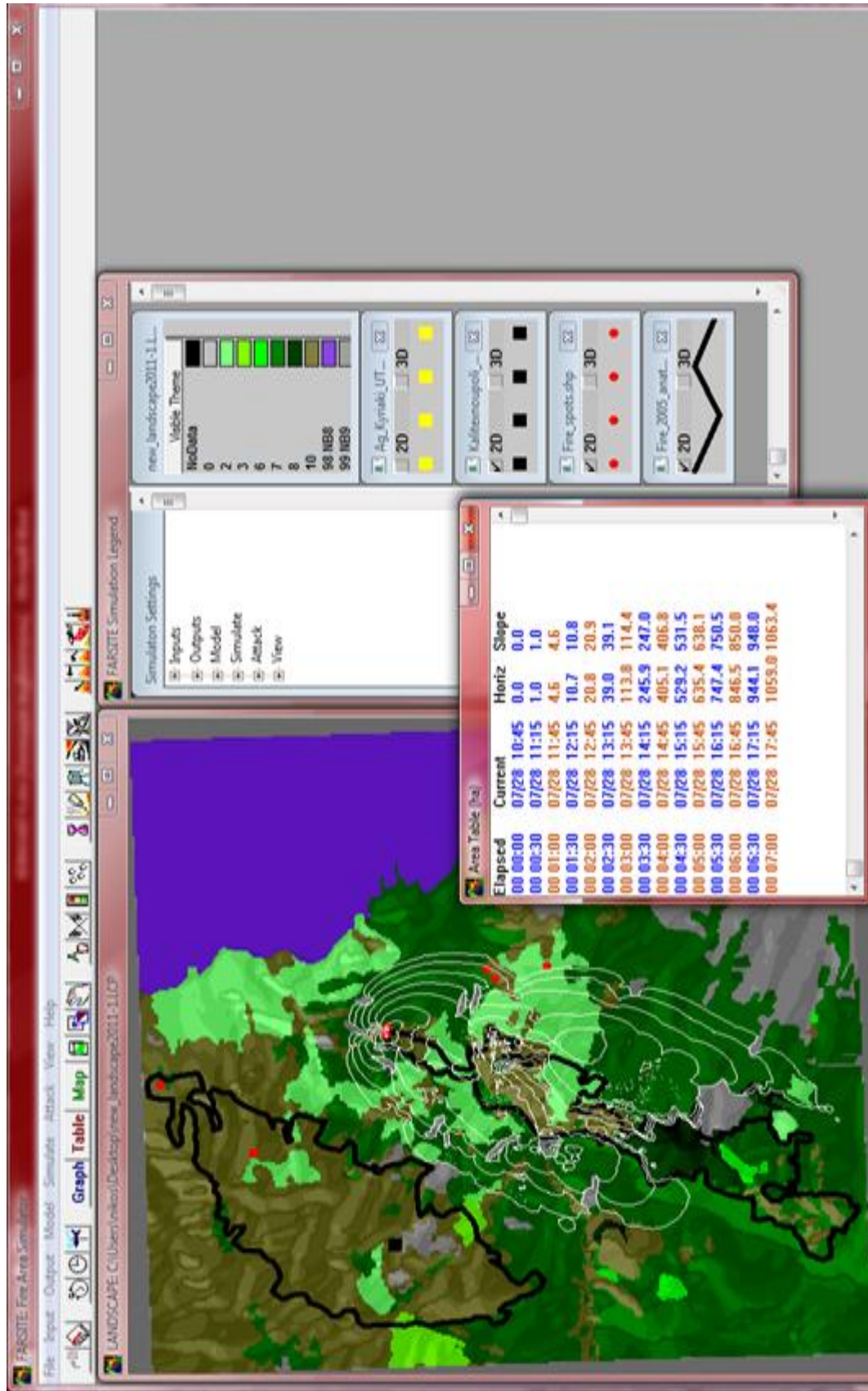
Προσομοιώθηκαν οι πυρκαγιές στη Ραφήνα (από 28/7/2005 στις 10:45 έως 28/7/2005 στις 18:00) και στο Νέο Βουτζά (από 28/7/2005 στις 13:25 έως 28/7/2005 στις 20:00) χρησιμοποιώντας χρονικό βήμα ανάλυσης τα 30 min, βήμα οπτικοποίησης περιμέτρων ανά μια ώρα, ανάλυση περιμέτρου τα 60 m, ανάλυση απόστασης εξάπλωσης τα 30 m και επιλέχθηκε η δυνατότητα δημιουργίας και ανάπτυξης πυρκαγιάς κόμης.

Στο Σχήμα 7.27 όπως και στα επόμενα σχήματα, εμφανίζονται τα μοντέλα καύσιμης ύλης με χρωματισμούς του πράσινου, τα σημεία που βρέθηκαν οι ενάρξεις των πυρκαγιών με κόκκινες βούλες και η οριογραμμή της πραγματικής καμένης έκτασης των δύο πυρκαγιών στη Ραφήνα και στο Νέο Βουτζά στις 28 Ιουλίου του 2005 με μαύρο έντονο χρώμα. Η καμένη έκταση δίδεται από τους πίνακες των παρακάτω σχημάτων. Οι τιμές της ταχύτητας μετώπου και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας υπολογίζονται από το διάγραμμα χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς.

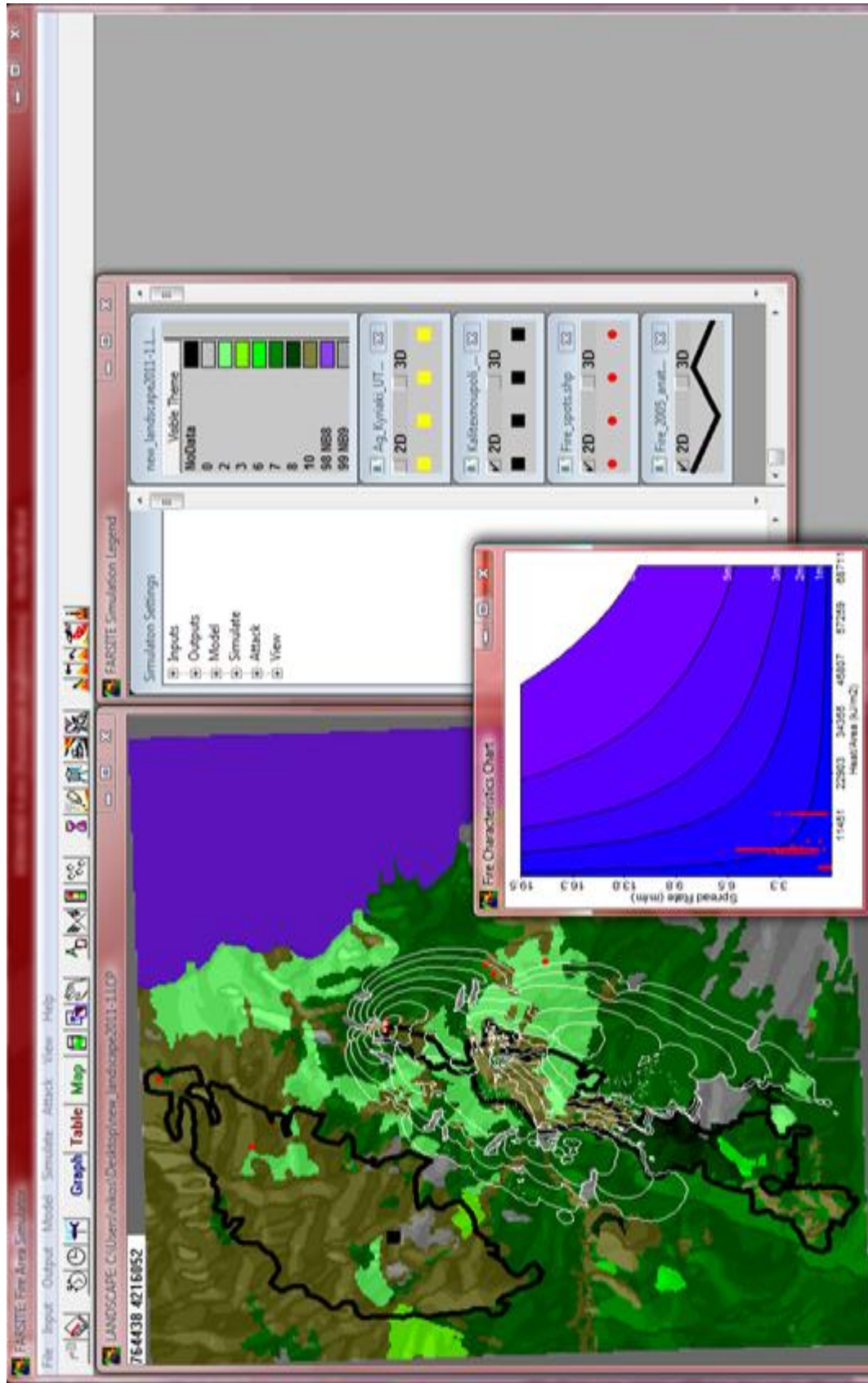
Το FARSITE προσομοίωσε την πυρκαγιά στη Ραφήνα (Σχήματα 7.27 και 7.28) και την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά (Σχήμα 7.29). Η πυρκαγιά στη Ραφήνα προσομοιώθηκε σύμφωνα με τη βλάστηση του 1991, με αποτέλεσμα να διαφοροποιηθεί ως προς την πραγματική καμένη έκταση (περίπου τριπλασιάστηκε η καμένη έκταση) αφού κινήθηκε περισσότερο πλευρικά λόγω της ύπαρξης πυκνής καύσιμης ύλης που στην πραγματική πυρκαγιά του 2005 δεν υπήρχε (Σχήματα 6.4 και 7.27). Η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά προσομοιώθηκε σύμφωνα με τη βλάστηση του 1991, με υποεκτίμηση στην καμένη έκταση

(περίπου 40% μικρότερη) σε σχέση με την πραγματική καμένη του 2005. Η καύσιμη ύλη στην περιοχή της πυρκαγιάς του Νέου Βουτζά το 1991 είχε μεγαλύτερη πυκνότητα σε σχέση με την καύσιμη ύλη το 2005, οπότε είχαν προηγηθεί οι μεγάλες πυρκαγιές της Πεντέλης το 1995 και το 1998. Επομένως, η μεγαλύτερη πυκνότητα καύσιμης ύλης που υπήρχε το 1991, οδήγησε σε μικρότερη προβλεπόμενη ταχύτητα της πυρκαγιάς και παράλληλα την καμένη έκταση.

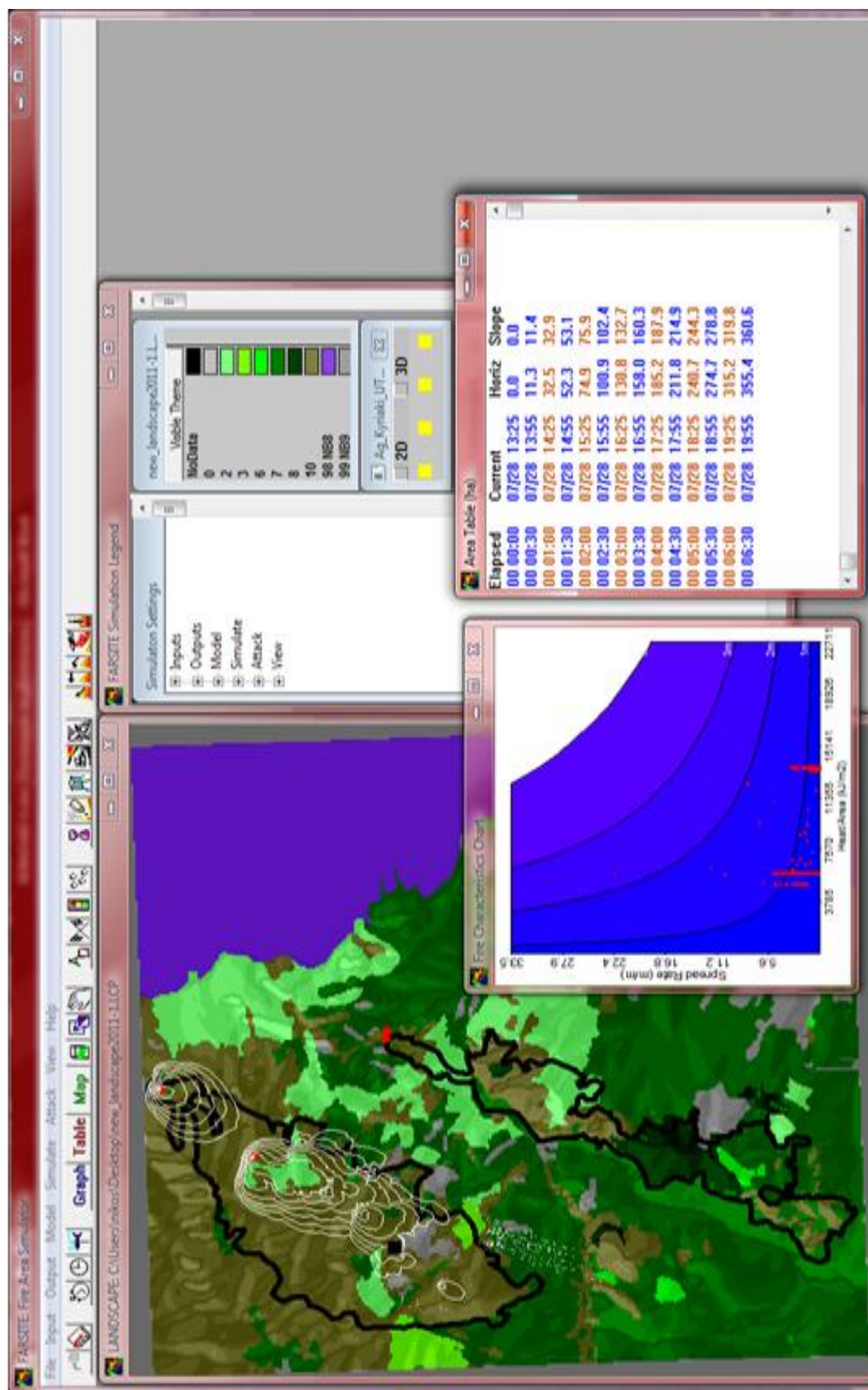
Η ταχύτητα της πυρκαγιάς και η θερμότητα που εκλύεται από την καύση υπολογίζονται από το διάγραμμα χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς το οποίο απεικονίζει τη δυσκολία καταστολής και δίνει τα όρια για τις προσπάθειες ελέγχου της πυρκαγιάς, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις δυνάμεις πυρόσβεσης (Σχήμα 3.2). Οι τιμές της ταχύτητας μετώπου και της εκλυόμενης θερμότητας έχουν άμεση συσχέτιση με την καμένη έκταση μιας πυρκαγιάς και υπολογίζονται για όλα τα τεστ και τα σενάρια που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια γιατί αποτελούν δείκτες για το βαθμό επικινδυνότητας και ακραίας συμπεριφοράς μιας δασικής πυρκαγιάς.



Σχήμα 7.27: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς της Ραφίνας με τη βλάστηση του 1991 και ο πίνακας καμένης έκτασης (εκτάρια) / οριογραμμή πραγματικής καμένης έκτασης (μαύρη γραμμή) και σημεία έναρξης πυρκαγιών (κόκκινα σημεία)



Σχήμα 7.28: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς της Ραφήνας με τη βλάστηση του 1991 και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλύμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)



Σχήμα 7.29: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς του Νέου Βουτζά με τη βλάστηση του 1991 και καμένη έκταση (ha), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)

7.3.2 Προσομοίωση Πυρκαγιών στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα Σύμφωνα με τα 2,7,8 και 10 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης – Τεστ 1

Το FARSITE για να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα σε κάποια περιοχή ενδιαφέροντος θα πρέπει να βαθμονομηθεί. Πρέπει δηλαδή να βρεθούν εκείνα τα μοντέλα βλάστησης που αντιπροσωπεύουν καλύτερα την καύσιμη ύλη στην περιοχή ενδιαφέροντος με δεδομένο τη γνώση των μετεωρολογικών συνθηκών και της τοπογραφίας. Ο χάρτης βλάστησης του 1991 και η αντιστοίχιση που έγινε στα μοντέλα καύσιμης ύλης υπερεκτίμησαν την καμένη έκταση στην πυρκαγιά της Ραφήνας (Σχήμα 7.28) και υποεκτίμησαν την καμένη έκταση στην πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά (Σχήμα 7.29). Επίσης, ύστερα από έρευνα στο πεδίο διαπιστώθηκε ότι η βλάστηση που απεικονίζεται στο χάρτη του 1991 δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική βλάστηση του 2005. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, έγιναν δοκιμές (Τεστ) χρησιμοποιώντας μοντέλα βλάστησης που προέκυψαν από φωτοερμηνεία της περιοχής μελέτης με χρήση της δορυφορικής εικόνας Quickbird του 2004. Στην περίπτωση που εξετάζεται προσομοιώθηκαν οι πυρκαγιές του Νέου Βουτζά και της Ραφήνας το 2005 με τα μοντέλα βλάστησης 2, 7, 8 και 10 (Anderson 1982) (Πίνακας 7.4 - Σχήμα 7.30).

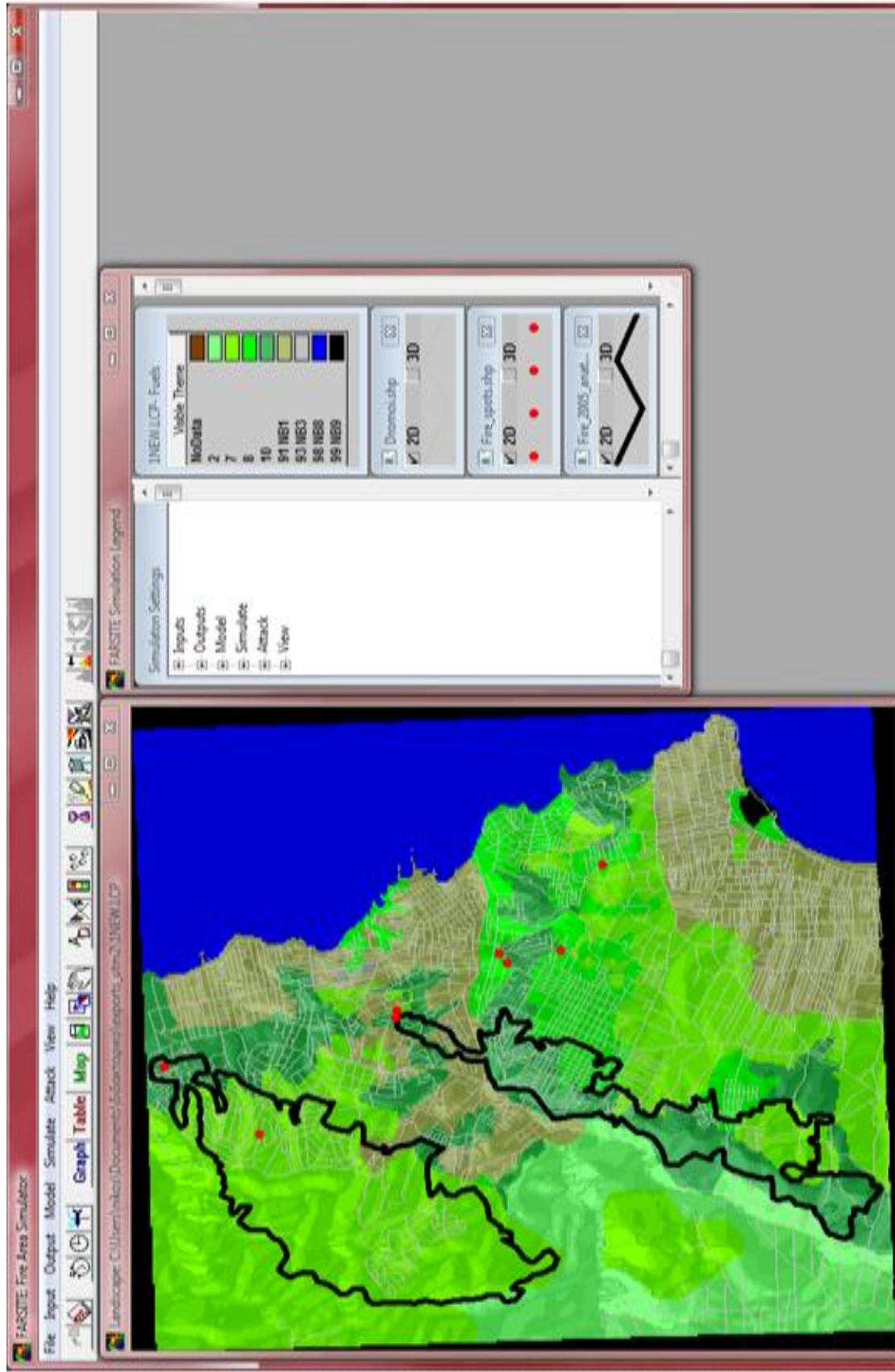
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά με καμένη έκταση περίπου τα 820 ha (8200 στρέμματα) (Σχήματα 7.31α και 7.31β). Παρατηρείται ότι η προσομοίωση σε αυτή την περίπτωση κάλυψε σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματική καμένη έκταση. Επομένως, τα μοντέλα καύσιμης ύλης που χρησιμοποιήθηκαν στο Τεστ 1 φαίνεται να ανταποκρίνονται στις φυσικοχημικές ιδιότητες της πραγματικής βλάστησης. Ο μη συμμετρικός στατιστικός δείκτης Sørensen (SC) στο τέλος των τεστ, θα μας καταδείξει πιο σετ μοντέλων βλάστησης είναι κατάλληλο για κάθε μια από τις δύο πυρκαγιές μελέτης.

Μοντέλο καύσιμης ύλης	Αντιστοίχιση
2	Δασολίβαδα
7	Θαμνότοποι μερικώς δασοσκεπείς
8	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
10	Σύμπικνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
91,93,98 και 99	Μηδενική κάλυψη

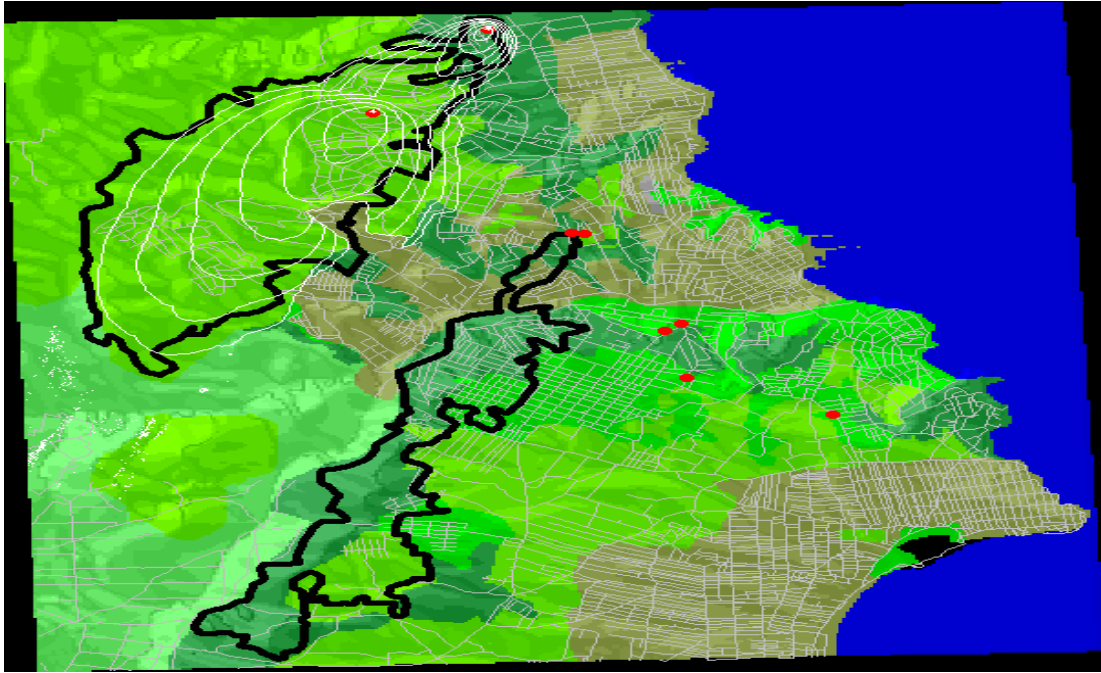
Πίνακας 7.4: Αντιστοίχιση βλάστησης της περιοχής μελέτης με μοντέλα καύσιμης ύλης –Τεστ 1

Το FARSITE προσομοίωσε την πυρκαγιά στη Ραφήνα για το Τεστ 1. Προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στη Ραφήνα με καμένη έκταση τα 140 ha (1400 στρέμματα)

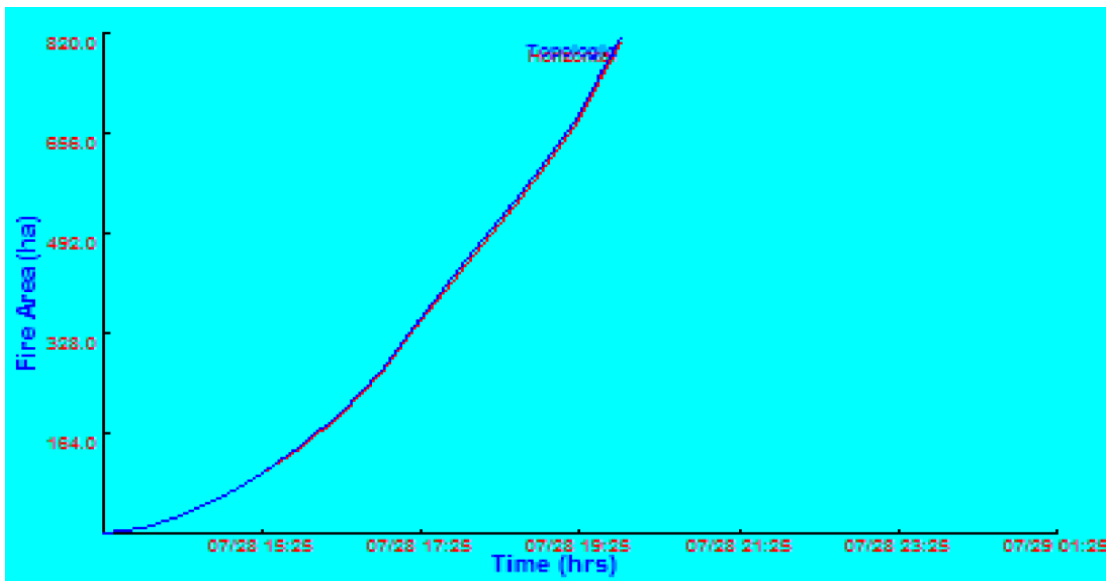
(Σχήματα 7.32α και 7.32β). Παρατηρείται ότι η προσομοιωμένη καμένη έκταση κάλυψε μόνο το βόρειο τμήμα της πραγματικής καμένης έκτασης.



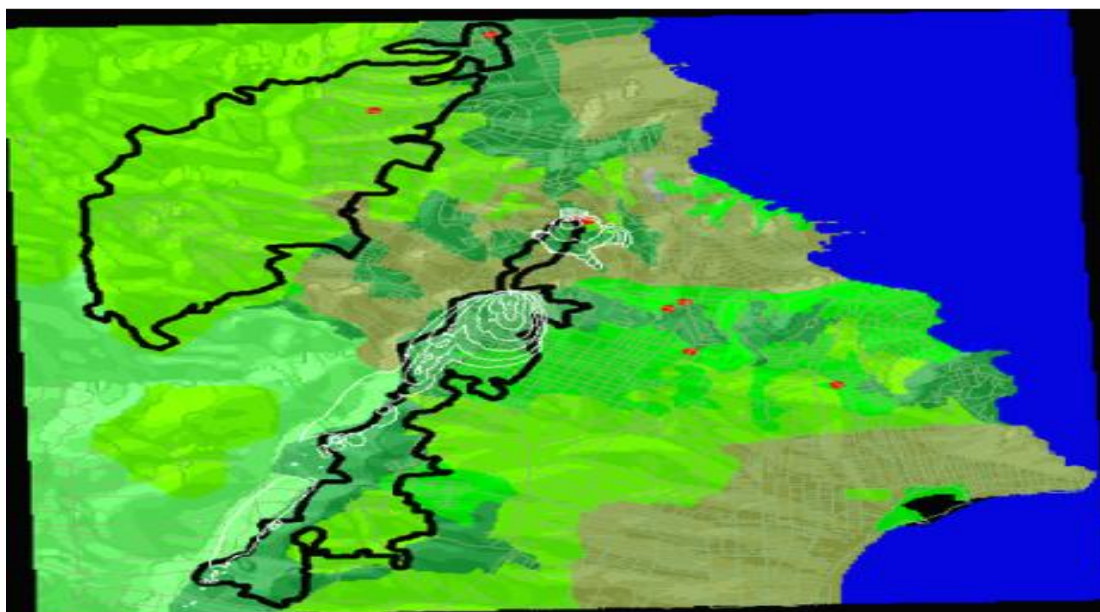
Σχήμα 7.30: Μοντέλα καύσιμης όλης περιοχής μελέτης (αποχρώσεις του πράσινου), σημεία έναρξης πυρκαγιών (κόκκινα σημεία) και πραγματικές καμένες εκτάσεις (μωρή γραμμή) για το Τεστ 1. Τα επιπλέον κόκκινα σημεία εκτός των καμένων περιοχών είναι τοποθεσίες που εντοπίστηκαν εμπνηστικοί μηχανισμοί αλλά δεν υπήρξε πυρκαγιά



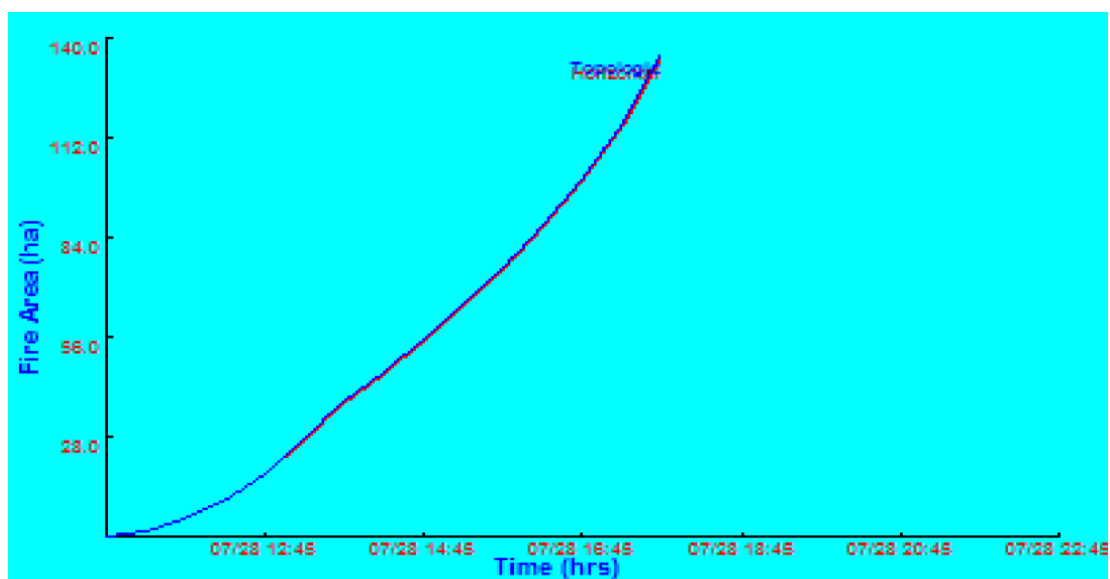
Σχήμα 7.31α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για το Τεστ 1



Σχήμα 7.31β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά για το Τεστ 1



Σχήμα 7.32α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για το Τεστ 1



Σχήμα 7.32β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στη Ραφήνα για το Τεστ 1

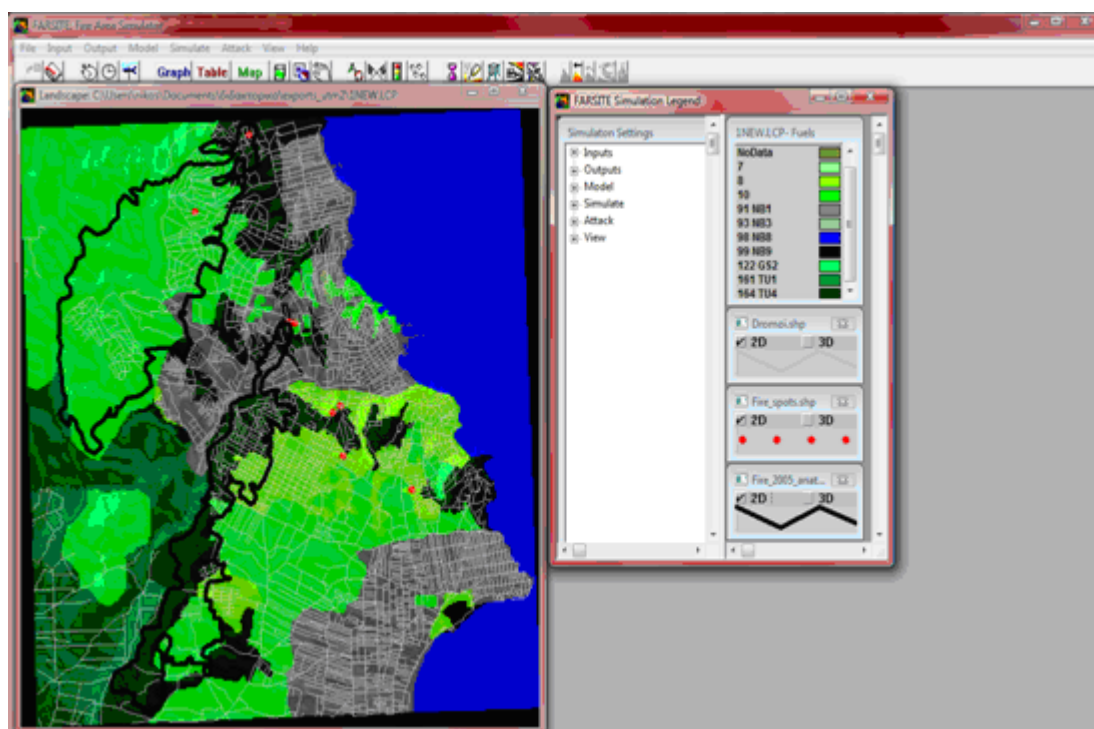
7.3.3 Προσομοίωση Πυρκαγιών στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα Σύμφωνα με τα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης 8, 122, 161 και 164-Τεστ 2

Στην περίπτωση που εξετάζεται προσομοιώθηκαν οι πυρκαγιές στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα το 2005 χρησιμοποιώντας τα μοντέλα καύσιμης ύλης των Anderson και Scott-

Burgan, δηλαδή τα μοντέλα 8, 122, 161 και 164 (Πίνακας 7.5 - Σχήμα 7.33). Προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά με καμένη έκταση τα 200 ha (2000 στρέμματα) (Σχήματα 7.34α και 7.34β). Παρατηρείται ότι η προσομοίωση της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά με τη χρήση των μοντέλων του Τεστ 2 υποεκτιμά αρκετά την πραγματική καμένη βλάστηση.

Μοντέλο καύσιμης ύλης	Αντιστοίχιση
161	Δάσος με υπόροφο (Scott-Burgan)
122	Θαμνότοποι μερικώς δασοσκεπείς (Scott-Burgan)
8	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας) (Anderson)
164	Σύμπυκνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος) (Scott-Burgan)
91,93,98 και 99	Μηδενική κάλυψη

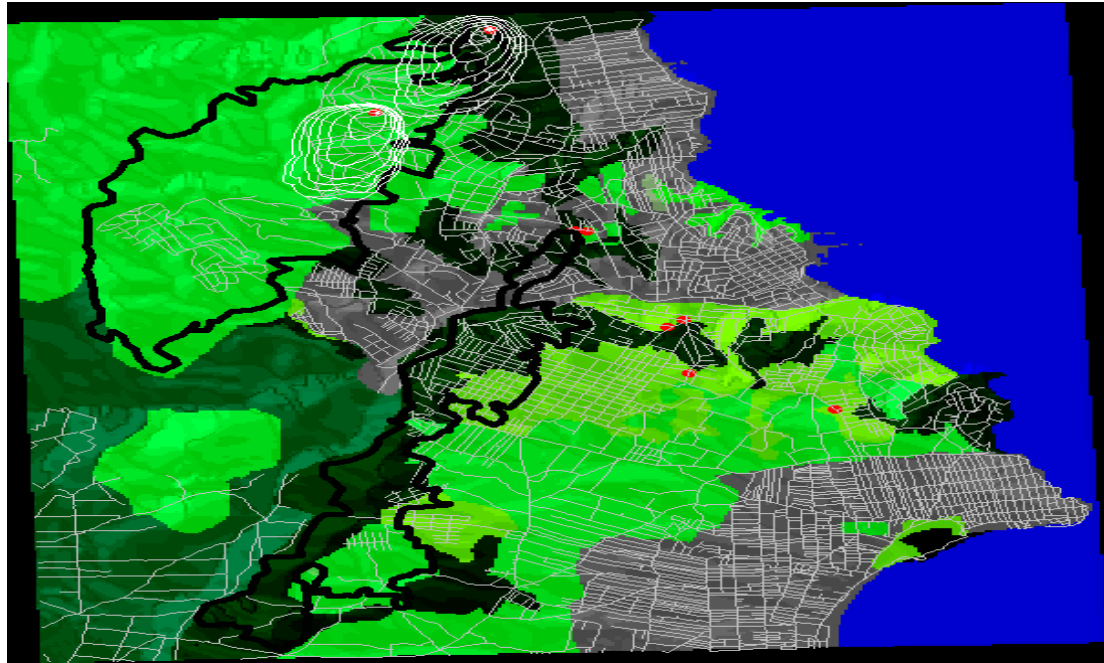
Πίνακας 7.5: Αντιστοίχιση βλάστησης της περιοχής μελέτης με μοντέλα καύσιμης ύλης –Τεστ 2



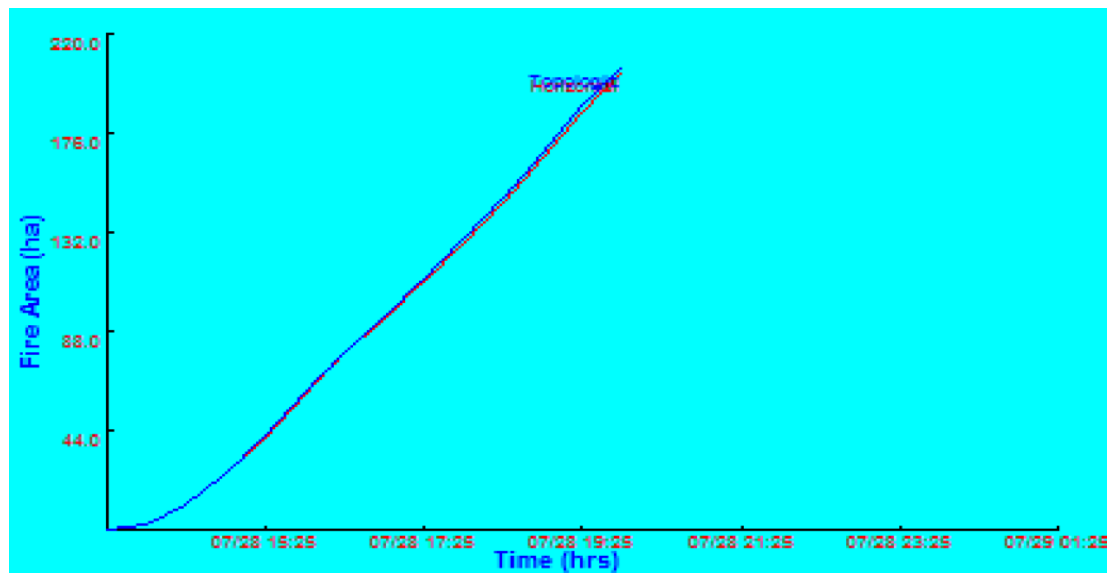
Σχήμα 7.33: Μοντέλα καύσιμης ύλης περιοχής μελέτης (πράσινη απόχρωση), σημεία έναρξης πυρκαγιών(κόκκινα σημεία) και πραγματικές καμένες εκτάσεις (μαύρη γραμμή) για το Τεστ 2

Το FARSITE προσομοίωσε την πυρκαγιά στη Ραφήνα για την περίπτωση του Τεστ 2. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής παρουσίασαν την καμένη έκταση στα 220 ha

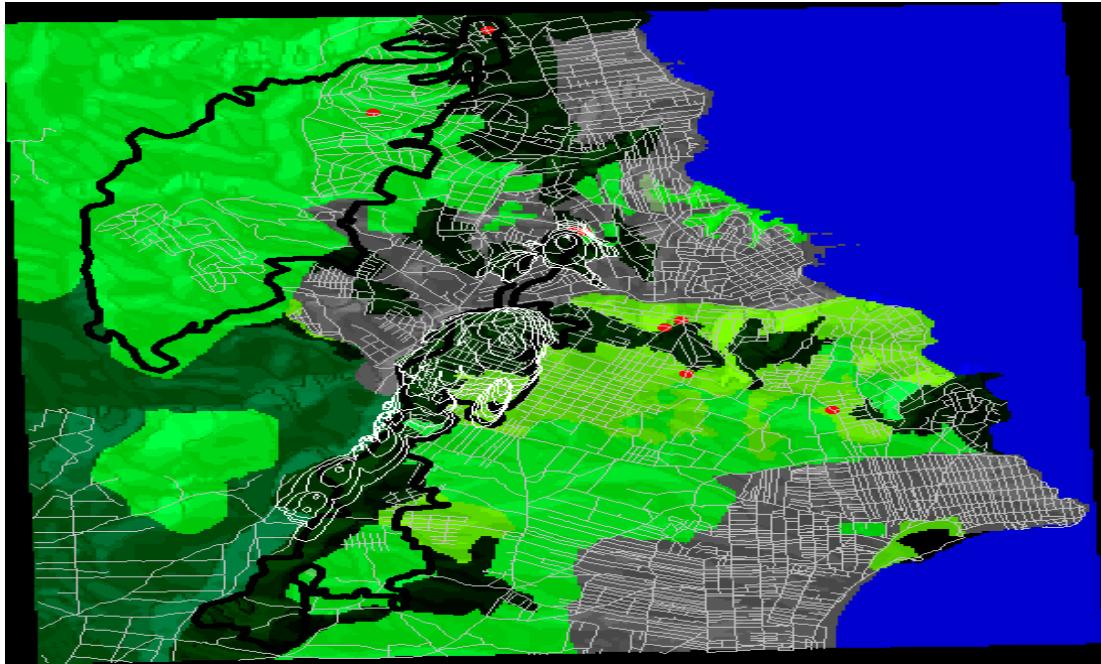
(2200 στρέμματα) (Σχήματα 7.35α, 7.35β). Παρατηρείται ότι σε αυτή την περίπτωση προσομοιώθηκε το μεγαλύτερο μέρος της πραγματικής καμένης έκτασης.



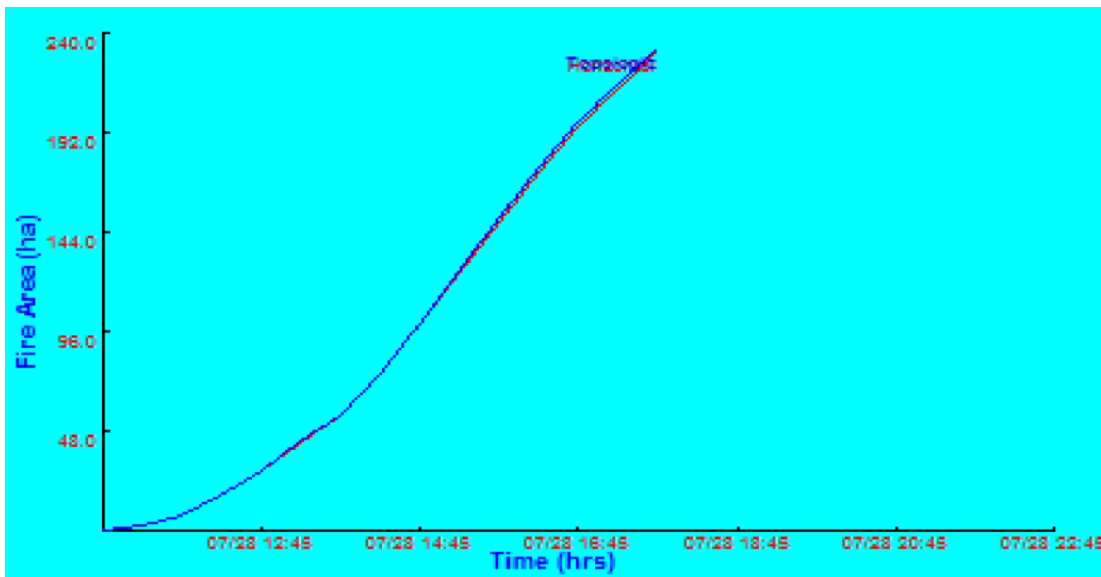
Σχήμα 7.34α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για το Τεστ 2



Σχήμα 7.34β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά για το Τεστ 2



Σχήμα 7.35α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για το Τεστ 2



Σχήμα 7.35β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στη Ραφήνα για το Τεστ 2

7.3.4 Προσομοίωση Πυρκαγιών στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα Σύμφωνα με τα 2, 7, 8, και 10 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης–Τεστ Corine

Στην περίπτωση που μελετάται προσομοιώθηκαν οι πυρκαγιές του Νέου Βουτζά και της Ραφήνας το 2005 με τα μοντέλα βλάστησης 2, 7, 8 και 10, σύμφωνα με το CORINE. Τα

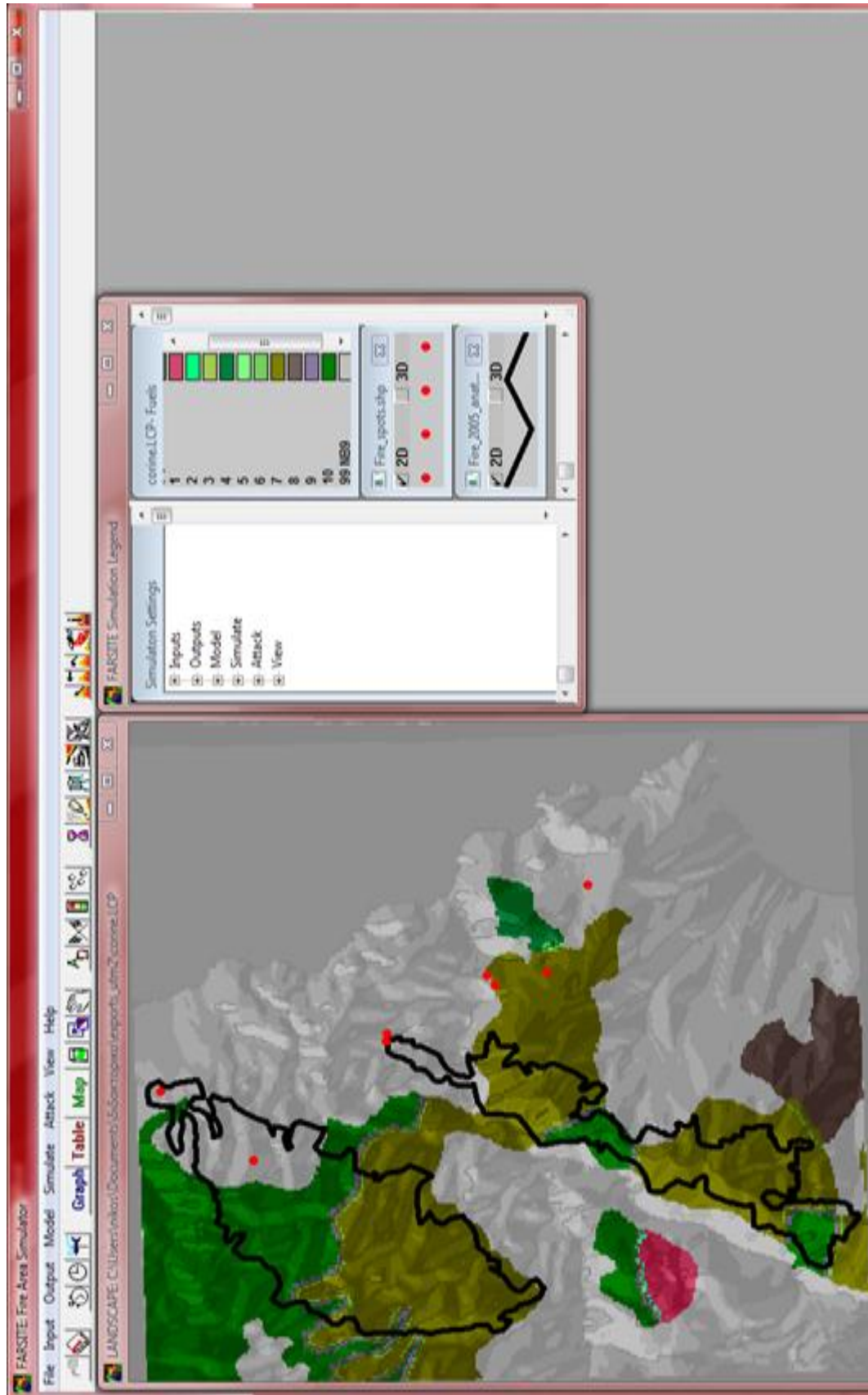
σημεία έναρξης των πυρκαγιών βρίσκονται σε περιοχές όπου δεν υπάρχει καύσιμη ύλη, λόγω αστοχίας του CORINE και για αυτό το λόγο μετακινήθηκαν στις πλησιέστερες με βλάστηση περιοχές (Πίνακας 7.6 - Σχήμα 7.36). Προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά με καμένη έκταση τα 180 ha (1800 στρέμματα) (Σχήματα 7.37α και 7.37β). Παρατηρείται, από την προσομοίωση, ότι η κάλυψη της πραγματικής καμένης έκτασης είναι μικρότερη από αυτή στο Τεστ 2 για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά.

Μοντέλο καύσιμης ύλης	Αντιστοίχιση
2	Δασολίβαδα
7	Θαμνότοποι μερικώς δασοσκεπείς
8	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
10	Σύμπυκνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)

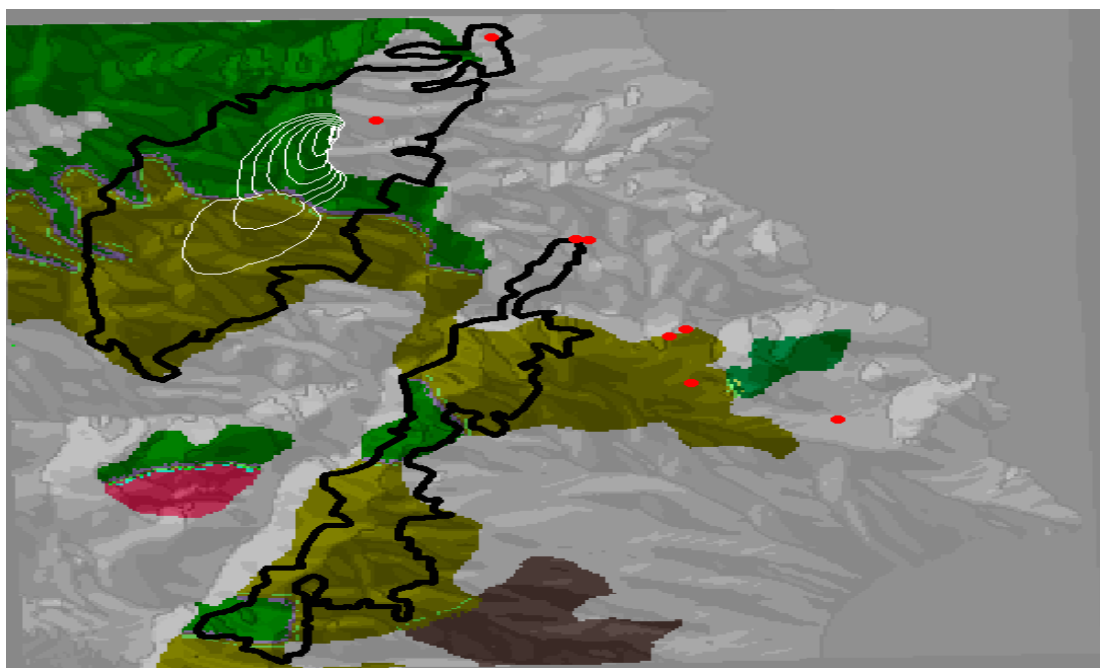
Πίνακας 7.6: Αντιστοίχιση βλάστησης της περιοχής μελέτης με μοντέλα καύσιμης ύλης –Τεστ CORINE

Το FARSITE προσομοίωσε την πυρκαγιά στη Ραφήνα για το Τεστ CORINE. Προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στη Ραφήνα με καμένη έκταση τα 230 ha (2300 στρέμματα) (Σχήματα 7.38α και 7.38β). Είναι φανερό ότι η προσομοίωση της καμένης έκτασης είναι χειρότερη από το αυτή στο Τεστ 2.

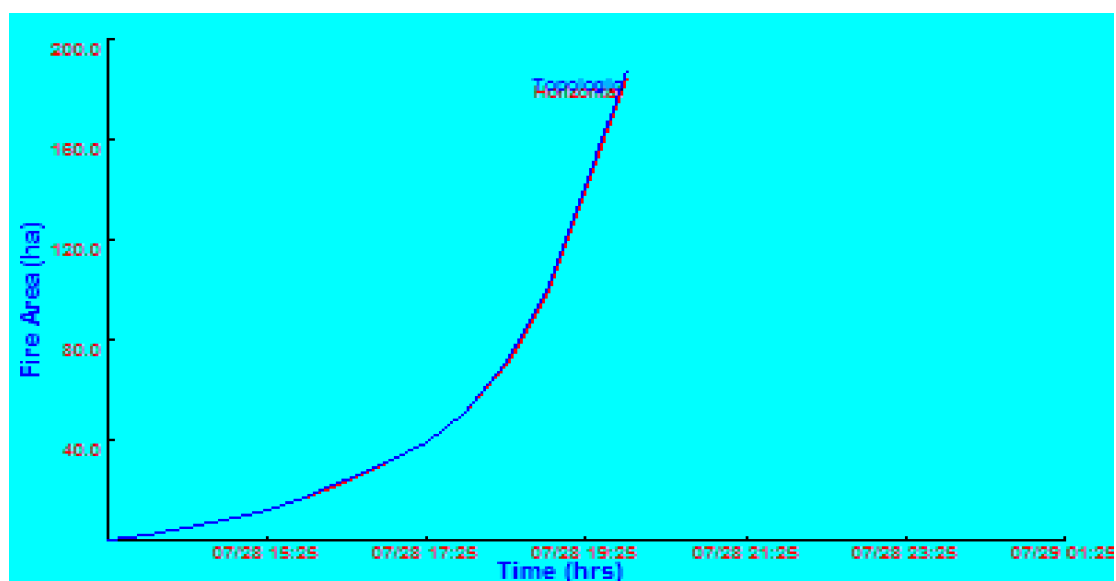
Συνοψίζοντας, το FARSITE προσομοίωσε την καμένη περιοχή στην πυρκαγιά της Ραφήνας στο 34.14% της πραγματικής καμένης έκτασης για το Τεστ 1, στο 62.93% για το Τεστ 2 και στο 53.77% για το Τεστ CORINE (Σχήμα 7.39). Επίσης, προσομοίωσε την καμένη περιοχή στην πυρκαγιά του Νέου Βουτζά στο 96.22% της πραγματικής καμένης έκτασης για το Τεστ 1, στο 35.6% για το Τεστ 2 και στο 29.49% για το Τεστ CORINE (Σχήμα 7.40). Άρα, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτει ότι το FARSITE προσομοιώνει την πραγματική καμένη έκταση καλύτερα με τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 2 για την πυρκαγιά στη Ραφήνα και με τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 1 για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά (Ηλιόπουλος κ.α. 2010).



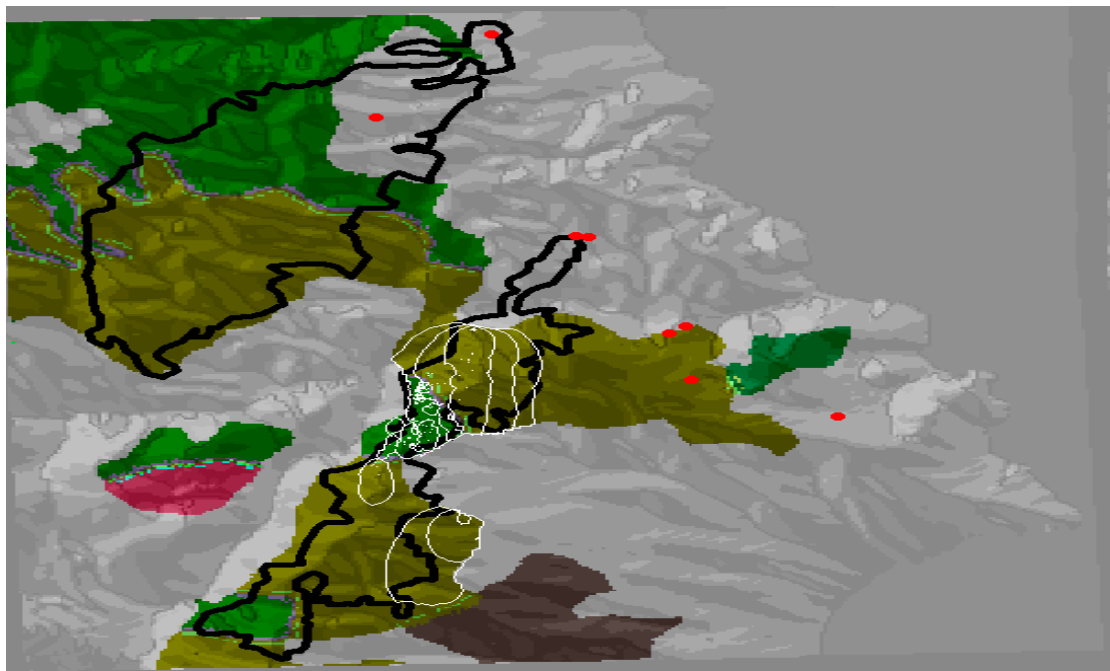
Σχήμα 7.36: Μοντέλα καύσιμης όλης περιοχής μελέτης (αποχρώσεις του πράσινου), σημεία έναρξης πυρκαγιών (κόκκινα σημεία) και πραγματικές καμένες εκτάσεις (μαύρη γραμμή) για το Τεστ CORINE



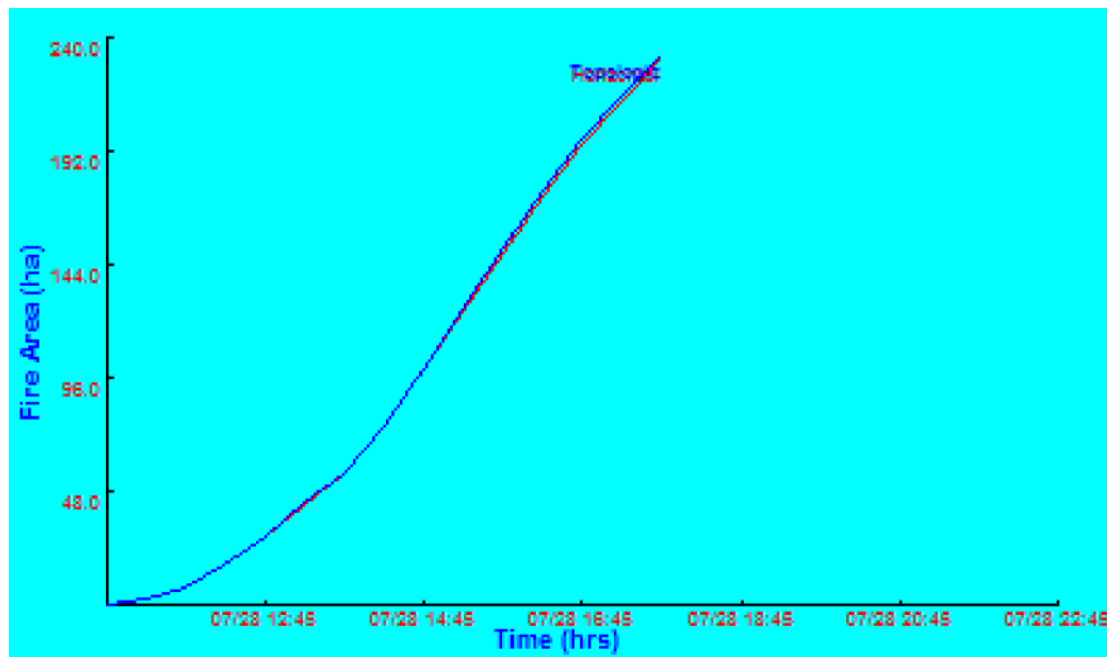
Σχήμα 7.37α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για το Τεστ CORINE



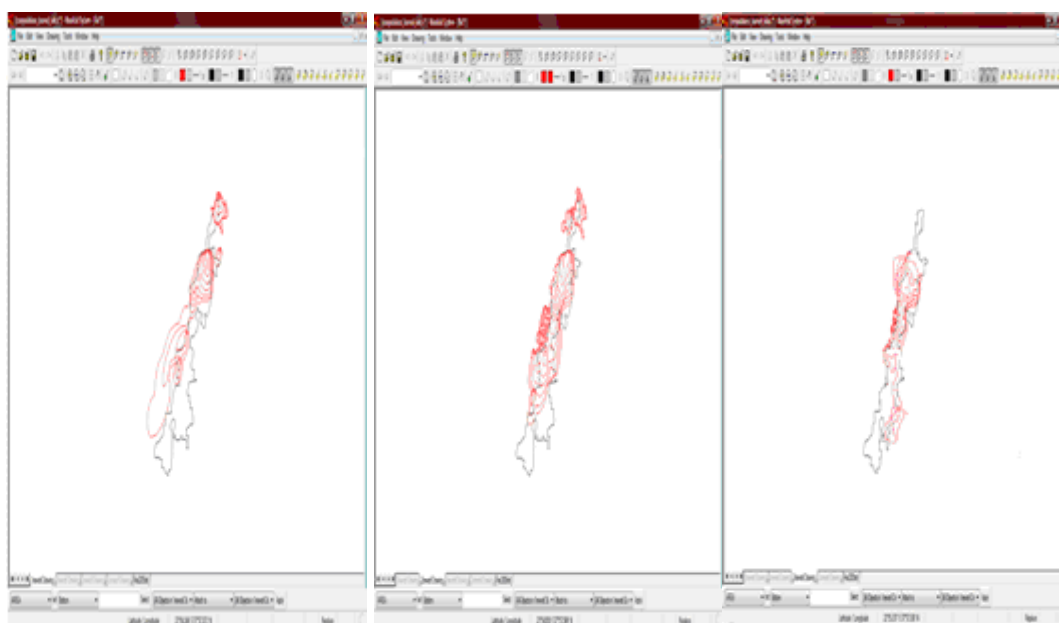
Σχήμα 7.37β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά για το Τεστ CORINE



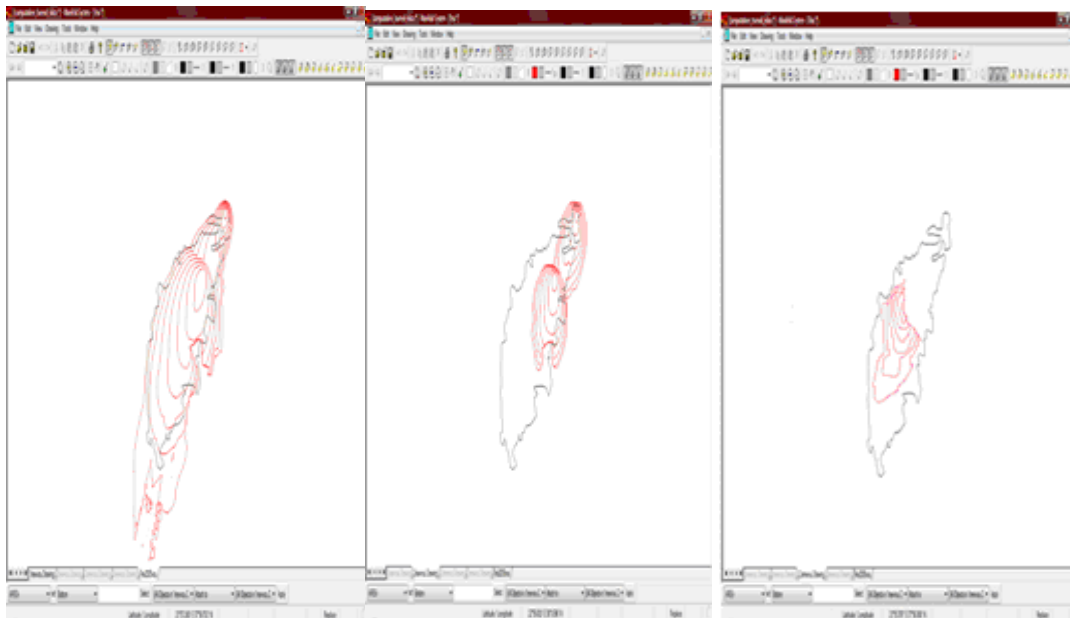
Σχήμα 7.38α: Προσομοίωση της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για το Τεστ CORINE



Σχήμα 7.38β: Καμένη έκταση (ha) για την πυρκαγιά στη Ραφήνα για το Τεστ CORINE



Σχήμα 7.39: Πραγματικές (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένες ανά ώρα (κόκκινη γραμμή) οριογραμμές καμένων εκτάσεων για τα Τεστ 1, Τεστ 2 και Τεστ CORINE για την πυρκαγιά στη Ραφήνα (Ηλιόπουλος κ.α. 2010)



Σχήμα 7.40: Πραγματικές (μαύρη γραμμή) και προσομοιωμένες ανά ώρα (κόκκινη γραμμή) οριογραμμές καμένων εκτάσεων για τα Τεστ 1, Τεστ 2 και Τεστ CORINE για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά (Ηλιόπουλος κ.α. 2010)

Για τον έλεγχο της ακρίβειας των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ο μη συμμετρικός στατιστικός δείκτης Sørensen (SC), ο οποίος μετράει την ομοιότητα μεταξύ της πραγματικής και προσομοιωμένης καμένης έκτασης (Bachisio Arca et al. 2007), λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 (όσο πιο κοντά στην τιμή 1 τόσο μεγαλύτερη η ομοιότητα) και εκφράζεται με την εξίσωση:

$$SC = \frac{2a}{2a+b+c} \quad (7)$$

όπου *a* είναι ο αριθμός των κελιών (1m x 1m) τα οποία έχουν χαρακτηριστεί καμένα και στην πραγματική και στην προσομοιωμένη πυρκαγιά, το *b* είναι ο αριθμός των κελιών που έχουν χαρακτηριστεί καμένα στην προσομοιωμένη αλλά είναι μη καμένα στην πραγματική πυρκαγιά και *c* είναι ο αριθμός των κελιών που έχουν χαρακτηριστεί ως μη καμένα στην προσομοιωμένη αλλά είναι καμένα στην πραγματική πυρκαγιά. Τέλος, υπολογίστηκε το χ^2 τεστ για να εξετάσει τη μηδενική υπόθεση για την ανεξαρτησία της προσομοιωμένης και της πραγματικής καμένης έκτασης. (Ludwig and Reynolds 1988). Για την πυρκαγιά της Ραφήνας υπολογίστηκε ο SC ως εξής: 0,35, 0,58 και 0,58 για τα Τεστ 1, 2 και CORINE, αντίστοιχα (Πίνακας 7.7). Για την πυρκαγιά του Νέου Βουτζά ο SC υπολογίστηκε ομοίως ως εξής: 0,75, 0,46 και 0,45 για τα Τεστ 1, 2 και CORINE, αντίστοιχα (Πίνακας 7.8) με το χ^2 τεστ να δείχνει μια σημαντική ομοιότητα της προσομοιωμένης και της πραγματικής καμένης έκτασης με στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,01$. Άρα, σύμφωνα με το δείκτη SC, για την πυρκαγιά στη Ραφήνα, η πραγματική και η προσομοιωμένη καμένη έκταση έχουν μεγαλύτερη ομοιότητα, όταν το FARSITE χρησιμοποιεί τα μοντέλα καύσιμης ύλης των Τεστ 2 και 3 (SC = 0,58), ενώ για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά όταν το FARSITE χρησιμοποιεί τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 1 (SC = 0,75) (Ηλιόπουλος κ.α. 2010).

ΤΕΣΤ (Μοντέλα καύσιμης Ύλης)	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ SORENSEN (SC)	a	b	c
1 (2,7,8 και 10)	0,35	1.142.597	2.130.179	2.204.457
2 (8,122,161 και 164)	0,58	2.016.311	1.550.719	1.330.743
CORINE (2,7,8 και 10)	0,58	1.799.579	1.026.552	1.547.474

Πίνακας 7.7: Υπολογισμός του στατιστικού δείκτη Sorensen για τα Τεστ 1,2 και Corine για την πυρκαγιά στη Ραφήνα

ΤΕΣΤ (Μοντέλα καύσιμης Ύλης)	ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΣ ΔΕΙΚΤΗΣ SORENSEN (SC)	a	b	c
1 (2,7,8 και 10)	0,75	6.042.776	3.898.223	237.611
2 (8,122,161 και 164)	0,46	2.201.995	1.106.073	4.078.391
CORINE (2,7,8 και 10)	0,45	1.851.866	150.318	4.428.521

Πίνακας 7.8: Υπολογισμός του στατιστικού δείκτη Sorensen για τα Τεστ 1,2 και Corine για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά

Η προσπάθεια βαθμονόμησης και βελτίωσης των προσομοιώσεων του FARSITE μέσω της εύρεσης των αντιπροσωπευτικότερων μοντέλων καύσιμης ύλης, παρατηρείται ότι εμφάνισε καλύτερα αποτελέσματα στην πυρκαγιά του Νέου Βουτζά από την πυρκαγιά στη Ραφήνα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι οι έντονες κλίσεις στην περιοχή της πυρκαγιάς της Ραφήνας σε σχέση με την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά (Σχήμα 6.14) είχαν σαν αποτέλεσμα να μειώσουν την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων του FARSITE.

Για κάθε προσομοίωση της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 1 διότι παρουσιάζουν μεγαλύτερο SC (0,75) από τα μοντέλα καύσιμης ύλης των άλλων Τεστ. Για τις προσομοιώσεις της πυρκαγιάς στη Ραφήνα, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 2 και όχι του Τεστ CORINE, διότι, παρόλο που παρουσιάζουν και τα δύο τον μεγαλύτερο SC (0,58), τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 2 παρουσιάζουν καλύτερη προσομοίωση της καμένης περιοχής (62,93%).

7.3.5 Προσομοίωση Πυρκαγιών στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα Σύμφωνα με τις Κλιματικές Τάσεις των Αποτελεσμάτων του Κλιματικού Μοντέλου MAGICC-SCENGEN

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η διερεύνηση του βαθμού που η κλιματική αλλαγή στη χώρα μας μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών, δηλαδή η διερεύνηση, του αν είναι δυνατό να επηρεαστεί και αν ναι με ποιο τρόπο, η συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στο μέλλον. Τα αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου MAGICC-SCENGEN δείχνουν μια αύξηση της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας κατά 2,5°C για το σενάριο IS92A και μια αύξηση κατά 1,5°C - 2°C για το σενάριο IS92C την περίοδο 2060-2089 στην περιοχή ενδιαφέροντος (Σχήματα 7.20 και 7.21). Επειδή οι προσομοιώσεις των πυρκαγιών με την επίδραση των κλιματικών τάσεων εξέρχονται από τα όρια της περιοχής

ενδιαφέροντος και επηρεάζουν το αποτέλεσμα, οι προσομοιώσεις έγιναν για τις πρώτες τέσσερις (4) ώρες από την έναρξη των πυρκαγιών.

Αρχικά, προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά από τις 13:25 έως 17:25, με τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στις 28 Ιουλίου του 2005 και αποτελεί σημείο αναφοράς για την περίπτωση του Νέου Βουτζά. Υπολογίστηκε ότι η πυρκαγιά καίει σε αυτή την περίπτωση **3501** στρέμματα δασικής έκτασης, τα δύο σημαντικότερα μέτωπά της έχουν ταχύτητες **12,2** και **2** m/min περίπου και η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας προσεγγίζει περίπου τα **14000** kJ/m² (Σχήμα 7.41).

Για όλα τα σενάρια που ακολούθησαν οι μεταβολές της υγρασίας των νεκρών καυσίμων έγιναν σε σχέση με τις τιμές του Πίνακα 7.1, ενώ οι μεταβολές στις μέγιστες θερμοκρασίες και σχετικές υγρασίες αέρα έγιναν σε σχέση με τις τιμές του Πίνακα 7.2 και της έντασης και κατεύθυνσης του ανέμου σε σχέση με τις τιμές του Πίνακα 7.3.

Για το σενάριο IS92C, αυξάνεται η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας κατά 2°C (η χειρότερη περίπτωση), ενώ μειώνεται η μέγιστη και η ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα κατά 8% καθώς και η υγρασία της νεκρής καύσιμης ύλης κατά 2% κρατώντας την ένταση του ανέμου σταθερή. Προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά στην περίπτωση αυτή (Σχήμα 7.42). Συμπεραίνεται ότι, παρόλο που δεν αυξήθηκε η τιμή του ανέμου, του σημαντικότερου παράγοντα που επιδρά στη συμπεριφορά των πυρκαγιών, στην περίπτωση που ερευνάται η καμένη έκταση αυξήθηκε περίπου κατά 75%! Αυξάνονται σημαντικά η ταχύτητα μετώπου και η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας. Επομένως, σε συνθήκες πολύ χαμηλής υγρασίας νεκρών καυσίμων, αρκεί μια μείωση της υγρασίας τους για να μεταβάλλει σημαντικά τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς.

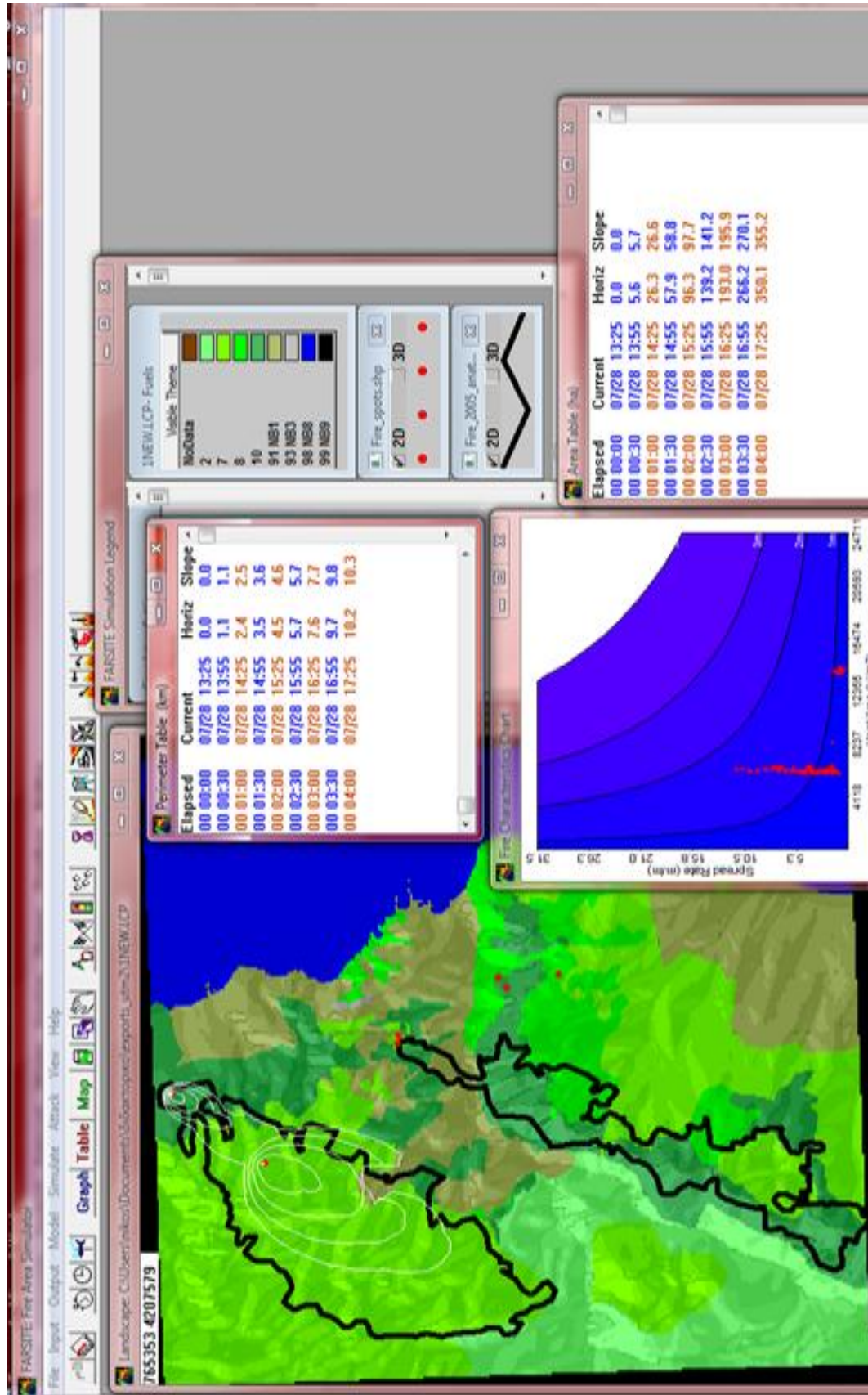
Για το σενάριο IS92A, αυξήθηκε η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας κατά 2,5°C, ενώ μειώνεται η μέγιστη και η ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα κατά 9% καθώς και η υγρασία των νεκρών καυσίμων κατά 2% κρατώντας την ένταση του ανέμου σταθερή. Προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά στην περίπτωση που εξετάζεται (Σχήμα 7.43). Διαπιστώθηκε ότι, αν και έμεινε σταθερή η ένταση του ανέμου και σε αυτή την περίπτωση, με την επιπλέον αύξηση της θερμοκρασίας και τη μείωση της σχετικής υγρασίας του αέρα σε σχέση με το σενάριο IS92C, η καμένη έκταση συνεχίζει να αυξάνεται όπως ήταν αναμενόμενο, αλλά όχι σε μεγάλο βαθμό διότι η υγρασία των νεκρών καυσίμων παρέμεινε σταθερή. Αυξάνονται επιπλέον η ταχύτητα μετώπου και η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας.

Προσομοιώθηκε στη συνέχεια η πυρκαγιά στη Ραφήνα από τις 10:45 έως τις 14:25, με τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν στις 28 Ιουλίου του 2005 και θα αποτελέσει σημείο αναφοράς για την περίπτωση της Ραφήνας. Υπολογίστηκε ότι η πυρκαγιά καίει σε αυτή την περίπτωση **1293** στρέμματα δασικής έκτασης, τα δύο σημαντικότερα μέτωπά της έχουν ταχύτητες **5,6** και **5** m/min περίπου και η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας προσεγγίζει περίπου τα **13355** kJ/m² (Σχήμα 7.44).

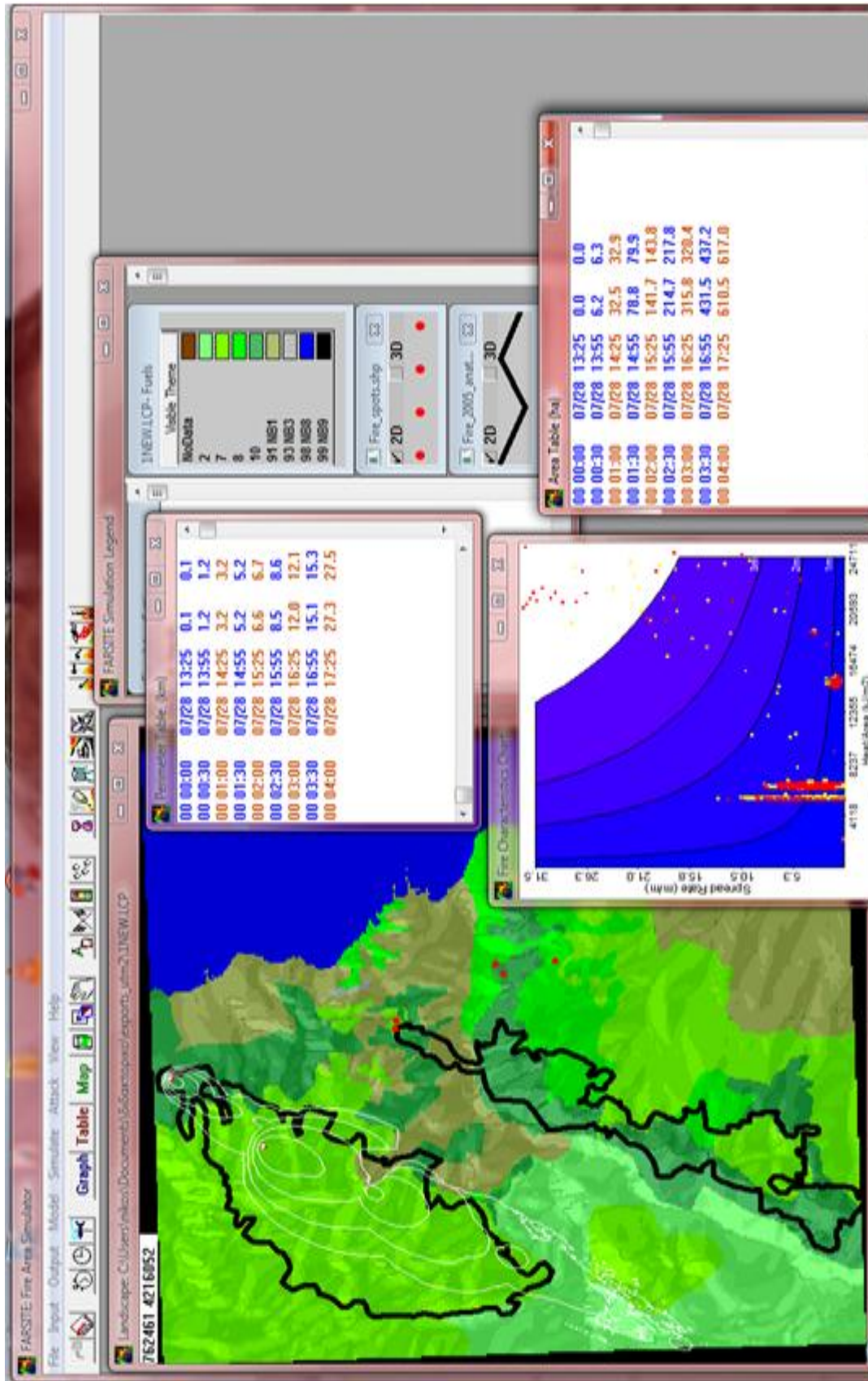
Για το σενάριο IS92C, αυξήθηκε η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας κατά 2°C, ενώ μειώνεται η μέγιστη και η ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα κατά 8% καθώς και η υγρασία των νεκρών καυσίμων κατά 2% κρατώντας την ένταση του ανέμου σταθερή. Το FARSITE προσομοίωσε την πυρκαγιά στη Ραφήνα σύμφωνα με το σενάριο αυτό (Σχήμα 7.45).

Για το σενάριο IS92A, αυξήθηκε η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας κατά 2,5°C, ενώ μειώνεται η μέγιστη και η ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα κατά 9% καθώς και η υγρασία των νεκρών καυσίμων κατά 2% κρατώντας την ένταση του ανέμου σταθερή. Προσομοιώνεται η πυρκαγιά στη Ραφήνα στο σενάριο που μελετάται (Σχήμα 7.46).

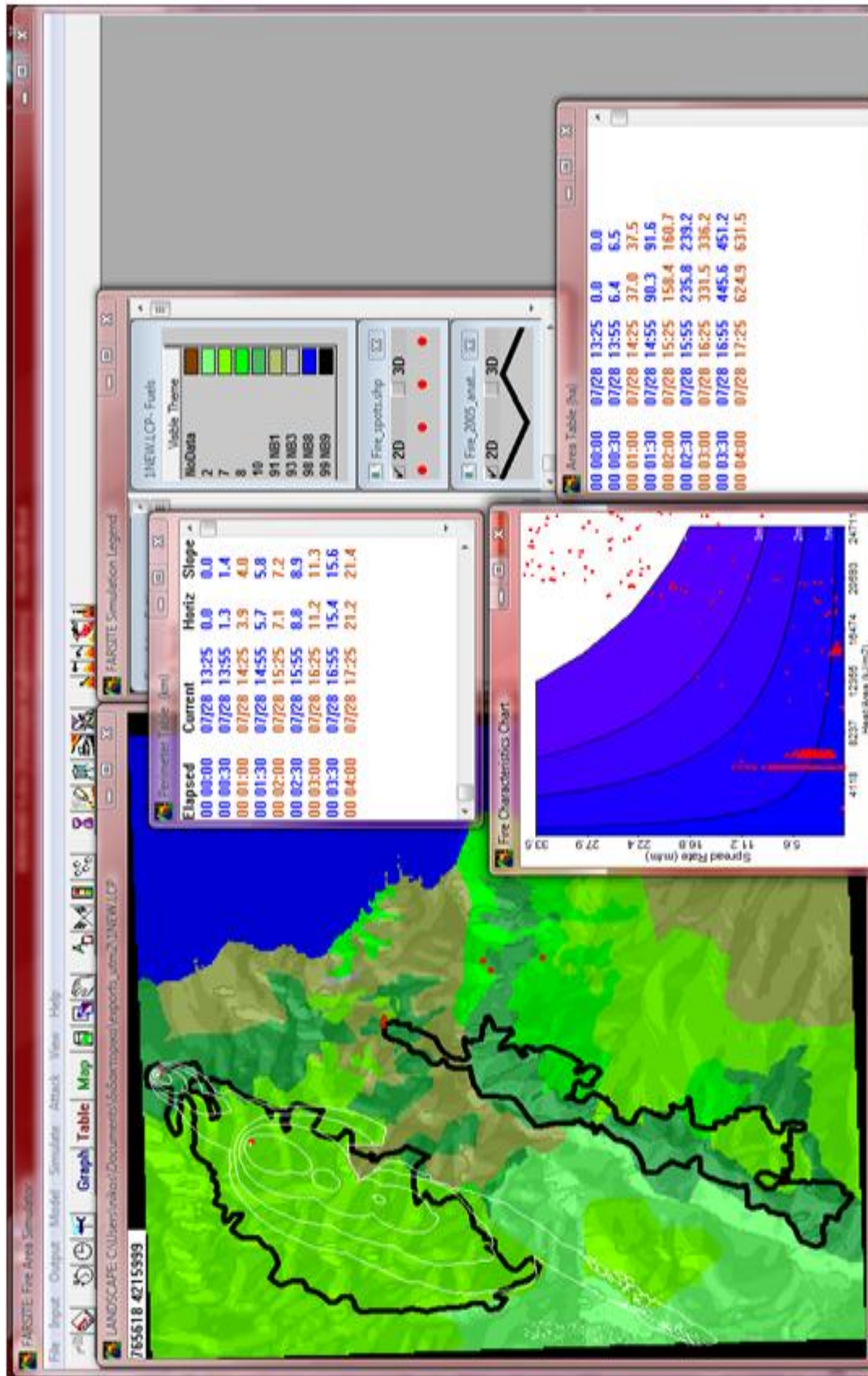
Στην περίπτωση της πυρκαγιάς στη Ραφήνα διαπιστώνεται και από τα δύο σενάρια ότι, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και μειώνεται η σχετική υγρασία του αέρα και η υγρασία των νεκρών καυσίμων, τόσο η πυρκαγιά αυξάνει την καμένη έκταση σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (κατά περίπου 15 - 30%). Επίσης, παράλληλα με την καμένη έκταση, όπως ήταν αναμενόμενο, αυξάνονται οι ταχύτητες μετώπου πυρκαγιάς και η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας. Παρατηρείται ότι στην πυρκαγιά της Ραφήνας η αύξηση στην καμένη έκταση, στην ταχύτητα μετώπου πυρκαγιάς και στην εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας σε σύγκριση με την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά, δεν ήταν τόσο μεγάλη εξαιτίας της διαφορετικής τοπογραφίας και βλάστησης. Πιο συγκεκριμένα, η πυρκαγιά στη Ραφήνα ήταν περιορισμένη σε μια στενή περιοχή πάνω σε ένα λόφο, λόγω της έλλειψης ικανής ποσότητας καύσιμου και του είδους της βλάστησης περιμετρικά της πυρκαγιάς, που δεν ενισχύει την καύση (καλλιέργειες).



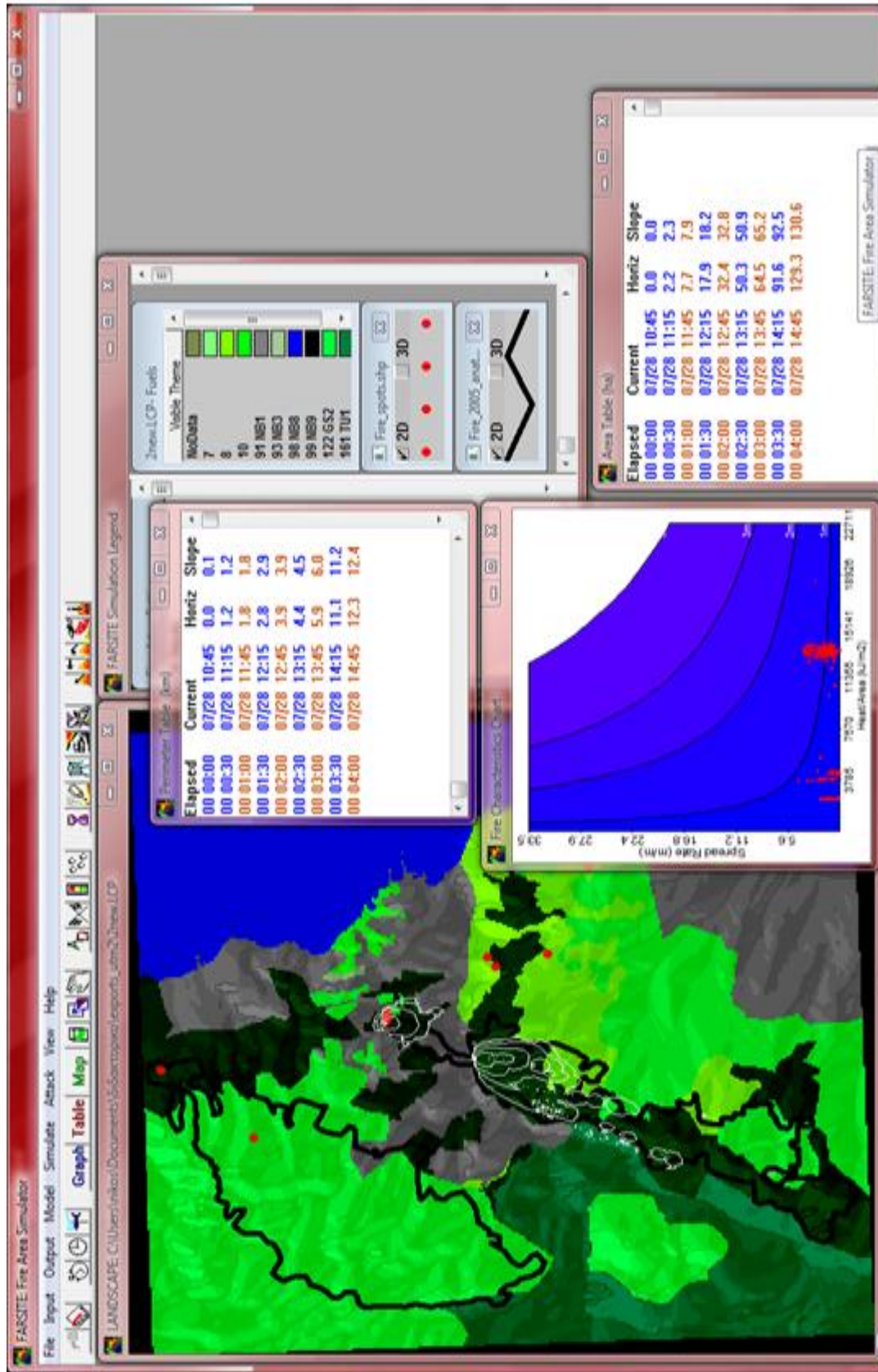
Σχήμα 7.41: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούσαν στις 28 Ιουλίου του 2005 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)



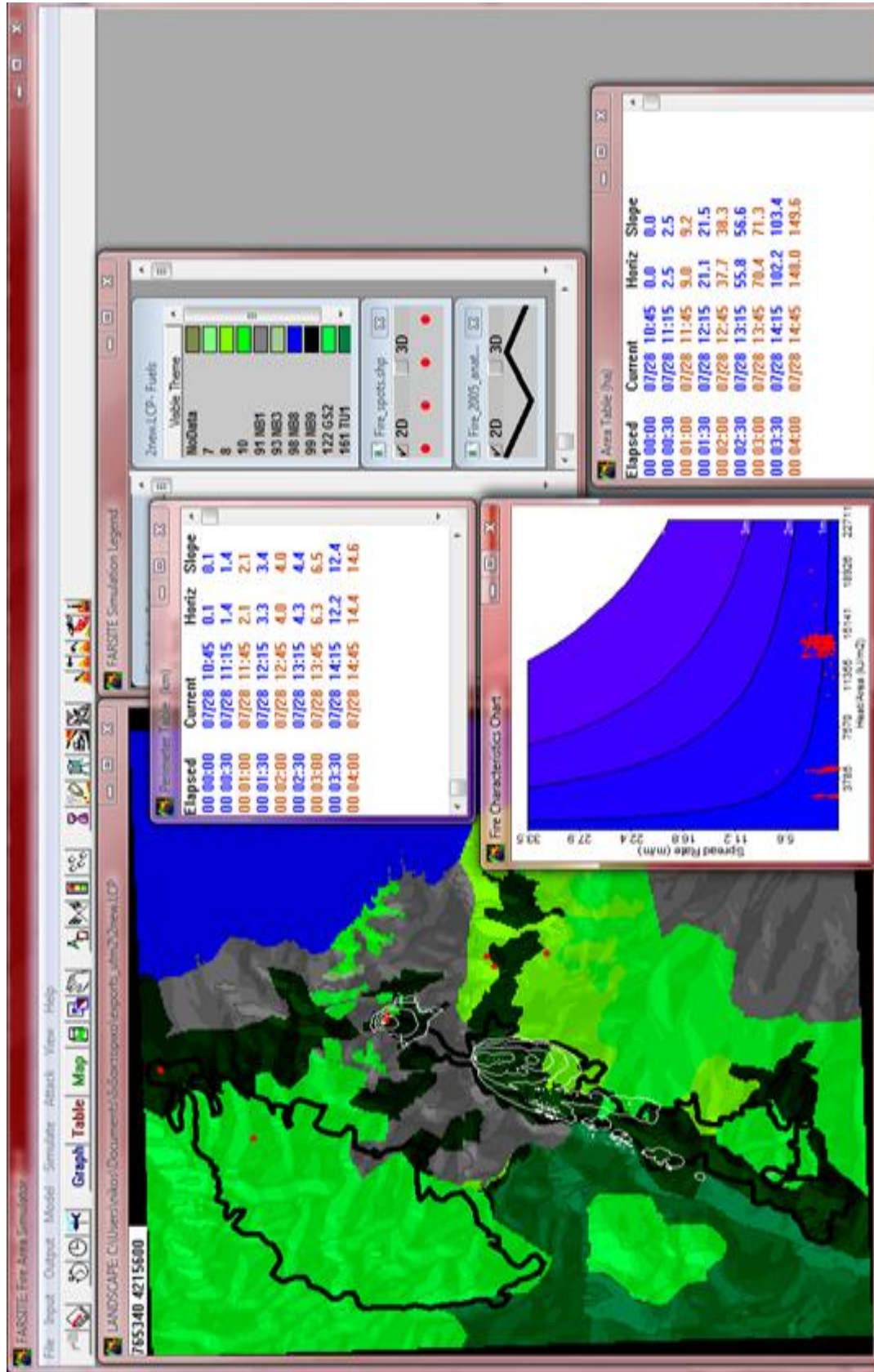
Σχήμα 7.42: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουζιά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση των κλιματικών τάσεων του σεναρίου IS92C - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m^2)



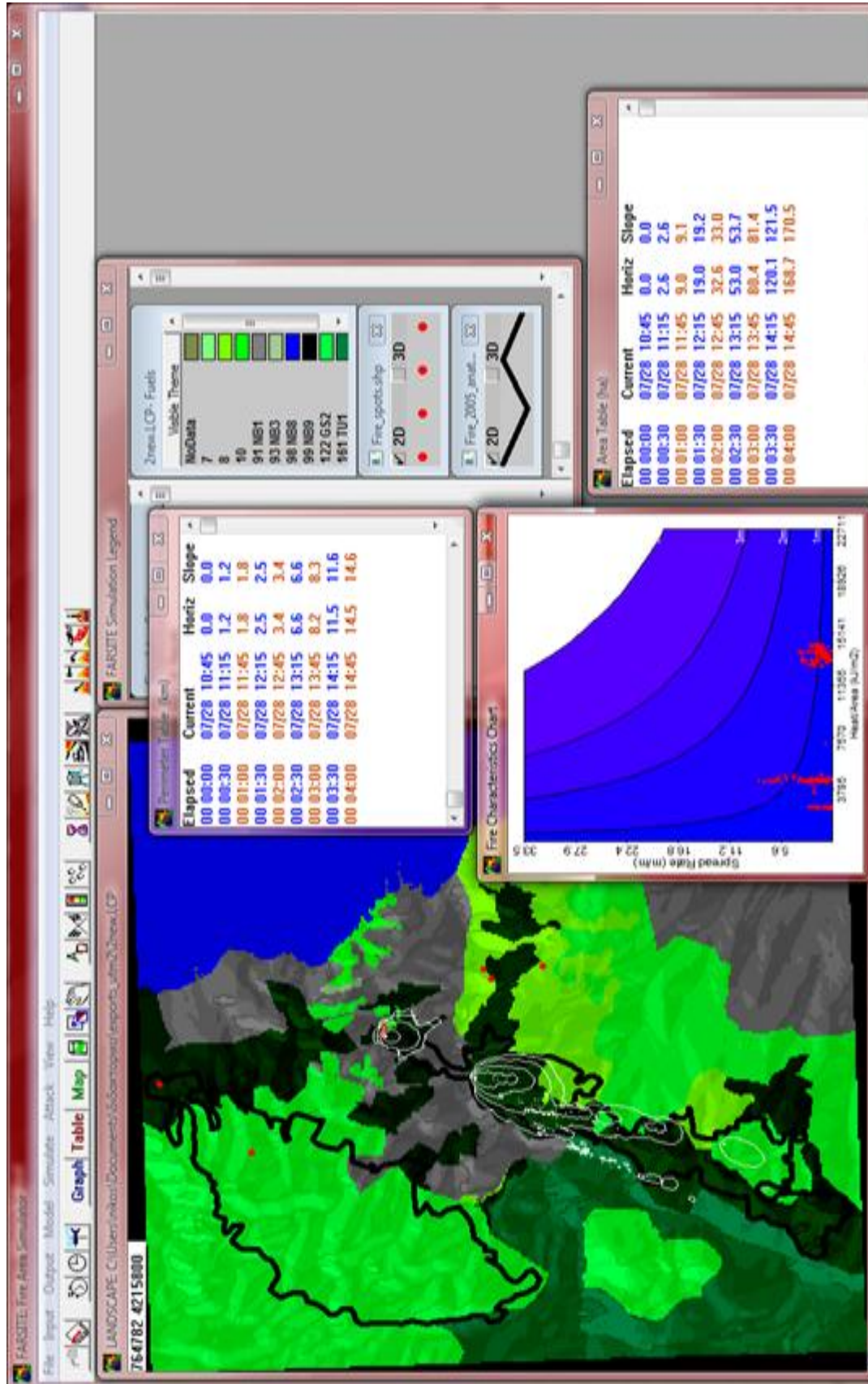
Σχήμα 7.43: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουζιά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση των κλιματικών τάσεων του σεναρίου IS92A - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)



Σχήμα 7.44: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούσαν στις 28 Ιουλίου του 2005 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)



Σχήμα 7.45: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση των κλιματικών τάσεων του σεναρίου IS92C - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)



Σχήμα 7.46: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση των κλιματικών τάσεων του σεναρίου IS92A - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)

7.3.6 Προσομοιώσεις των Πυρκαγιών στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα Σύμφωνα με Πιθανές Μεταβολές της Βλάστησης, των Μετεωρολογικών Παραγόντων και της Τοπογραφίας

Στην προηγούμενη ενότητα μελετήθηκε η μελλοντική συμπεριφορά δύο διαφορετικών πυρκαγιών, όσον αναφορά την τοπογραφία και τη βλάστηση στην περιοχή μελέτης, σύμφωνα με τις κλιματικές τάσεις των κλιματικών μοντέλων. Όμως τα αποτελέσματα των κλιματικών μοντέλων έχουν μεγάλη αβεβαιότητα. Επίσης, υπάρχουν μελέτες που προβάλλουν τις ασυνέπειές τους με την πραγματικότητα (Feidas and Lalas 2001). Γι' αυτό έγιναν έλεγχοι ευαισθησίας (Σενάρια), όπου οι μεταβολές όλων των παραγόντων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς, εισήχθησαν στο μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE, δημιουργώντας τυχαία πιθανά σενάρια, με αποτέλεσμα την περιγραφή του τρόπου που μεταβάλλεται η συμπεριφορά της δασικής πυρκαγιάς και η εξαγωγή πληροφοριών πάνω στην πυροεπικινδυνότητα των επόμενων δεκαετιών για την περιοχή μελέτης στη χώρα μας.

ΣΕΝΑΡΙΟ 1: Αυξήθηκε η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας κατά 1°C, ενώ μειώνεται η μέγιστη και η ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα κατά 5% καθώς και η υγρασία των νεκρών καυσίμων κατά 1% κρατώντας την ένταση του ανέμου σταθερή (προσομοιώνονται οι 4 πρώτες ώρες της πυρκαγιάς).

Προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά στο σενάριο που εξετάζεται (Σχήμα 7.47). Παρατηρήθηκε όπως ήταν αναμενόμενο, η μικρή αύξηση της καμένης έκτασης (περίπου στο 8%), της ταχύτητας μετώπου και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με την προσομοίωση της πυρκαγιάς του 2005.

Προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στη Ραφήνα στο σενάριο αυτό (Σχήμα 7.48). Παρατηρήθηκε ότι η ταχύτητα μετώπου δεν έχει αυξηθεί (αναφερόμαστε στη μέγιστη), σε σχέση με την προσομοίωση της πυρκαγιάς του 2005. Όμως κατά τη διάρκεια της καύσης η μέση ταχύτητα μετώπου ήταν μεγαλύτερη με αποτέλεσμα να υπολογιστεί μικρή αύξηση της καμένης έκτασης (περίπου στο 2%) και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας σε σχέση με την προσομοίωση της πυρκαγιάς του 2005.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2: Αυξήθηκε η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας κατά 2°C, ενώ μειώνεται η μέγιστη και η ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα κατά 8% καθώς και η υγρασία των νεκρών καυσίμων κατά 2% μειώνοντας την ένταση του ανέμου κατά 10% (προσομοιώνονται οι 4 πρώτες ώρες της πυρκαγιάς). Σε αυτό το σενάριο δεν είναι δεδομένο ότι θα αυξηθεί ή θα μειωθεί η καμένη έκταση καθώς και οι άλλοι δύο παράγοντες που εξετάζονται. Θα διερευνηθούν οι μεταβολές τους για την περιοχή μελέτης για κάθε μια πυρκαγιά.

Για την περίπτωση αυτή προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά (Σχήμα 7.49). Παρατηρήθηκε ότι η καμένη έκταση μειώθηκε περίπου 10% καθώς και η ταχύτητα μετώπου, σε σχέση με την προσομοίωση της πυρκαγιάς του 2005, λόγω της υπερίσχυσης του παράγοντα του ανέμου. Η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας όμως αυξήθηκε διότι τα καύσιμα είχαν μικρότερη υγρασία και επομένως κατανάλωσαν λιγότερη ενέργεια για να αναφλεγούν, με αποτέλεσμα περισσότερη ενέργεια να εκλυθεί.

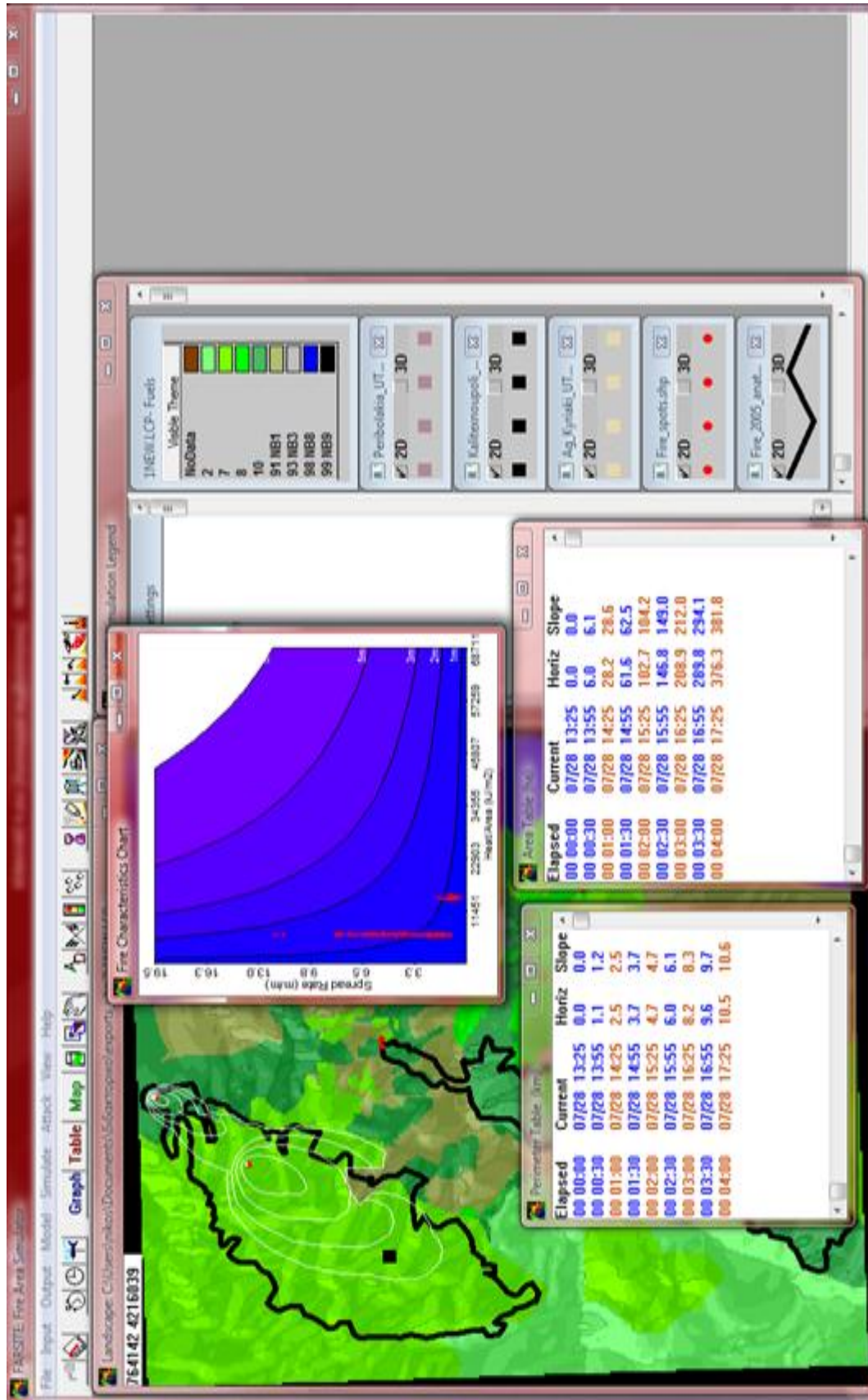
Έγινε προσομοίωση της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για αυτό το σενάριο (Σχήμα 7.50). Στην περίπτωση αυτή όπως και στη πυρκαγιά του Νέου Βουτζά, η καμένη έκταση μειώθηκε (περίπου 5%) και η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας αυξήθηκε, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Οι ταχύτητες μετώπου (οι μέγιστες) αυξήθηκαν αλλά τοπικά λόγω τοπογραφίας και βλάστησης, διότι η καμένη έκταση μειώθηκε σε σχέση με την προσομοίωση της πυρκαγιάς του 2005.

ΣΕΝΑΡΙΟ 3: Μειώθηκε η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας κατά 1°C, ενώ αυξάνεται η μέγιστη και η ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα κατά 5% καθώς και η υγρασία των νεκρών καυσίμων κατά 1% αυξάνοντας την ένταση του ανέμου κατά 5% (προσομοιώνονται οι 4 πρώτες ώρες της πυρκαγιάς).

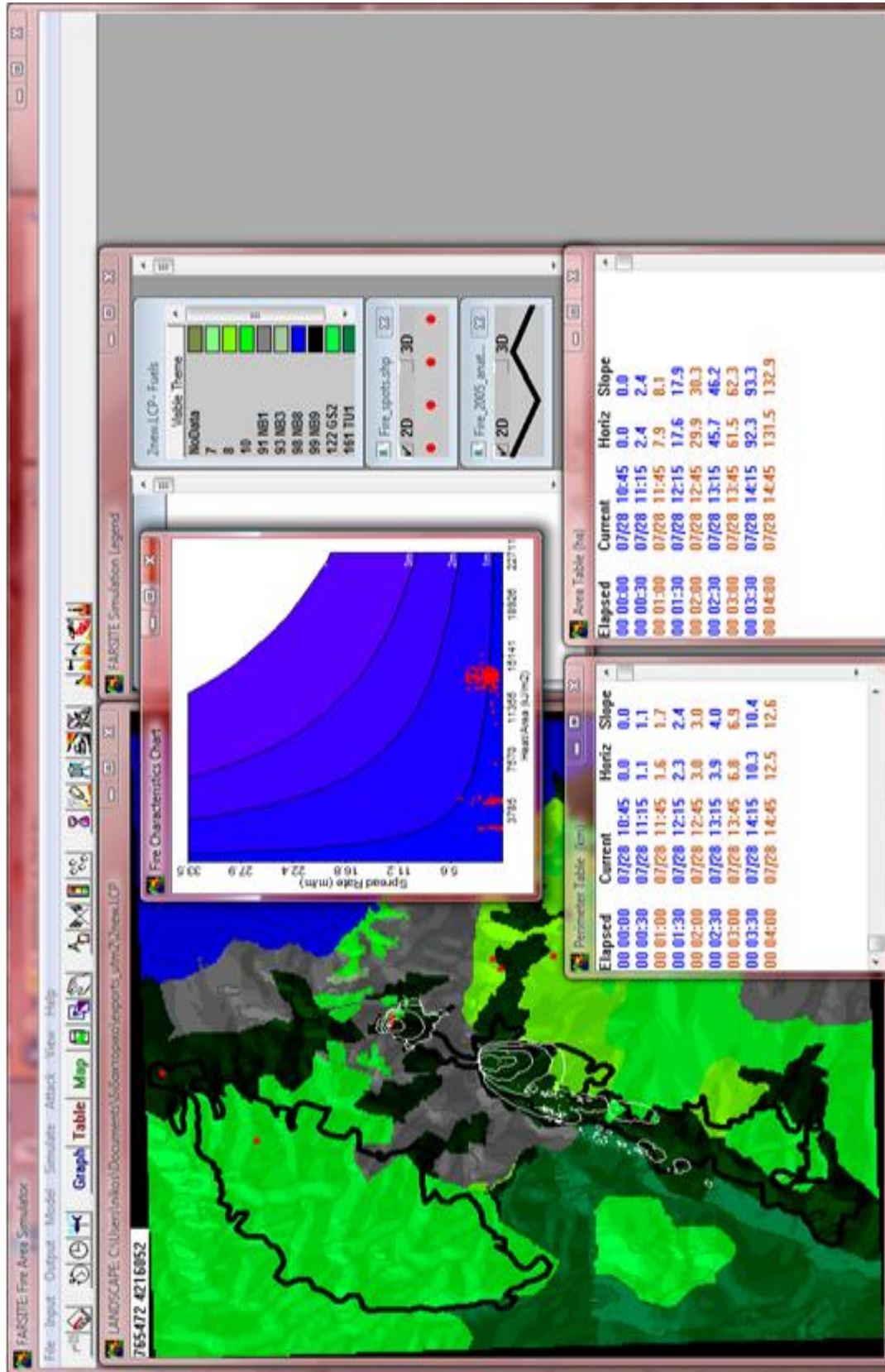
Προσομοιώθηκαν οι πυρκαγιές στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα στην περίπτωση που εξετάζεται (Σχήματα 7.51 και 7.52 αντίστοιχα). Παρατηρείται ότι και για τις δύο πυρκαγιές, η συμπεριφορά τους δεν έχει μεταβληθεί σχεδόν καθόλου σε σχέση με τις προσομοιώσεις των πυρκαγιών του 2005.

ΣΕΝΑΡΙΟ 4: Αυξήθηκε η μέγιστη θερμοκρασία ημέρας κατά 2°C, ενώ μειώνεται η μέγιστη και η ελάχιστη σχετική υγρασία του αέρα κατά 8% καθώς και η υγρασία των νεκρών καυσίμων κατά 2% μηδενίζοντας την ένταση του ανέμου (προσομοιώνονται οι 4 πρώτες ώρες της πυρκαγιάς).

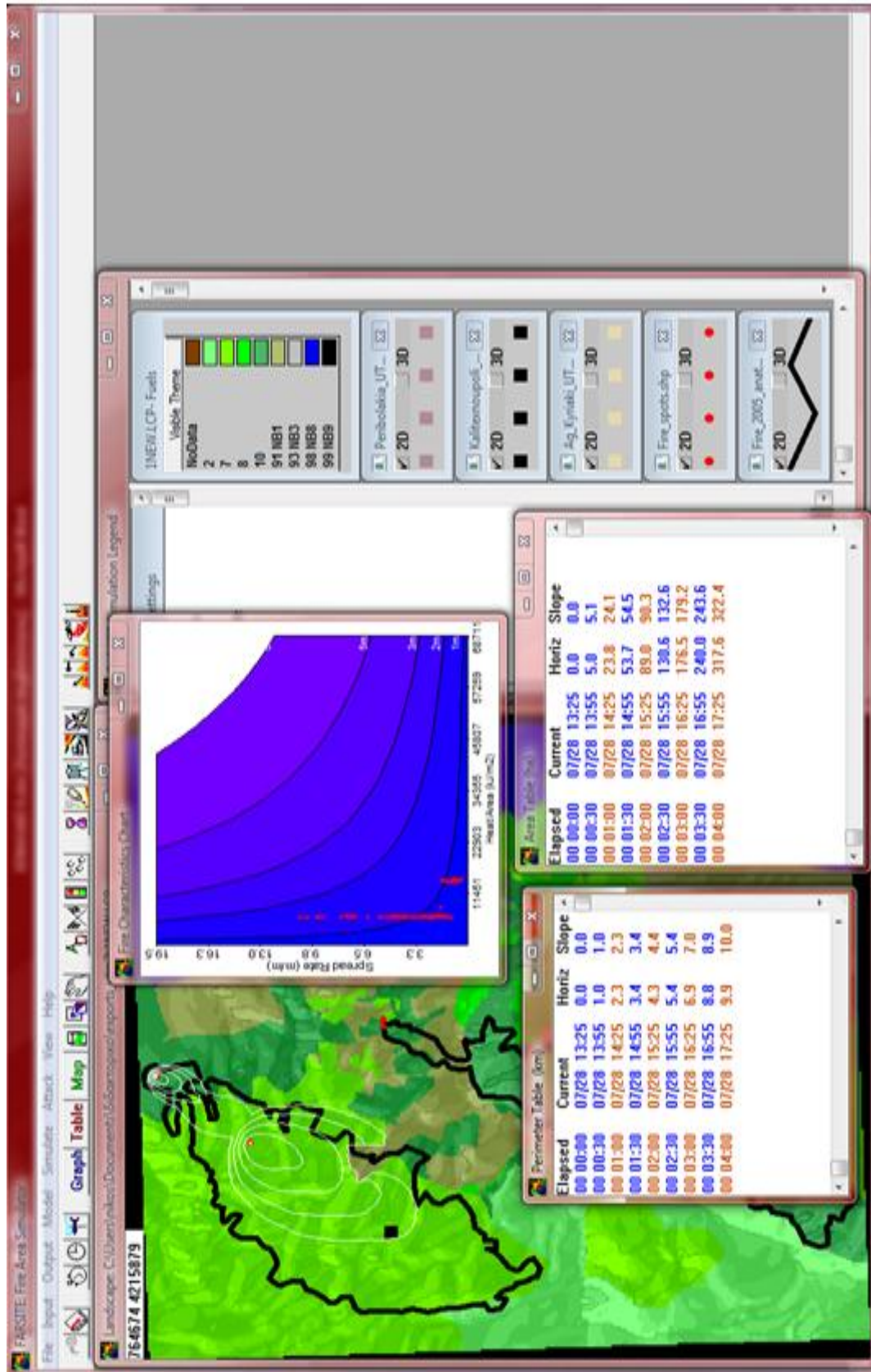
Προσομοιώθηκαν οι πυρκαγιές στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα στο σενάριο που εξετάζεται (Σχήματα 7.53 και 7.54 αντίστοιχα). Είναι φανερό στο σενάριο αυτό πόσο σημαντικός παράγοντας είναι ο άνεμος. Αυτό αναφέρεται διότι παρότι μειώθηκε η υγρασία των καυσίμων κατά 2%, ο μηδενισμός της έντασης του ανέμου είχε σαν αποτέλεσμα να μειωθεί η καμένη έκταση κατά 97% περίπου για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά και κατά 95% για την πυρκαγιά στη Ραφήνα. Στην πυρκαγιά στη Ραφήνα η μείωση της έντασης του ανέμου είναι λίγο μικρότερη από αυτή στο Νέο Βουτζά, διότι έχει μεγαλύτερες κλίσεις που βοηθούν την αύξηση της ταχύτητας της πυρκαγιάς και συγχρόνως την αύξηση της καμένης έκτασης.



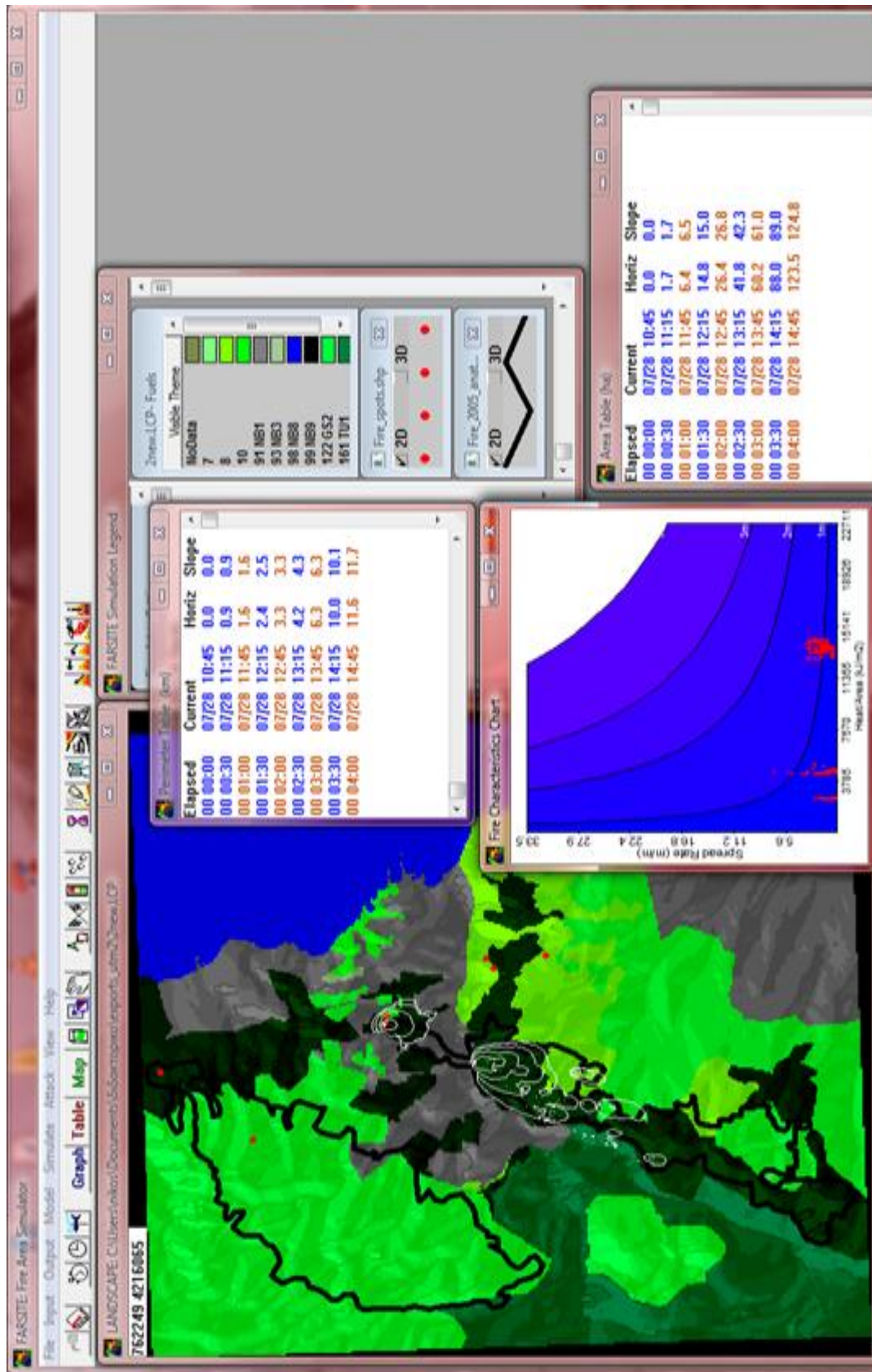
Σχήμα 7.47: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 1 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



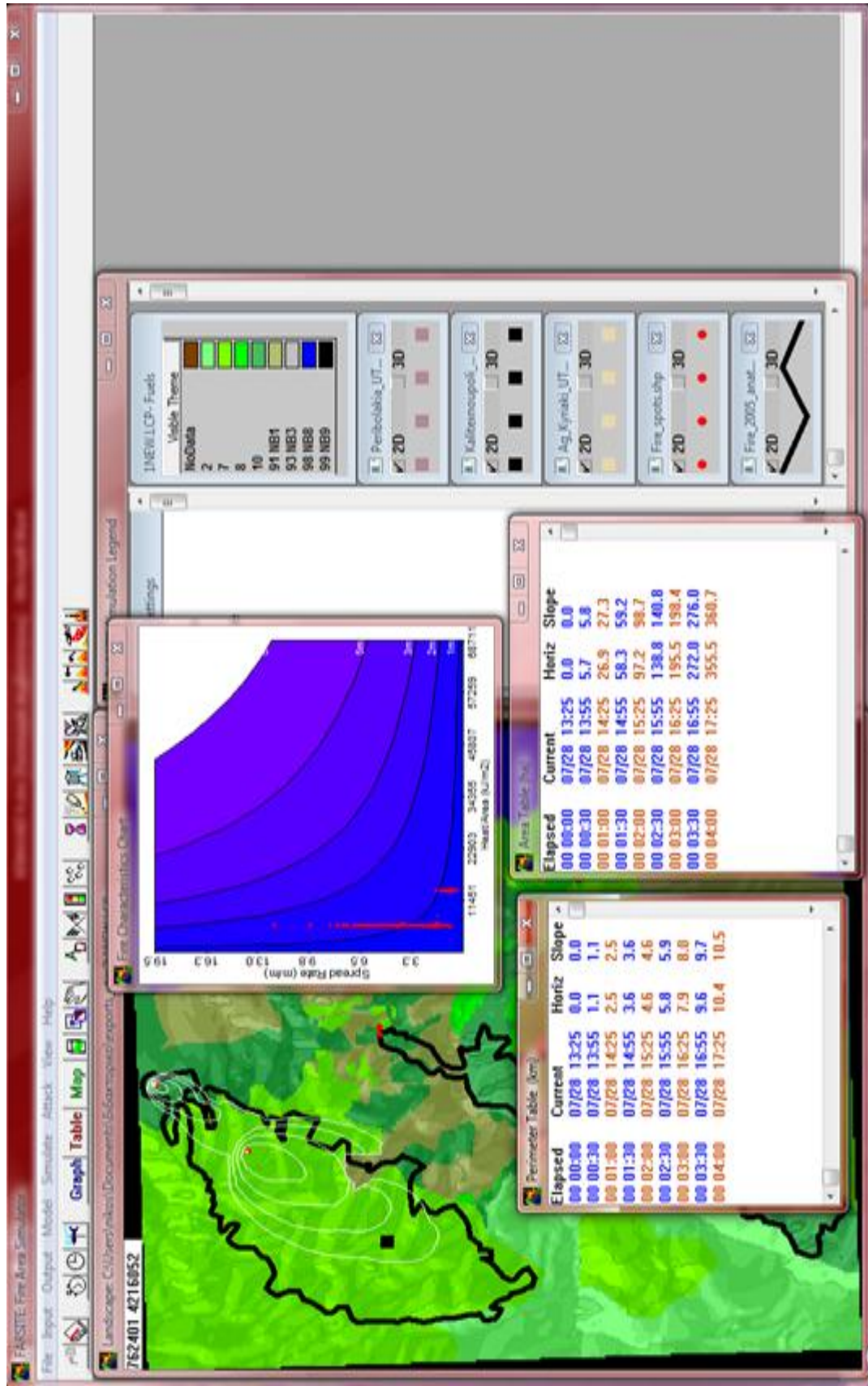
Σχήμα 7.48: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 1 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



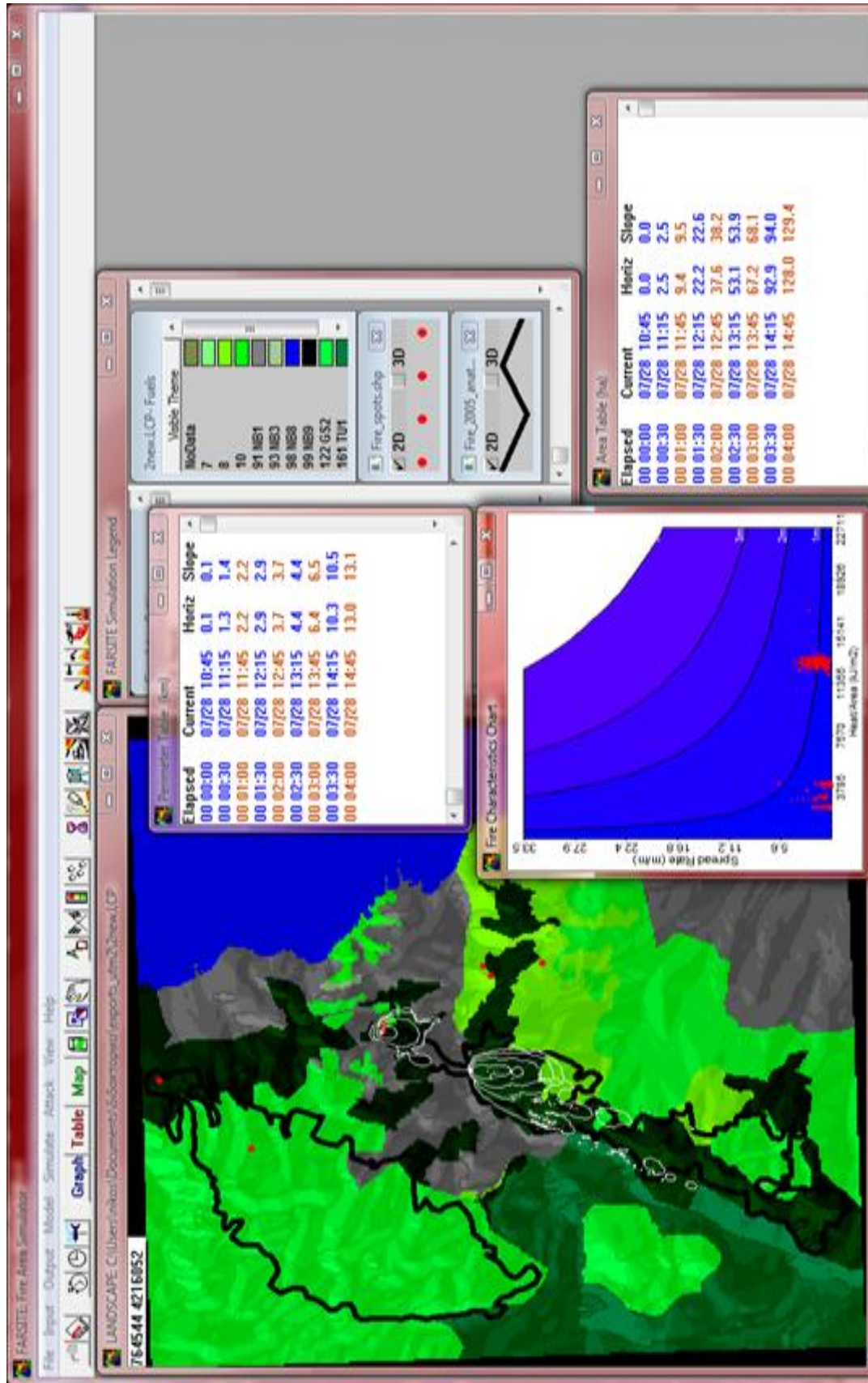
Σχήμα 7.49: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτιά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 2 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



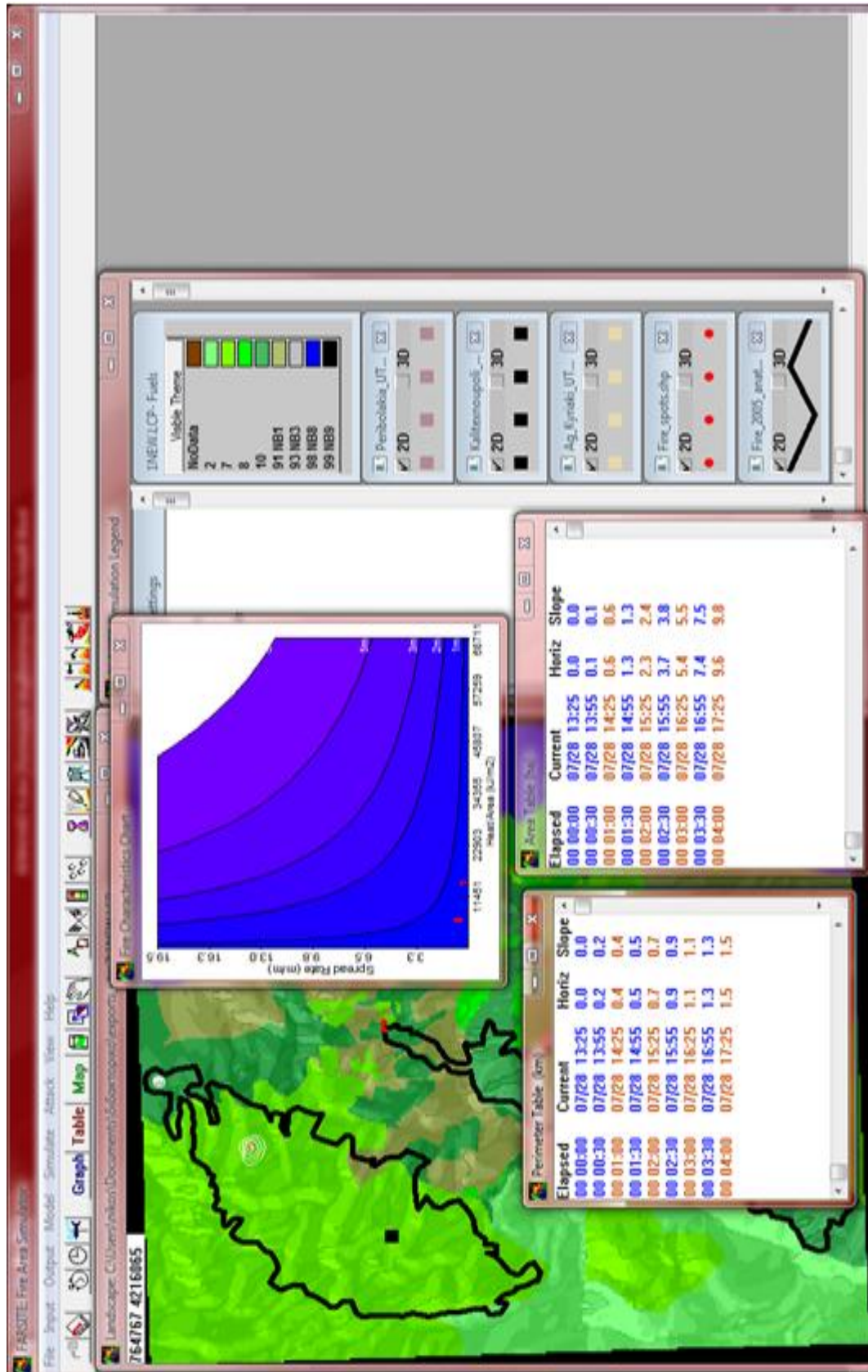
Σχήμα 7.50: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 2 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



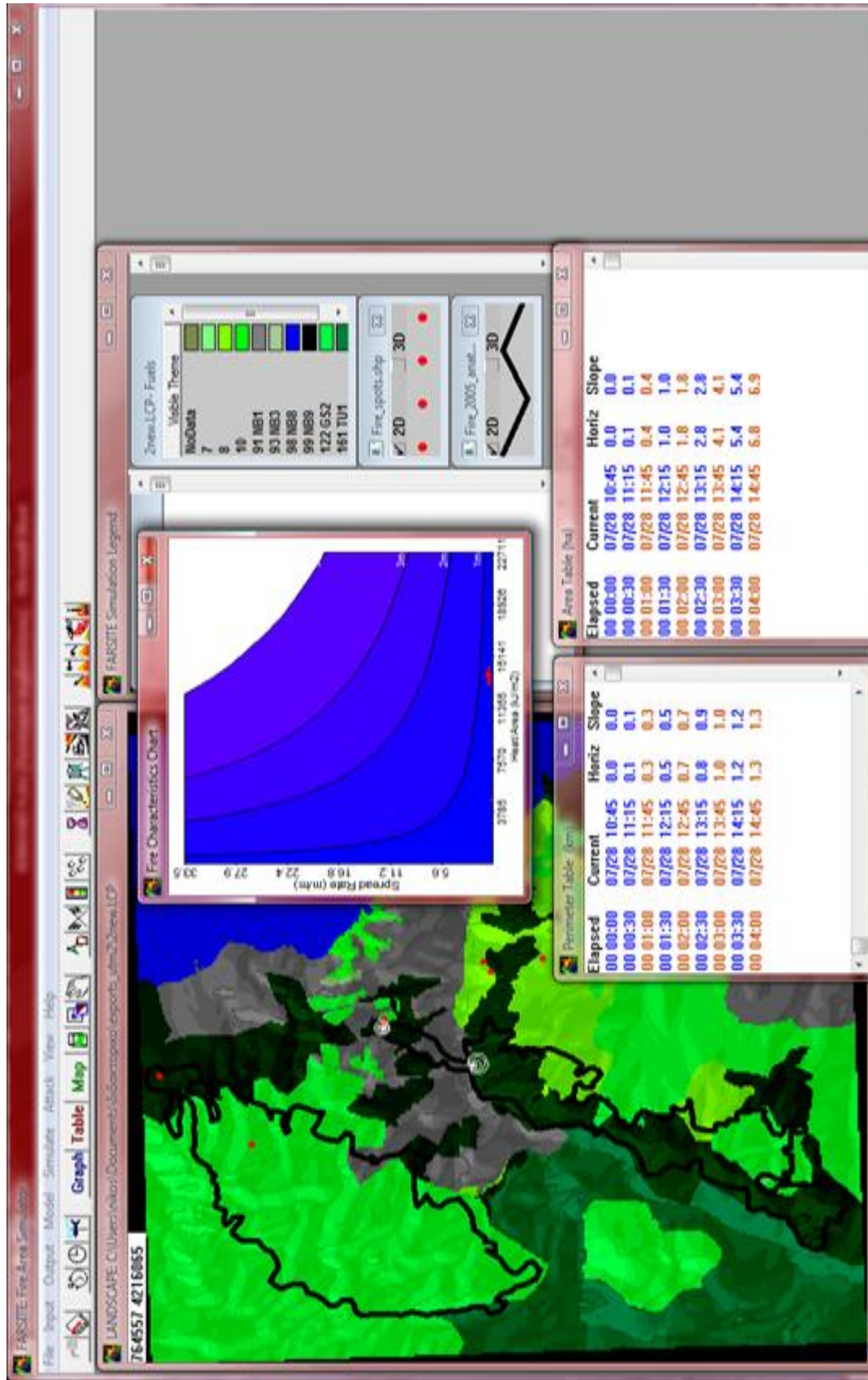
Σχήμα 7.51: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 3 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)



Σχήμα 7.52: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 3 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)



Σχήμα 7.53: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 4 - κοιμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενη θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



Σχήμα 7.54: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 4 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)

ΣΕΝΑΠΙΟ 5: Αυξήθηκε το ποσοστό κάλυψης της βλάστησης (το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.15) στην περιοχή ενδιαφέροντος, κατά μία κατηγορία με μέγιστη την κατηγορία 4, κρατώντας όλους τους μετεωρολογικούς παράγοντες αμετάβλητους (προσομοιώνονται οι 4 πρώτες ώρες της πυρκαγιάς).

Το FARSITE προσομοίωσε τις δύο υπό εξέταση πυρκαγιές σύμφωνα με το σενάριο αυτό (Σχήματα 7.55 και 7.56 για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα, αντίστοιχα). Όπως ήταν αναμενόμενο, με την αύξηση του ποσοστού κάλυψης της βλάστησης μειώθηκε η ταχύτητα του μετώπου (εξίσωση 3) και για τις δύο πυρκαγιές, με αποτέλεσμα τη μείωση της καμένης έκτασης. Η καμένη έκταση στην πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά μειώθηκε περίπου 25% ενώ στη Ραφήνα μειώθηκε περίπου 40%, λόγω διαφορετικής καύσιμης ύλης και τοπογραφίας. Παρατηρείται επίσης, ότι η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας αύξησε την τιμή της. Το γεγονός αυτό εξηγείται διότι η αύξηση του ποσοστού κάλυψης της βλάστησης μεγάλωσε το βάρος της διαθέσιμης καύσιμης ύλης, άρα μεγάλωσε η θερμική ένταση μετώπου (εξίσωση 2) με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμικής έντασης αντίδρασης και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας.

ΣΕΝΑΠΙΟ 6: Μειώθηκε το ποσοστό κάλυψης της βλάστησης (το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.15) στην περιοχή ενδιαφέροντος, κατά μία κατηγορία με ελάχιστη την κατηγορία 1, και συγχρόνως μειώνεται η ένταση του ανέμου κατά 35% (προσομοιώνονται οι 4 πρώτες ώρες της πυρκαγιάς).

Προσομοιώθηκαν οι πυρκαγιές στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα σύμφωνα με το σενάριο που εξετάζεται (Σχήματα 7.57 και 7.58 αντίστοιχα). Στο σενάριο αυτό μειώθηκε η ένταση του ανέμου και ταυτόχρονα μειώθηκε το ποσοστό κάλυψης της βλάστησης. Ο πρώτος παράγοντας μειώνει την καμένη έκταση ενώ ο δεύτερος την αυξάνει. Στην πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά η καμένη έκταση αυξήθηκε (περίπου κατά 10%) παρόλο που οι μέγιστες ταχύτητες μετώπου μειώθηκαν διότι οι μέσες τιμές της έντασης του ανέμου αυξήθηκαν. Στην πυρκαγιά της Ραφήνας ο παράγοντας άνεμος ήταν πολύ ισχυρός με αποτέλεσμα να μειωθούν σημαντικά η καμένη έκταση (περίπου 45%) και οι μέγιστες ταχύτητες μετώπου. Αυτό που διαφοροποίησε τις δύο πυρκαγιές όσον αναφορά την καμένη έκταση είναι η τοπογραφία και η ομοιομορφία της βλάστησης. Στην πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά, η βλάστηση ήταν πιο ομοιόμορφη (χρησιμοποιήθηκαν λιγότερα μοντέλα καύσιμης ύλης), επάνω σε μια ομαλή πλαγιά, με αποτέλεσμα να ενισχυθεί η αύξηση της καμένης έκτασης σε αντίθεση με την πυρκαγιά στη Ραφήνα.

ΣΕΝΑΠΙΟ 7: Η βλάστηση στην πυρκαγιά του Νέου Βουτζά αντιπροσωπεύτηκε μόνο από το μοντέλο καύσιμης ύλης 2 (Δασολίβαδα) ενώ για την πυρκαγιά στη Ραφήνα αντιπροσωπεύεται μόνο από το μοντέλο καύσιμης ύλης 122 (Θαμνολίβαδα) (Πίνακας 6.4) και συγχρόνως μειώνεται η ένταση του ανέμου κατά 50% (προσομοιώνονται οι 4 πρώτες ώρες της πυρκαγιάς).

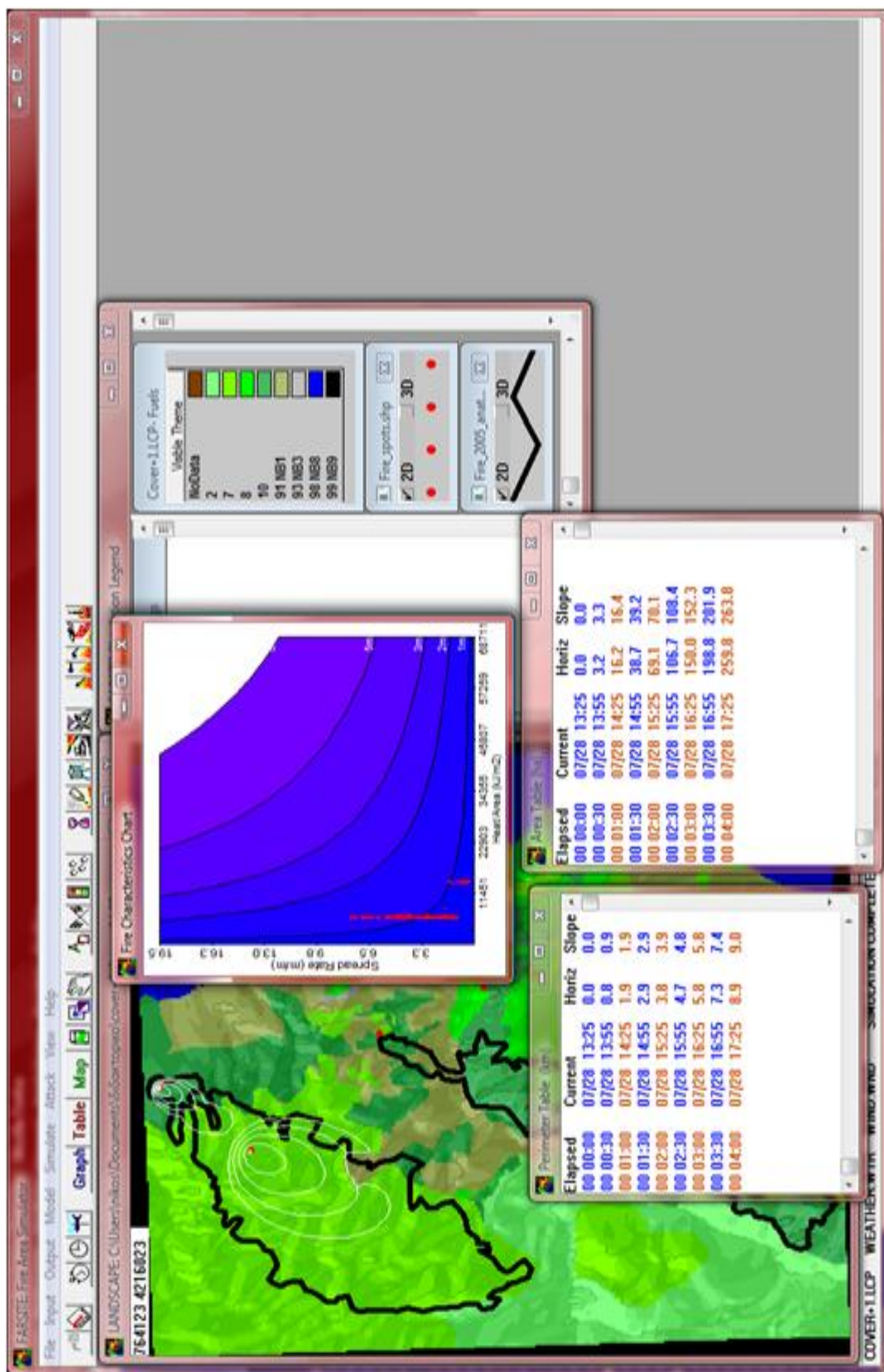
Το FARSITE προσομοίωσε τις πυρκαγιές στο Νέο Βουτζά και στη Ραφήνα σύμφωνα με το παραπάνω σενάριο (Σχήματα 7.59 και 7.60). Στην περίπτωση του σεναρίου αυτού εφαρμόστηκε ένα μοντέλο καύσιμης ύλης σε κάθε μία από τις πυρκαγιές. Η επιλογή των δύο μοντέλων έγινε με σκοπό την προσομοίωση μιας υποβαθμισμένης μελλοντικής βλάστησης. Δημιουργήθηκαν δύο πυρκαγιές με ομοιόμορφη βλάστηση αλλά με διαφορετική τοπογραφία. Παρόλο που η ένταση του ανέμου μειώθηκε στο 50%, η καμένη έκταση για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά μειώθηκε περίπου κατά 30% ενώ στην πυρκαγιά της Ραφήνας μειώθηκε περίπου κατά 55%. Η διαφοροποίηση στα ποσοστά μείωσης των δύο πυρκαγιών εξηγείται διότι παρουσιάζουν διαφορετικά μοντέλα καύσιμης ύλης και διαφορετική τοπογραφία. Στο Νέο Βουτζά η τοπογραφία είναι μια ομαλή πλαγιά χωρίς έντονες κλίσεις, ενώ στη Ραφήνα παρουσιάζει έντονες κλίσεις που σε πολλά σημεία, σε συνδυασμό με τον άνεμο, επιβραδύνει την πυρκαγιά.

ΣΕΝΑΡΙΟ 8: α) Μηδενίστηκε το υψόμετρο, η κλίση, η έκθεση και η ένταση του ανέμου για την πυρκαγιά στη Ραφήνα. β) Μηδενίστηκε μόνο η ένταση του ανέμου, για την πυρκαγιά στη Ραφήνα (προσομοιώνονται οι 4 πρώτες ώρες της πυρκαγιάς και για τις δύο περιπτώσεις).

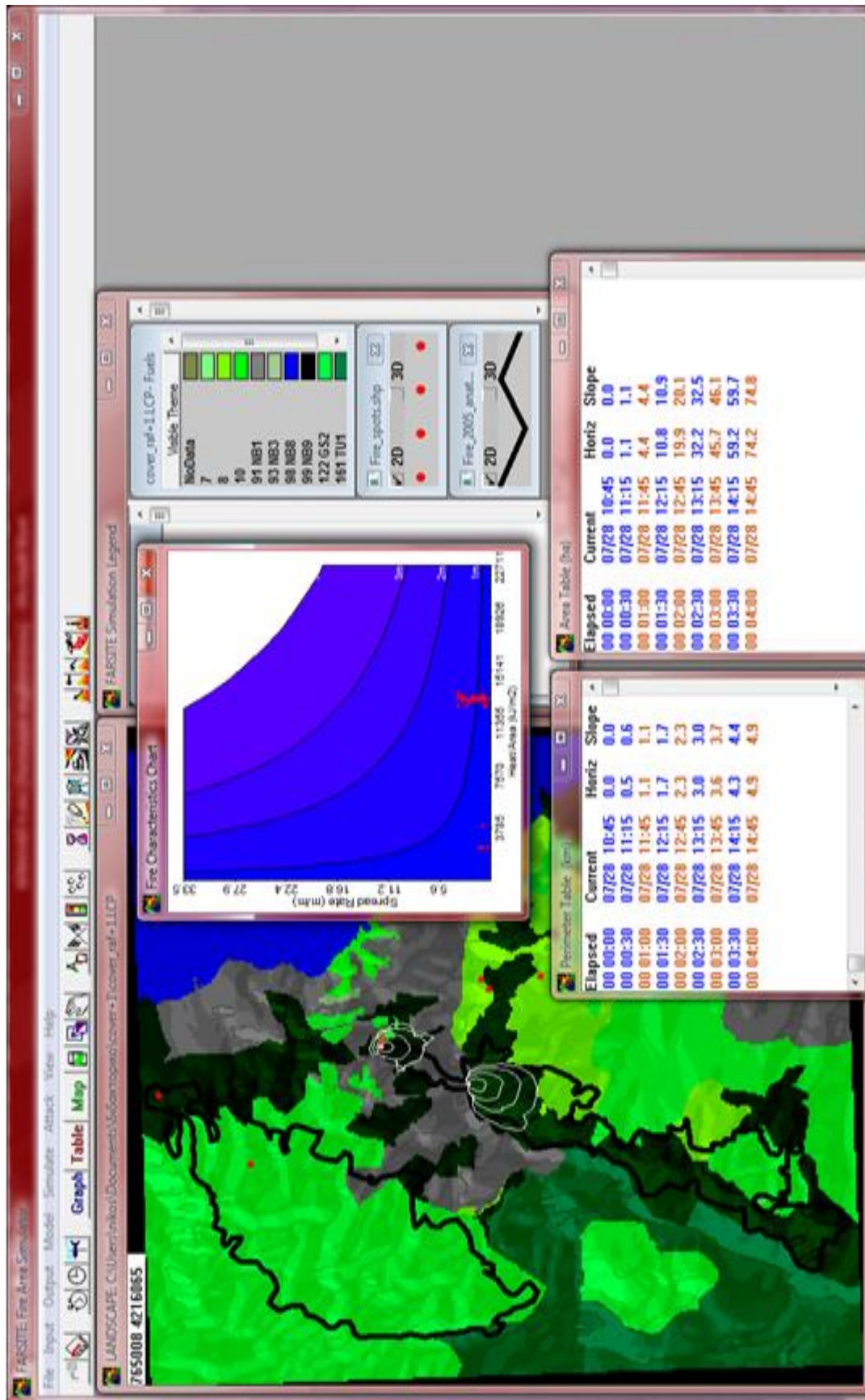
Προσομοιώθηκε η πυρκαγιά στη Ραφήνα σύμφωνα με την πρώτη περίπτωση του σεναρίου αυτού (Σχήμα 7.61). Παρατηρείται ότι οι περίμετροι της καμένης έκτασης της πυρκαγιάς ανά ώρα είναι ομόκεντροι κύκλοι όπως ήταν αναμενόμενο. Προσομοιώθηκε στη συνέχεια η πυρκαγιά στη Ραφήνα σύμφωνα με την δεύτερη περίπτωση του παραπάνω σεναρίου (Σχήμα 7.62). Οι περίμετροι της καμένης έκτασης της πυρκαγιάς ανά ώρα διαφοροποιούνται από τους ομόκεντρους κύκλους της προηγούμενης περίπτωσης όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της επίδρασης της τοπογραφίας η οποία αύξησε την καμένη έκταση σε σχέση με την πρώτη περίπτωση του σεναρίου αυτού κατά 35% περίπου. Η καμένη έκταση και στις δύο περιπτώσεις του σεναρίου που εξετάζεται, έχει μειωθεί πάνω από 95%.

ΣΕΝΑΡΙΟ 9: α) Ο δείκτης προσαρμογής (Adjustment Factor) (υποκεφάλαιο 6.2.3.1) έλαβε την τιμή 1,2 (από την τιμή 1) για το μοντέλο καύσιμης ύλης 7 για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά. β) Ο δείκτης προσαρμογής (Adjustment Factor) έλαβε την τιμή 1,5 για το μοντέλο καύσιμης ύλης 7 για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά. Η μεταβολή του δείκτη προσαρμογής του μοντέλου 7 έγινε διότι είναι το αντιπροσωπευτικότερο της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά αφού κατέχει τη μεγαλύτερη έκταση στην καμένη περιοχή (προσομοιώνονται οι 4 πρώτες ώρες της πυρκαγιάς και για τις δύο περιπτώσεις).

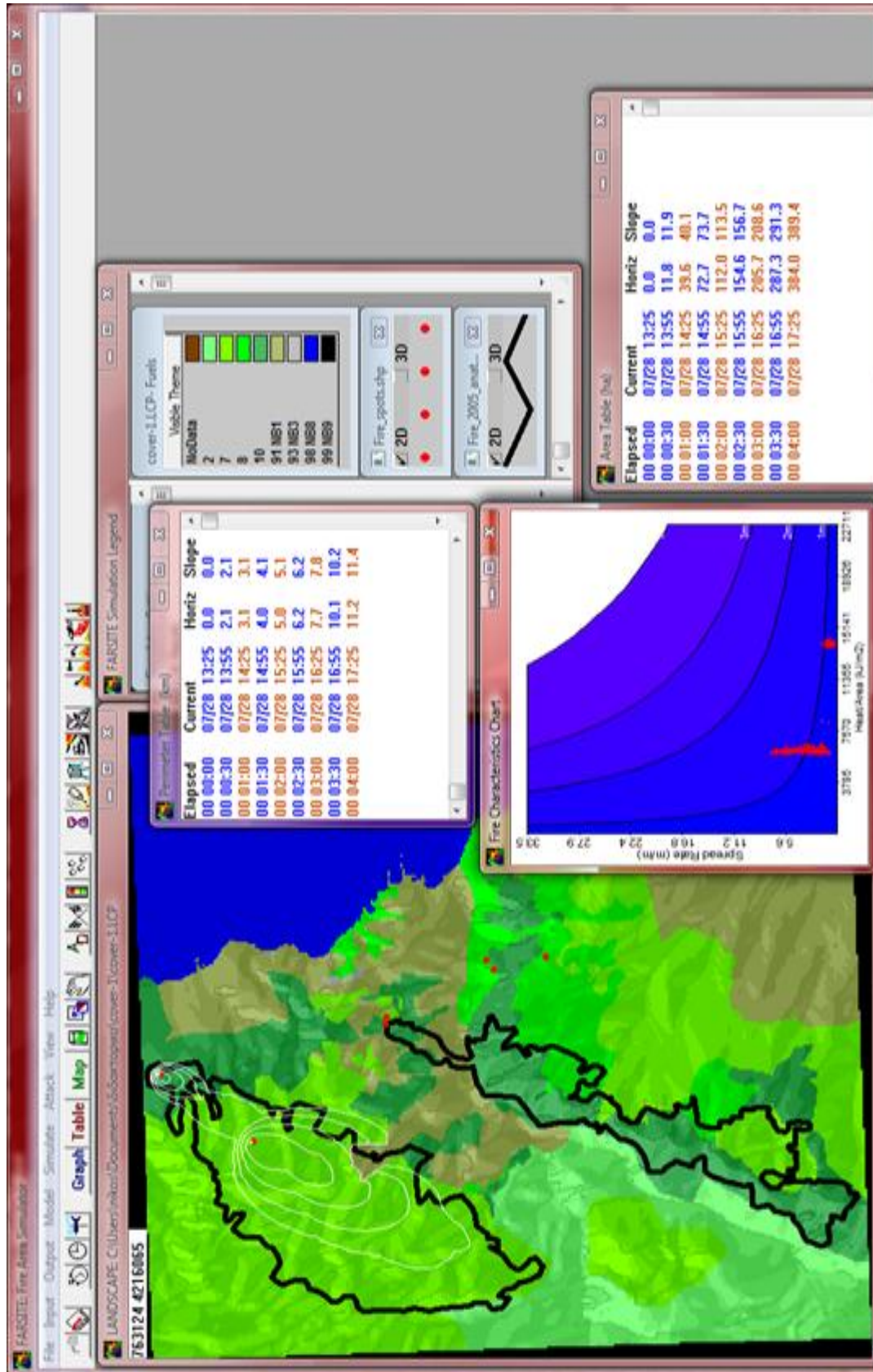
Το FARSITE προσομοίωσε τις δύο περιπτώσεις της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά σύμφωνα με τις συνθήκες του σεναρίου που διερευνάται (Σχήματα 7.63 και 7.64 για τις δύο περιπτώσεις α και β αντίστοιχα. Στο σενάριο αυτό, η αύξηση του δείκτη προσαρμογής αυξάνει την ταχύτητα της προσομοιωμένης πυρκαγιάς και κατά συνέπεια, αυξάνει αρκετά την καμένη έκταση (περίπου 30% στην πρώτη περίπτωση και περίπου 80% στη δεύτερη).



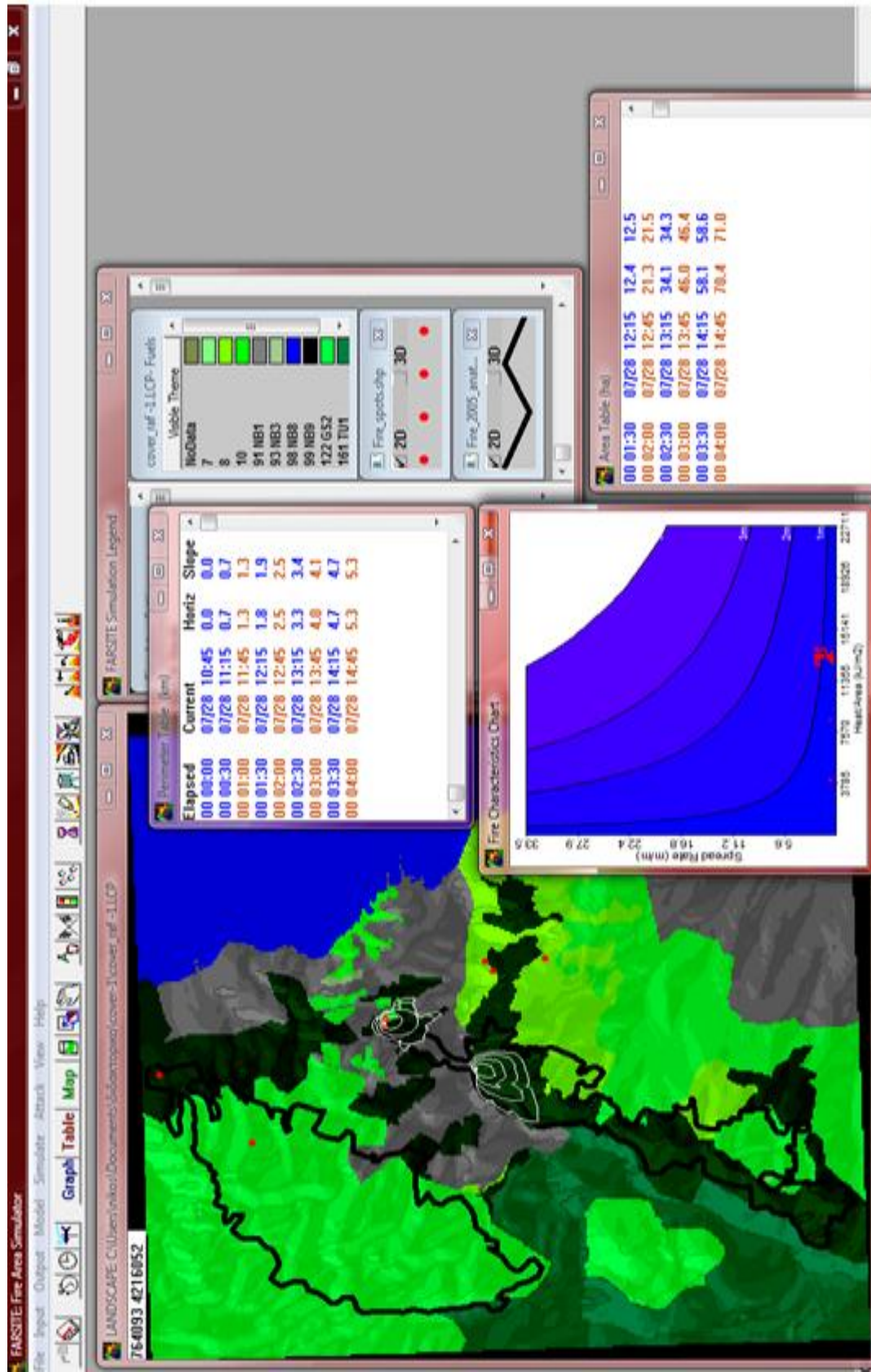
Σχήμα 7.55: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 5 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)



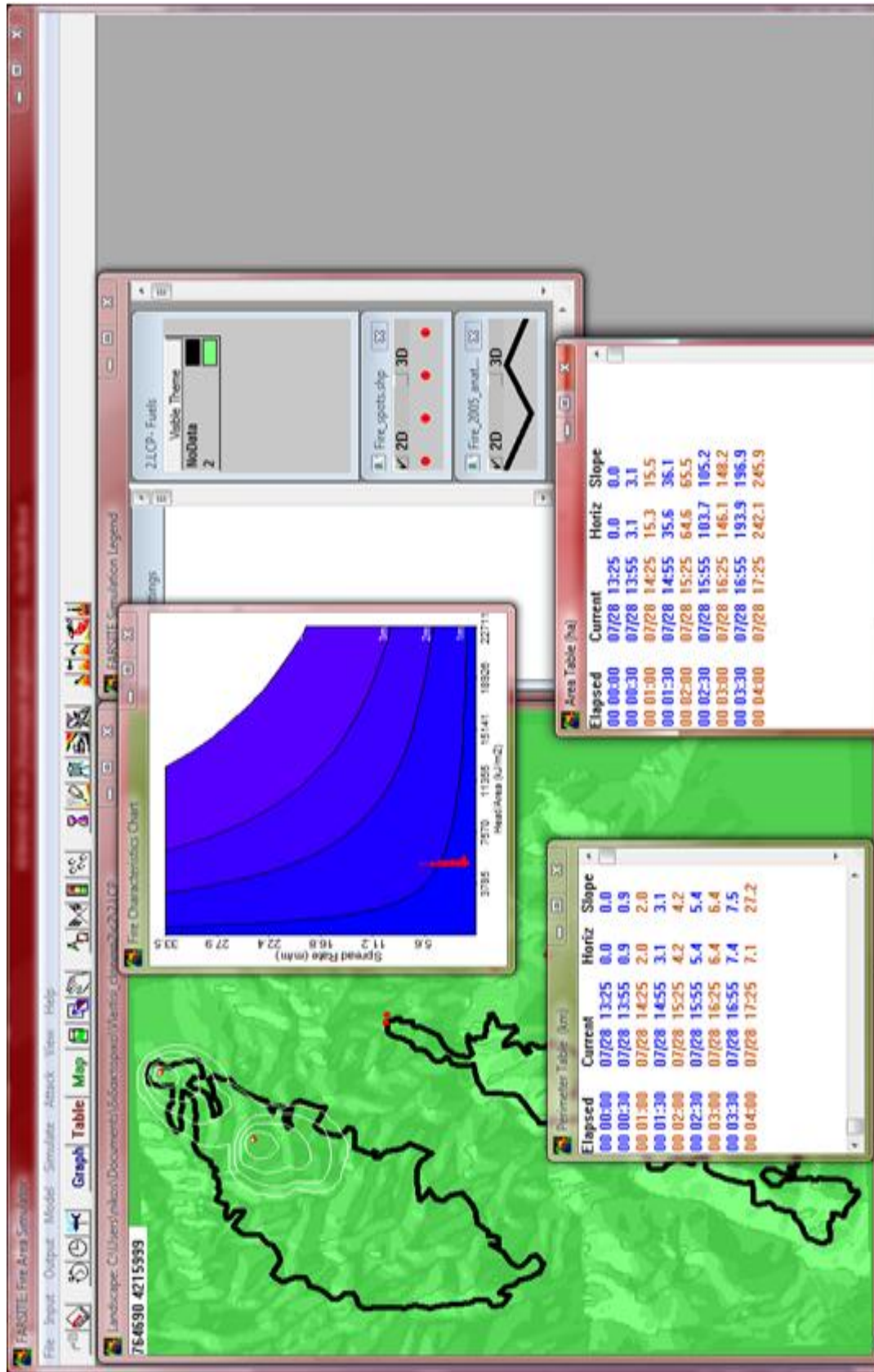
Σχήμα 7.56: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 5 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



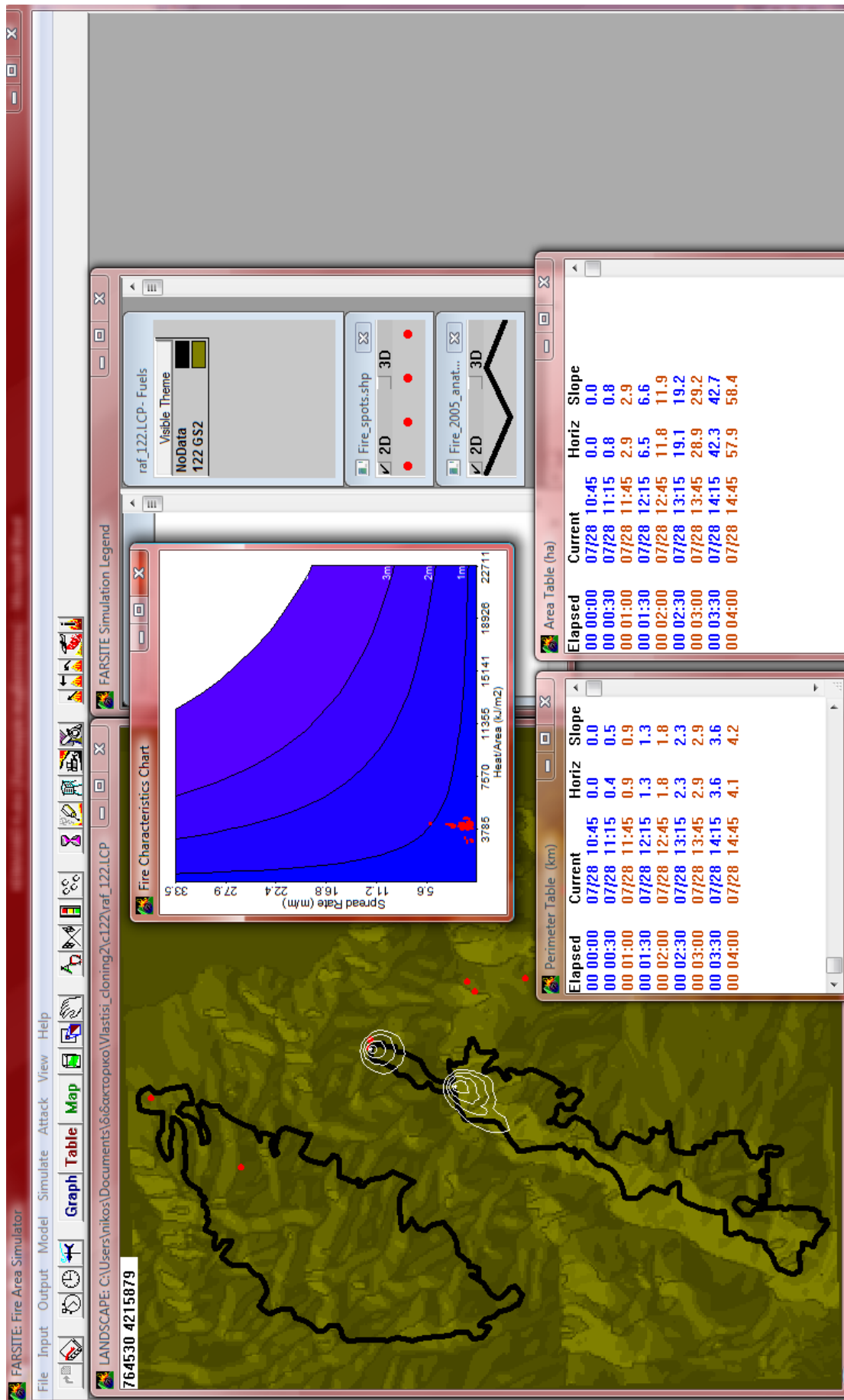
Σχήμα 7.57: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 6 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας



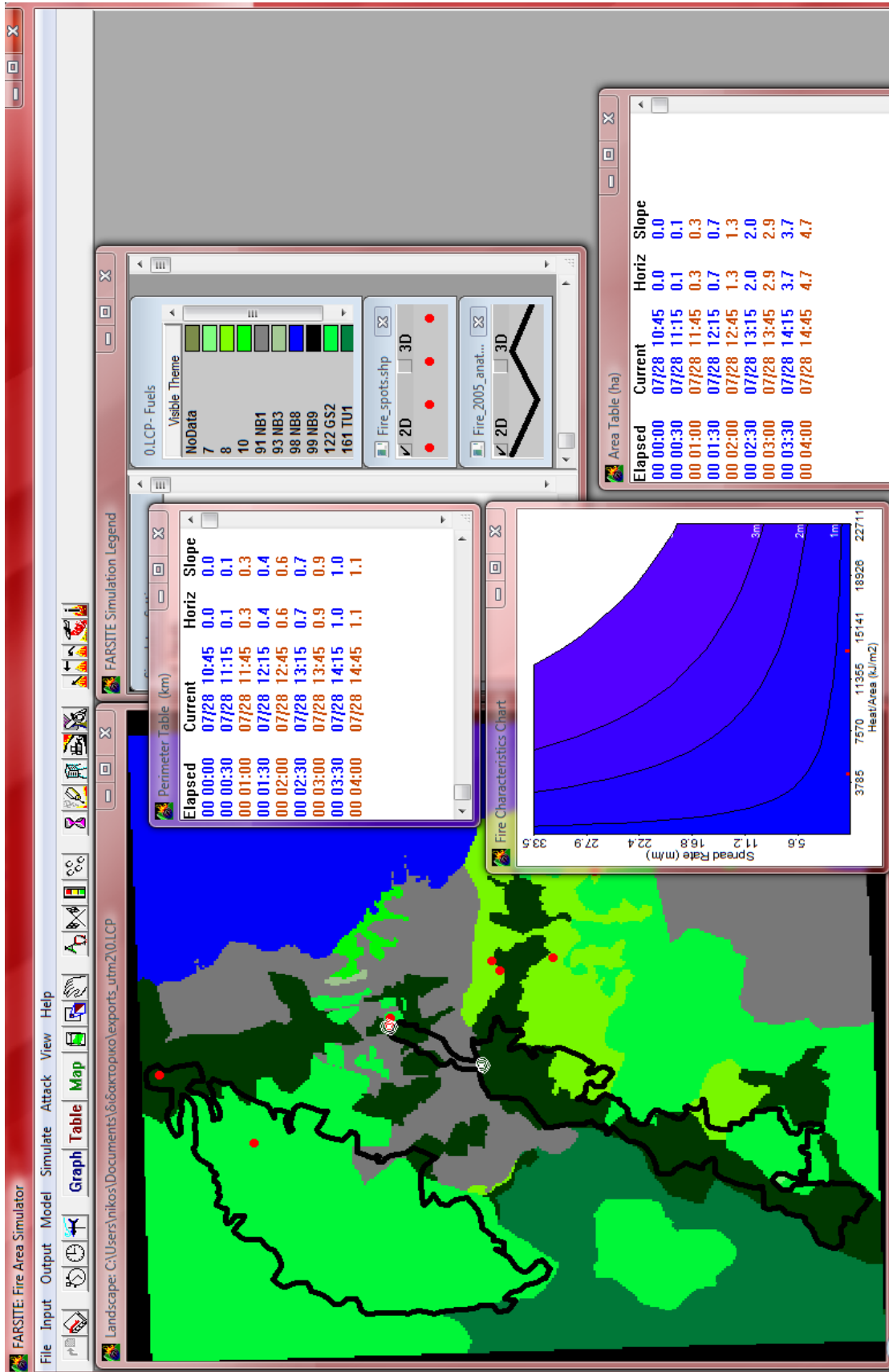
Σχήμα 7.58: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 6 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκκλόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kj/m²)



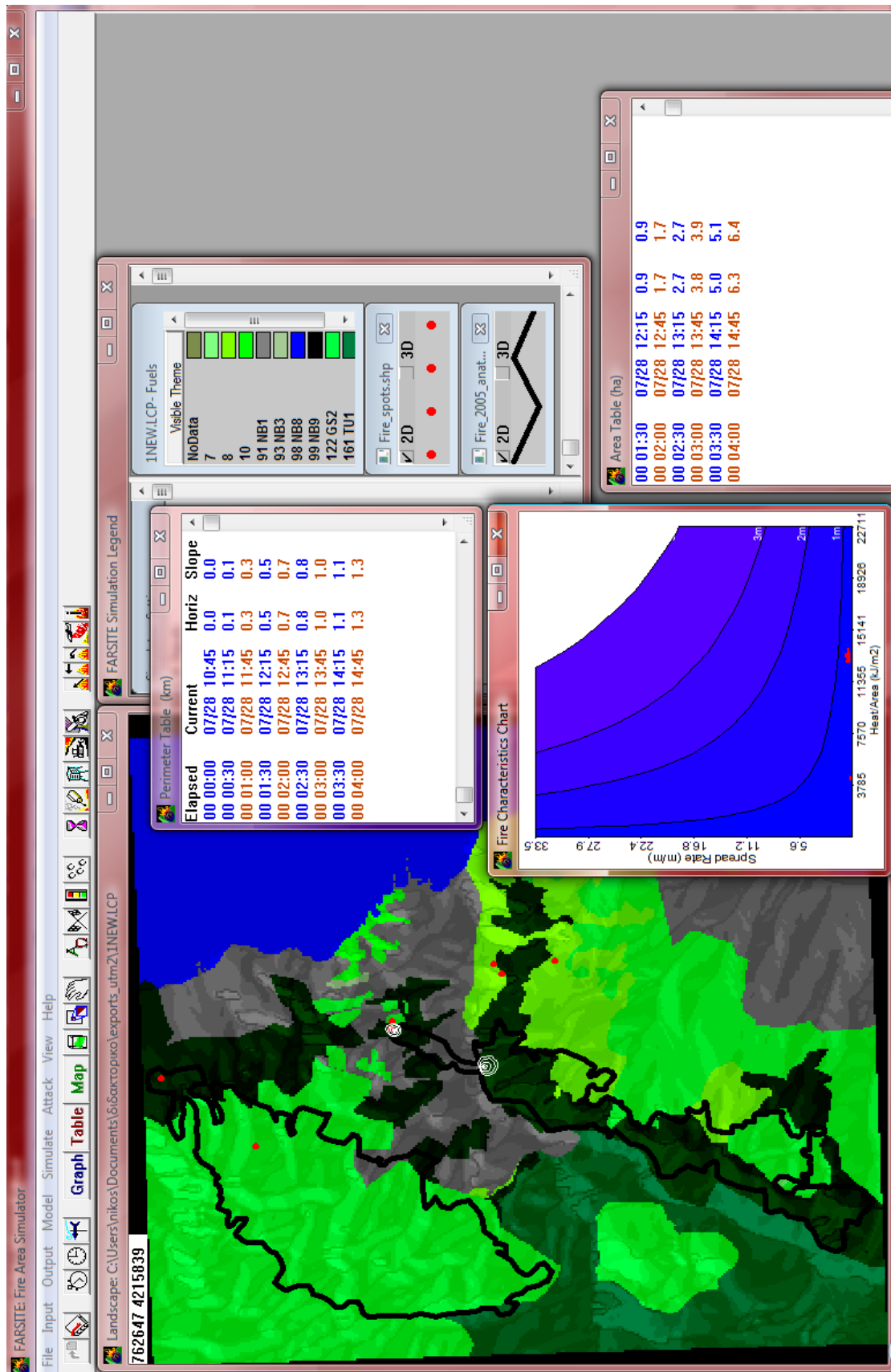
Σχήμα 7.59: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 7 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας



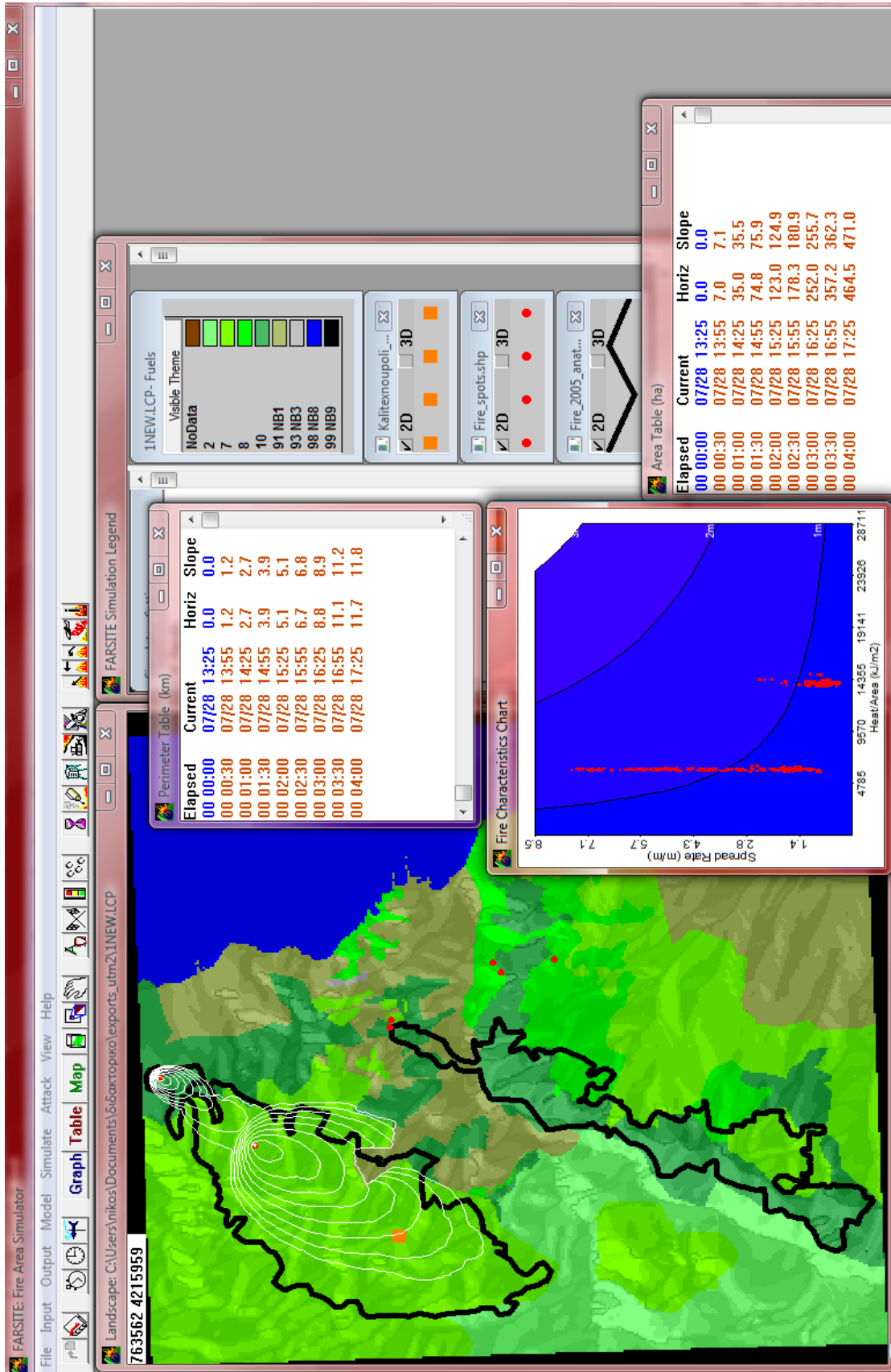
Σχήμα 7.60: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 7 - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



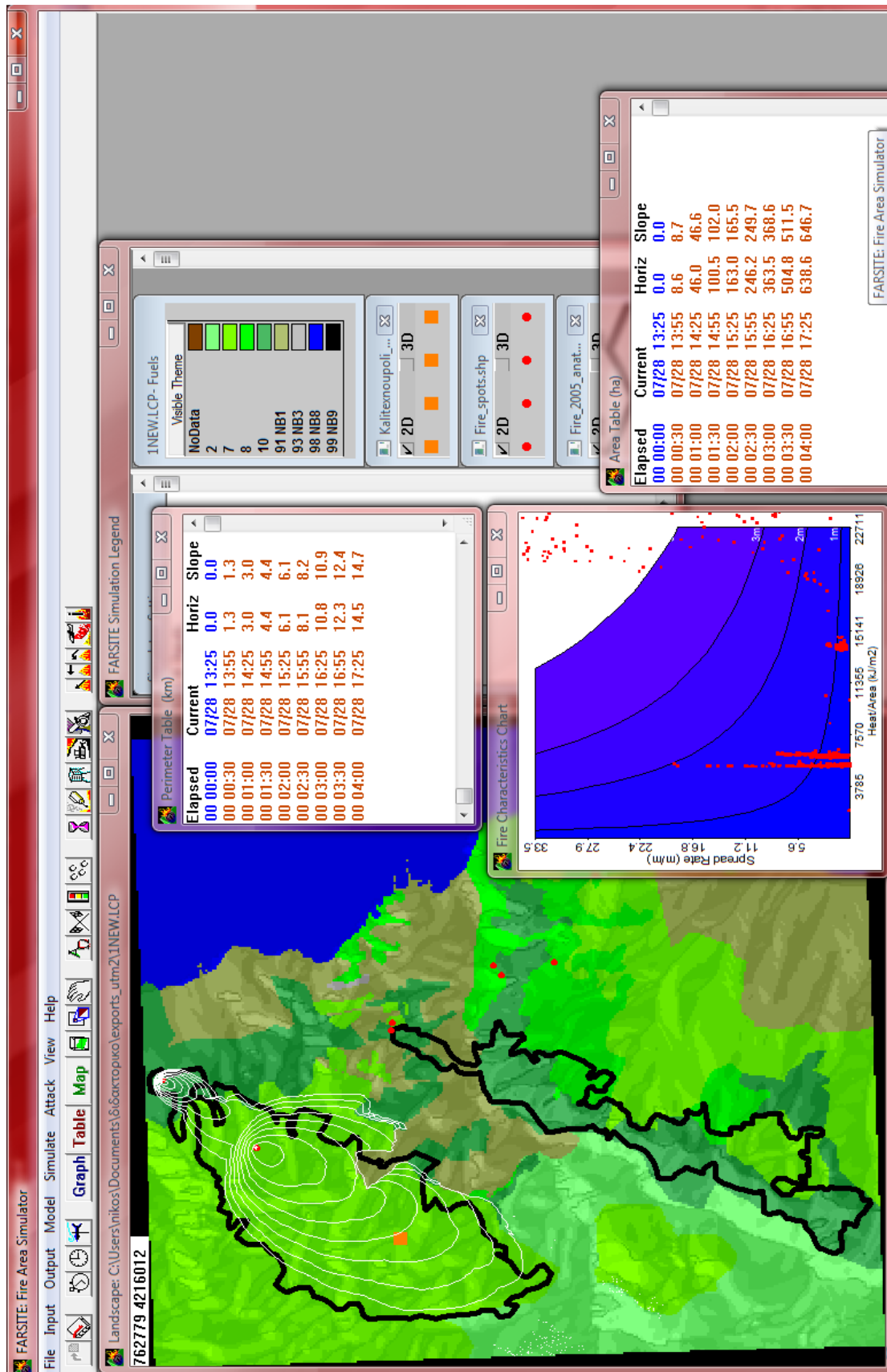
Σχήμα 7.61: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 8α - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



Σχήμα 7.62: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 8β - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



Σχήμα 7.63: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 9α - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



Σχήμα 7.64: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 9β - καμένη έκταση (ha), περίμετρο πυρκαγιάς (km), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)

ΣΕΝΑΡΙΟ 10: Ένα ξηρό ψυχρό μέτωπο διήλθε από την περιοχή της πυρκαγιάς στη Ραφήνα στις 15:00 στις 28 Ιουλίου και επηρέασε τη διεύθυνση των ανέμων (η έντασή τους παραμένει αμετάβλητη) σε ανέμους διεύθυνσης 225° (ΝΔ) λίγο πριν τη διέλευση του μετώπου και σε ανέμους διεύθυνσης 315° (ΒΔ) αμέσως μετά. Διάρκεια προσομοίωσης από 10:45 στις 28/7/2005 έως 18:00 στις 28/7/2005. Τα σημεία έναρξης των πυρκαγιών παραμένουν σταθερά.

Το FARSITE προσομοίωσε την πυρκαγιά στο σενάριο αυτό (Σχήμα 7.65). Η καμένη έκταση στη περίπτωση που εξετάζεται αυξήθηκε περίπου 10% σε σχέση με την πυρκαγιά της Ραφήνας στο Τεστ 2 (Σχήματα 7.35α και 7.35β).

ΣΕΝΑΡΙΟ 11: Ένα ξηρό θερμό μέτωπο διήλθε από την περιοχή της πυρκαγιάς του Νέου Βουτζά στις 17:00 στις 28 Ιουλίου και επηρέασε τη διεύθυνση των ανέμων (η έντασή τους παραμένει αμετάβλητη) σε ανέμους διεύθυνσης 135° (ΝΑ) λίγο πριν τη διέλευση του μετώπου και σε ανέμους διεύθυνσης 225° (ΝΔ) αμέσως μετά. Διάρκεια προσομοίωσης από 13:25 στις 28/7/2005 έως 20:00 στις 28/7/2005. Τα σημεία έναρξης των πυρκαγιών παραμένουν σταθερά.

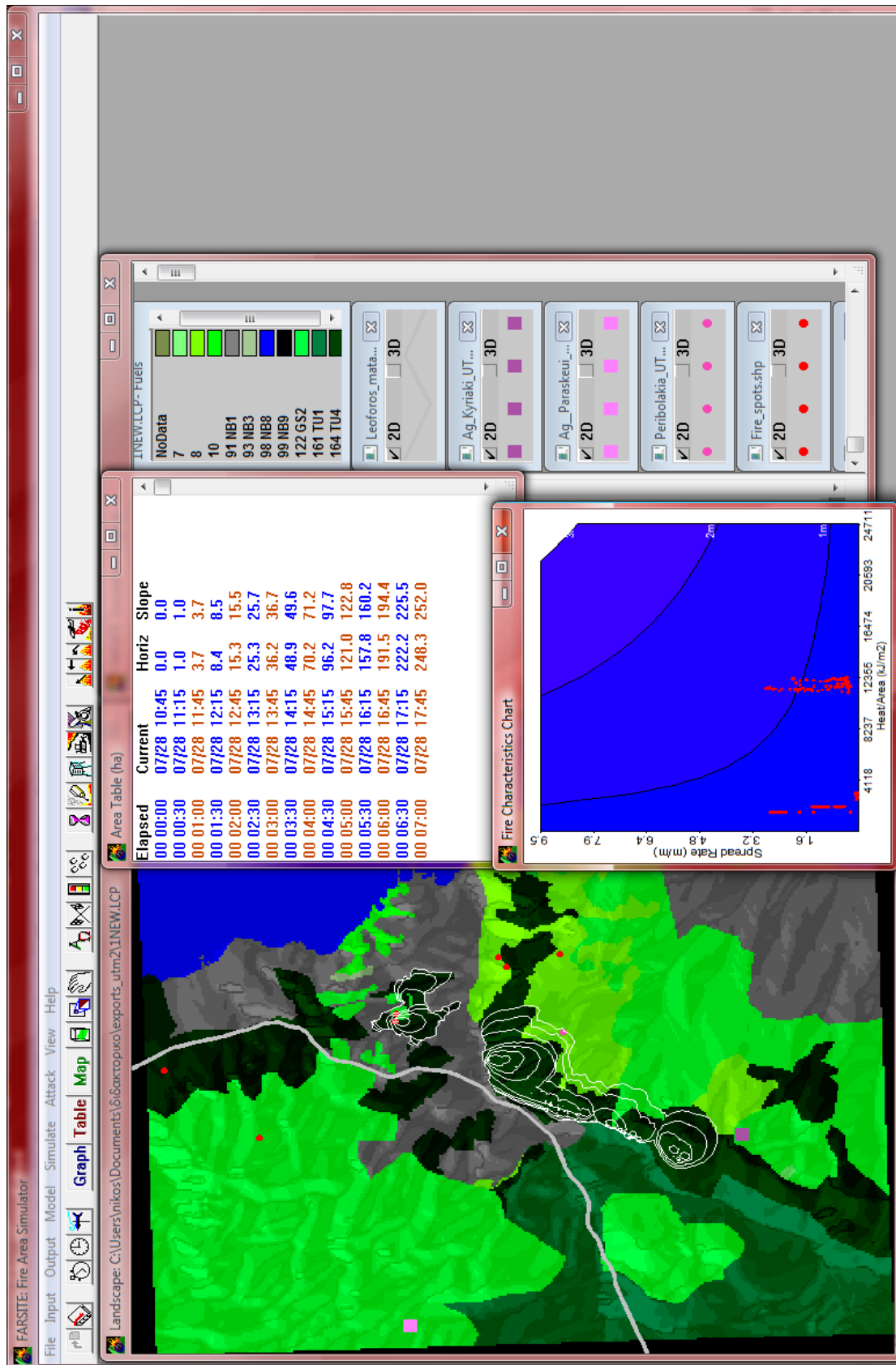
Το FARSITE προσομοίωσε την πυρκαγιά στο παραπάνω σενάριο (Σχήμα 7.66). Η καμένη έκταση στη περίπτωση αυτή μειώθηκε περίπου 25% σε σχέση με την πυρκαγιά του Νέου Βουτζά στο Τεστ 1 (Σχήματα 7.31α και 7.31β).

ΣΕΝΑΡΙΟ 12: Ο Ετησίας εξασθενεί και στις 16:00 στις 28 Ιουλίου εμφανίζεται θαλάσσια αύρα {άνεμος διεύθυνσης 90° (Α) } επηρεάζοντας την πυρκαγιά στη Ραφήνα διότι είναι πιο κοντά στη ακτή. Η ένταση των ανέμων παραμένει αμετάβλητη. Διάρκεια προσομοίωσης από 10:45 στις 28/7/2005 έως 18:00 στις 28/7/2005. Τα σημεία έναρξης των πυρκαγιών παραμένουν σταθερά.

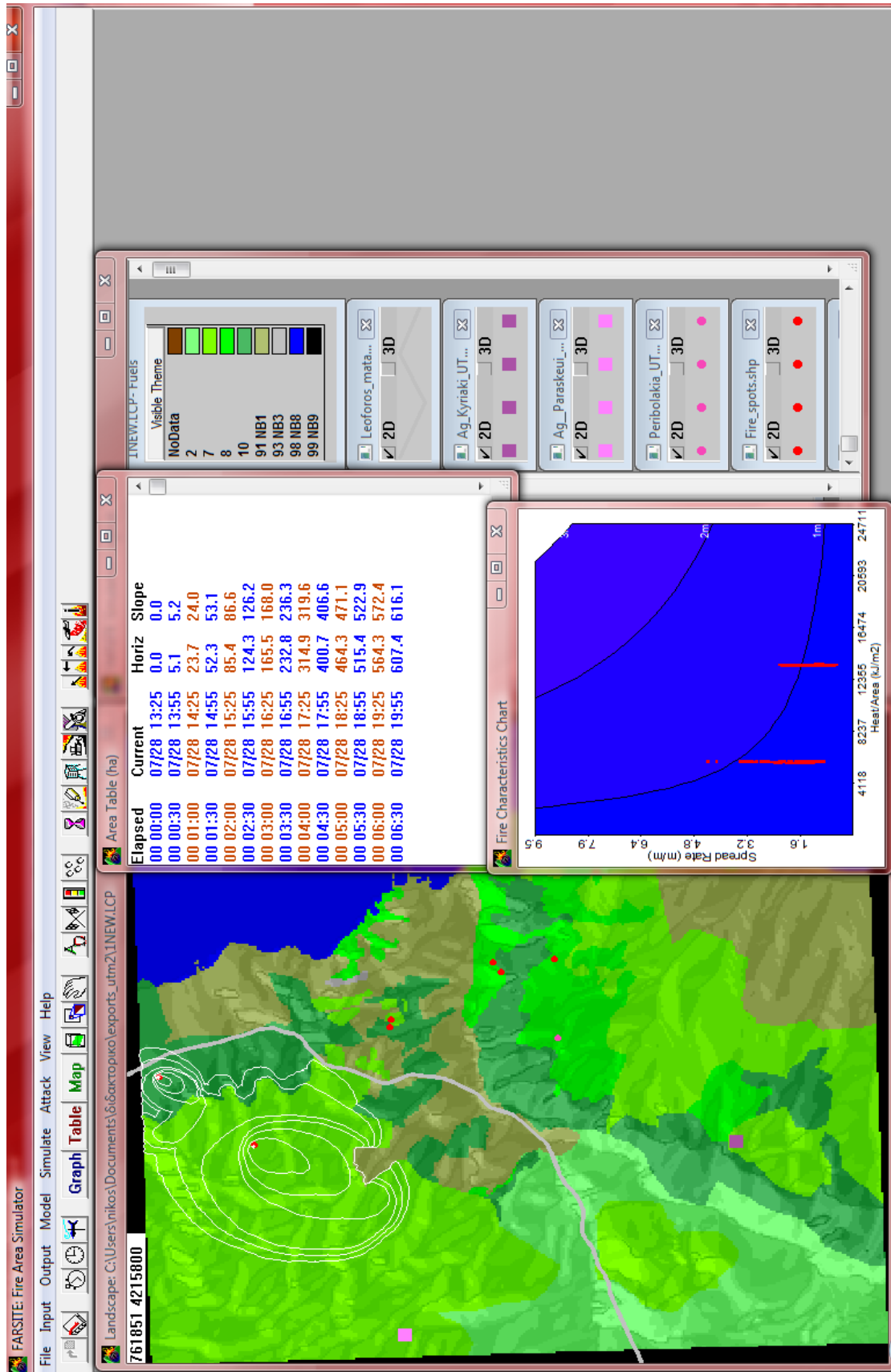
Σύμφωνα με το σενάριο αυτό, η πυρκαγιά προσομοιώθηκε από το μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE (Σχήμα 7.67). Η καμένη έκταση στην περίπτωση αυτή μειώθηκε περίπου 25% σε σχέση με την πυρκαγιά της Ραφήνας στο Τεστ 2 (Σχήματα 7.35α και 7.35β).

Στα Σενάρια 10, 11 και 12, αυτό που εξετάστηκε δεν είναι τόσο η διαφοροποίηση της καμένης έκτασης ή της ταχύτητας μετώπου και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας. Εξετάστηκε η μεταβολή της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς λόγω αλλαγής της διεύθυνσης των κυρίαρχων ανέμων της περιοχής εξαιτίας κάποιων φαινομένων. Έτσι, με κάθε αλλαγή του πνέοντος ανέμου, αλλάζει απότομα προς την κατεύθυνση του ανέμου η κίνηση της πυρκαγιάς, αυξάνοντας το μήκος του μετώπου (αφού οι πλευρές της μετατρέπονται σε ενεργά μέτωπα), με αποτέλεσμα την αύξηση της επικινδυνότητας και της δυσκολίας κατάσβεσης. Επιπροσθέτως, οι ταχύτητες μετώπου και στα τρία τελευταία σενάρια που εξετάστηκαν, ήταν μικρότερες από αυτές που είχαν προσομοιωθεί για τις δύο πυρκαγιές, σύμφωνα με τις συνθήκες της 28^{ης} Ιουλίου του 2005. Παρόλα αυτά η καμένη

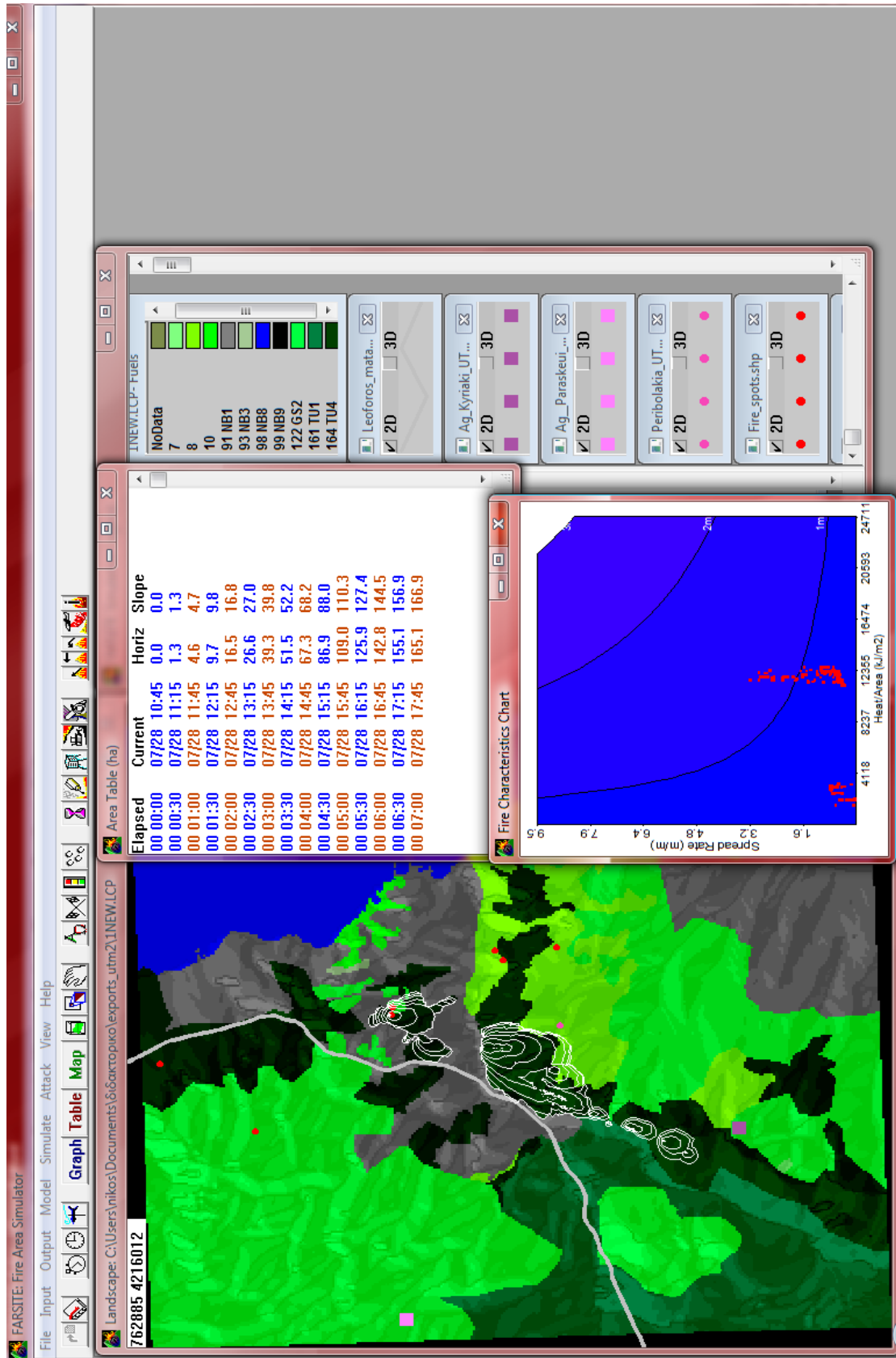
έκταση αυξήθηκε στο Σενάριο 10 γιατί, όπως προαναφέρθηκε, αυξήθηκε το μήκος του μετώπου. Στο Σενάριο 11 η καμένη έκταση μειώθηκε παρόλο που αυξήθηκε το μήκος μετώπου, διότι η πυρκαγιά εισήλθε σε πιο πυκνή βλάστηση με αποτέλεσμα να μειωθεί η ταχύτητά της (Σχήμα 7.66). Ενώ στο Σενάριο 12, παρόλο που το μήκος μετώπου αυξήθηκε η καμένη έκταση μειώθηκε, διότι η πυρκαγιά στο βόρειο τμήμα της κινήθηκε υπό την επίδραση της θαλάσσιας αύρας δυτικά σε περιοχές με απουσία καύσιμης ύλης (Σχήμα 7.67).



Σχήμα 7.65: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 10 - καμένη έκταση (ha), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλύμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



Σχήμα 7.66: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 11 - καμένη έκταση (ha), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)



Σχήμα 7.67: Αποτελέσματα προσομοίωσης της πυρκαγιάς στη Ραφήνα για τις τέσσερις (4) πρώτες ώρες έναρξής της, υπό την επίδραση του σεναρίου 12 - καμένη έκταση (ha), καθώς και διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης (m/min) και εκλύμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Σημαντικός στόχος της παρούσας διατριβής ήταν το πώς οι μετεωρολογικοί παράγοντες επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς σε μια περιοχή μελέτης. Στην κατεύθυνση αυτή, επιλέχθηκε ως περιοχή ενδιαφέροντος η περιοχή της ανατολικής Αττικής, με τη μεγάλη οικιστική ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Στο πρόβλημα της ανάλυσης της συμπεριφοράς μιας δασικής πυρκαγιάς, μελετήθηκαν δύο παράλληλες περιστατικές πυρκαγιές που εξαπλώθηκαν σχεδόν ταυτόχρονα, με καταστροφικά αποτελέσματα στην περιοχή της Ραφήνας και του Νέου Βουτζά, στις 28 Ιουλίου του 2005. Για την προσομοίωση των πυρκαγιών χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE. Για την εύρεση των μετεωρολογικών παραμέτρων στην περιοχή των πυρκαγιών χρησιμοποιήθηκε το ατμοσφαιρικό μοντέλο RAMS και ο μετεωρολογικός σταθμός του αεροδρομίου «Ελ. Βενιζέλος».

Συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό των μετεωρολογικών παραμέτρων και κυρίως του ανέμου χρησιμοποιήθηκε το υψηλής ανάλυσης ατμοσφαιρικό μοντέλο RAMS τεσσάρων (4) πλεγμάτων, με πλέγμα υψηλότερης ανάλυσης ενός (1) km. Το RAMS έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει με ανάλυση μερικών δεκάδων μέτρων, αλλά λόγω της περιορισμένης υπολογιστικής ισχύος περιοριστήκαμε στην ανάλυση ενός (1) km. Το RAMS προσομοίωσε τον άνεμο και τη θερμοκρασία των δύο παράλληλων πυρκαγιών, με επιτυχία στην περιοχή ενδιαφέροντος, σύμφωνα με τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού του αεροδρομίου «Ελ. Βενιζέλος» και των αποτελεσμάτων του μοντέλου πυρκαγιάς FARSITE, όπως αναφέρουν για το πεδίο ανέμου και οι Gómez-Tejedor et al. (1999). Η αξιοποίηση του RAMS επιτρέπει να υπολογίσουμε την ένταση του ανέμου στο πεδίο των πυρκαγιών, και όχι μέσω μετεωρολογικών σταθμών οι οποίοι συνήθως δεν είναι κοντά στα πεδία των πυρκαγιών με αποτέλεσμα να μετρούν τον άνεμο και τους άλλους μετεωρολογικούς παράγοντες με διαφορετικές τιμές από τις πραγματικές (Forthofer et al. 2003). Είναι αποδεκτό ότι όσο αυξάνει η ανάλυση και η ακρίβεια του πεδίου ανέμου τόσο αυξάνει η ακρίβεια των προσομοιώσεων (Hanson et al. 2000). Όμως τα ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόγνωσης του ανέμου, όσο υψηλή ανάλυση και αν διαθέτουν, δεν είναι ικανά να υπολογίσουν τη μεταβολή στο πεδίο του ανέμου που η ίδια η πυρκαγιά προκαλεί (Albini and Baughman 1979). Επίσης οι μετεωρολογικοί σταθμοί μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου σε ύψος 10 m και όχι στο ύψος της μέσης φλόγας που επηρεάζει την ταχύτητα της πυρκαγιάς.

Η προσομοίωση των πυρκαγιών πραγματοποιήθηκε με το FARSITE. Ο προσομοιωτής εξάπλωσης πυρκαγιάς FARSITE δημιουργήθηκε για να προσομοιώνει

προδιαγεγραμμένες πυρκαγιές μεγάλων διαστάσεων. Βασίζεται στο ημι-εμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης πυρκαγιάς που αναπτύχθηκε από το Rothermel το 1972, το οποίο βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας (Rothermel 1972). Το μοντέλο του Rothermel παρέχει μια καλή προσέγγιση της ταχύτητας της πυρκαγιάς μόνο στις συνθήκες που αναπτύχθηκε και βαθμονομήθηκε. Η διαμόρφωση του μοντέλου βασίστηκε σε μια σειρά από πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο προσομοιώνοντας μικρές πυρκαγιές σε ομογενές πεδίο νεκρών καυσίμων (van Wagtendonk 1996, Zhou et al. 2005a). Στην πραγματικότητα όμως, τα καύσιμα δεν είναι ούτε ομογενή ούτε έχουν σταθερή υγρασία. Αποτελούνται από διάφορα είδη νεκρών και ζωντανών καυσίμων με διαφορετικές υγρασίες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα μοντέλα πυρκαγιάς να αδυνατούν να προσομοιώσουν με επιτυχία την ταχύτητα της πυρκαγιάς, ιδίως όταν πρόκειται για μεγάλες πυρκαγιές (Albini and Baughman 1979, van Wagtendonk 1996, Andrews and Queen 2001, Fernandes 2001, Zhou et al. 2005b).

Πολλοί συγγραφείς δε συνιστούν τη χρήση του μοντέλου του Rothermel σε πυρκαγιές με μεσογειακή βλάστηση λόγω της πολυπλοκότητας και ανομοιομορφίας των καυσίμων, της κυριαρχίας των ζωντανών καυσίμων και ιδιαίτερα των θάμνων που είναι εξαιρετικά εύφλεκτοι εξαιτίας της χαμηλής υγρασίας και της υψηλής συγκέντρωσης πτητικών ουσιών (Zhou et al. 2005b). Αρκετοί συγγραφείς πιστεύουν ότι η ακρίβεια των προσομοιώσεων του μοντέλου του Rothermel στη μεσογειακή βλάστηση είναι μικρή και η βαθμονόμησή του είναι δύσκολη. Όμως η ακρίβεια των προσομοιώσεων αυξάνεται με την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου καύσιμης ύλης και την ακρίβεια των μετεωρολογικών παραμέτρων, κυρίως του ανέμου (Arca et al. 2007). Επιπροσθέτως, είναι γεγονός ότι στις μεγάλης έντασης πυρκαγιές η κατάσταση της βλάστησης έχει μικρότερη σημασία από το είδος της καύσιμης ύλης, την τοπογραφία και τον καιρό (Arca et al. 2007).

Ακολουθώντας τα προαναφερθέντα, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε το σύστημα προσομοίωσης πυρκαγιάς FARSITE για να προσομοιώσει δύο σχεδόν ταυτόχρονες πυρκαγιές που ξέσπασαν σε μεσογειακή βλάστηση κοντά σε κατοικημένες περιοχές. Επειδή, όπως έχει αναφερθεί, το FARSITE βασίζεται στο μοντέλο του Rothermel το οποίο αναπτύχθηκε σε διαφορετικές συνθήκες βλάστησης από το μεσογειακό περιβάλλον, χρειάστηκε η εύρεση των κατάλληλων μοντέλων καύσιμης ύλης για τη συγκεκριμένη περιοχή. Επομένως έγιναν κάποια τεστ (δοκιμές) για την εύρεση των αντιπροσωπευτικότερων μοντέλων βλάστησης.

Αρχικά ψηφιοποιήθηκε ο ορθοφωτοχάρτης των χρήσεων γης διακριτικής ικανότητας 1:20.000 του 1991, από την Διεύθυνση Δασικών Ερευνών, για την εξαγωγή των μοντέλων καύσιμης ύλης που ανταποκρίνονται στην περιοχή της Ανατολικής Αττικής. Η αντιστοίχιση των μοντέλων καύσιμης ύλης στη δεδομένη βλάστηση παρουσιάστηκε στον Πίνακα 6.1. Επειδή η προσαρμογή των μοντέλων καύσιμης ύλης στη βλάστηση της περιοχής μελέτης, όπως αποτυπώθηκε 14 χρόνια πριν τις πυρκαγιές που εξετάστηκαν, δεν ανταποκρίνεται στην

πραγματικότητα (αλλαγή χρήσης γης, πυρκαγιές κλπ.), αντιστοιχήθηκαν ξανά τα μοντέλα καύσιμης ύλης με φωτοερμηνεία της περιοχής μελέτης με χρήση δορυφορικής εικόνας Quickbird του 2004.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν συγκεκριμένα τεστ για τη βαθμονόμηση του FARSITE στην περιοχή μελέτης. Προσομοιώθηκαν οι πυρκαγιές στη Ραφήνα και στο Νέο Βουτζά χρησιμοποιώντας τα εξής μοντέλα καύσιμης ύλης: 2, 7, 8 και 10 (Anderson 1982) – Τεστ 1, στην συνέχεια τα μοντέλα καύσιμης ύλης: 8, 122 και 164 (Scott & Burgan 2005) – Τεστ 2 και στο τέλος τα μοντέλα καύσιμης ύλης: 243 (7) και 312 (10) (Corine) – Τεστ 3. Το FARSITE προσομοίωσε την καμένη περιοχή στην πυρκαγιά της Ραφήνας στο 34,14% της πραγματικής καμένης έκτασης για το Τεστ 1, στο 62,93% για το Τεστ 2 και στο 53,77% για το Τεστ CORINE (Σχήμα 7.42). Επίσης, προσομοίωσε την καμένη περιοχή στην πυρκαγιά του Νέου Βουτζά στο 96,22% της πραγματικής καμένης έκτασης για το Τεστ 1, στο 35,6% για το Τεστ 2 και στο 29,49% για το Τεστ CORINE (Σχήμα 7.43). Επομένως, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων προκύπτει ότι το FARSITE προσομοιώνει την πραγματική καμένη έκταση καλύτερα με τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 2 για την πυρκαγιά στη Ραφήνα και με τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 1 για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά (Ηλιόπουλος κ.α. 2010).

Για τον έλεγχο της ακρίβειας των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ο μη συμμετρικός στατιστικός δείκτης Sørensen (SC), ο οποίος μετράει την ομοιότητα μεταξύ της πραγματικής και προσομοιωμένης καμένης έκτασης (Bachisio Arca et al. 2007). Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 (όσο πιο κοντά στην τιμή 1 τόσο μεγαλύτερη η ομοιότητα). Για την πυρκαγιά της Ραφήνας υπολογίστηκε ο SC ως εξής: 0,35, 0,58 και 0,58 για τα Τεστ 1, 2 και CORINE, αντίστοιχα (Πίνακας 7.4). Για την πυρκαγιά του Νέου Βουτζά ο SC υπολογίστηκε ομοίως ως εξής: 0,75, 0,46 και 0,45 για τα Τεστ 1, 2 και CORINE, αντίστοιχα (Πίνακας 7.5) με το τεστ χ^2 να δείχνει μια σημαντική ομοιότητα της προσομοιωμένης και της πραγματικής καμένης έκτασης με στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,01$. Άρα, σύμφωνα με το δείκτη SC, για την πυρκαγιά στη Ραφήνα, η πραγματική και η προσομοιωμένη καμένη έκταση έχουν μεγαλύτερη ομοιότητα, όταν το FARSITE χρησιμοποιεί τα μοντέλα καύσιμης ύλης των Τεστ 2 και 3 (SC = 0,58), ενώ για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά όταν το FARSITE χρησιμοποιεί τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 1 (SC = 0,75) (Ηλιόπουλος κ.α. 2010). Για τις προσομοιώσεις της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 1 διότι παρουσιάζουν μεγαλύτερο SC (0,75) από τα μοντέλα καύσιμης ύλης των άλλων Τεστ. Για τις προσομοιώσεις της πυρκαγιάς στη Ραφήνα, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 2 και όχι του Τεστ CORINE, διότι, παρόλο που παρουσιάζουν και τα δύο τον μεγαλύτερο SC (0,58), τα μοντέλα καύσιμης ύλης του Τεστ 2 παρουσιάζουν καλύτερη προσομοίωση της καμένης περιοχής (62,93%). Το FARSITE προσομοίωσε καλύτερα την καμένη έκταση της πυρκαγιάς στο Νέο Βουτζά από αυτήν της

Ραφήνας διότι η τελευταία είχε μεγαλύτερη ανομοιογένεια στην καύσιμη ύλη και πιο σύνθετη τοπογραφία (Σχήματα 6.14, 7.33 και 7.36).

Στοιχεία που επηρέασαν τη διαδικασία, ήταν το γεγονός ότι οι δυνάμεις δασοπυρόσβεσης διαφοροποίησαν τη συμπεριφορά των υπό εξεταζόμενων πυρκαγιών με μη προσδιορισμένο τρόπο αφού δεν υπάρχει καταγεγραμμένος ο επιχειρησιακός έλεγχος της πυρκαγιάς. Αντιθέτως, στις μεγάλες πυρκαγιές του 2007 στην Ελλάδα λόγω των πολλών και μεγάλων πυρκαγιών οι πυροσβεστικές δυνάμεις σε αρκετές περιπτώσεις, δε διαφοροποίησαν σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά των πυρκαγιών (Αθανασίου και Ξανθόπουλος 2009, Athanasiou and Xanthopoulos 2010). Ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να αναφερθεί είναι ότι στην πυρκαγιά της Ραφήνας, μετά την οδό Αρίωνος δηλώθηκε σημείο έναρξης πυρκαγιάς (Σχήμα 6.3), χωρίς να έχει εντοπιστεί από τη Διεύθυνση Αντιμετώπισης Εγκλημάτων Εμπρησμού (Δ.Α.Ε.Ε.) της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας (Σχήμα 7.36), ύστερα από μαρτυρίες για νέα εστία. Επίσης, το ατμοσφαιρικό μοντέλο RAMS δεν λαμβάνει υπόψη του τη μεταβολή των μετεωρολογικών παραγόντων και κυρίως του ανέμου που η ίδια η πυρκαγιά προκαλεί. Τέλος, το RAMS, όπως και οι μετρήσεις του μετεωρολογικού σταθμού του αεροδρομίου «Ελ. Βενιζέλος», δεν προσομοίωσε τον άνεμο στο ύψος της μέσης φλόγας, ύψος που επηρεάζει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς.

Στην παρούσα διατριβή, εκτός από την πρόγνωση των μετεωρολογικών παραγόντων που επηρεάζουν μια δασική πυρκαγιά (πυρο-μετεωρολογία) σε κλίμακα τοπίου και την περιγραφή του πεδίου της εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς σε επιχειρησιακό επίπεδο, σημαντικός στόχος ήταν η διερεύνηση του βαθμού που η κλιματική αλλαγή στη χώρα μας επηρεάζει τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών. Αρκετοί επιστήμονες πιστεύουν ότι η περιοχή της Μεσογείου και επομένως η Ελλάδα, είναι ευάλωτη στην κλιματική αλλαγή, όπως αυτή εκφράζεται με αύξηση της θερμοκρασίας και της ξηρασίας (IPCC 2007, Giorgi 2006, Gao and Giorgi 2008). Η κλιματική αλλαγή σχετίζεται όχι μόνο με αύξηση των μέσων κλιματικών παραμέτρων αλλά με αύξηση της συχνότητας των ακραίων κλιματικών φαινομένων όπως είναι οι μέγα – πυρκαγιές (Kostopoulou and Jones 2005, Alpert et al. 2008). Επομένως, ένα ερευνητικό ερώτημα ήταν αν, και αν ναι με ποιον τρόπο, θα επηρεαστεί η συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στο μέλλον. Στην προσπάθεια διερεύνησης του παραπάνω ερωτήματος χρησιμοποιήθηκε το κλιματικό μοντέλο MAGICC (Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change) και η βάση δεδομένων SCENGEN (SCENario GENerator). Αλλάζοντας τις διάφορες παραμέτρους του μοντέλου όπως την ευαισθησία του κλίματος, το κλιματικό σενάριο, τη χρονική περίοδο ενδιαφέροντος και τα παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (GCM), που αποτελούν τη βάση δεδομένων SCENGEN, μπορούν να εξαχθούν πληροφορίες που αφορούν τις κλιματικές τάσεις της βροχόπτωσης, της νέφωσης, του ανέμου, της μέσης και της μέγιστης θερμοκρασίας στους θερμούς μήνες, δηλαδή των σημαντικότερων μετεωρολογικών

παραγόντων που επηρεάζουν τη δημιουργία και την εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών στη χώρα μας (Wigley et al. 2000).

Το κλιματικό μοντέλο MAGIGG/SCENGEN έκανε προσομοίωση της μέσης θερμοκρασίας, του ανέμου και της βροχόπτωσης των θερινών μηνών της περιόδου 2060-2089 για την χώρα μας, όπου έδειξε μια αύξηση της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας στην περιοχή μελέτης περίπου στους 2,5°C και 1,5-2°C για τα σενάρια IS92A (μετριοπαθές προς δυσοίωνα σε ό,τι αφορά τις μελλοντικές εκπομπές σε CO₂) και IS92C (το πιο ευοίωνα) αντίστοιχα της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel for Climate Change - IPCC 1992), μια μικρή μεταβολή στην ένταση του ανέμου (+/- 2%) και μια μείωση της μέσης βροχόπτωσης κατά 20% έως 40% κατά μέσο όρο. Οι Paragiannaki et al. (2003) για την περιοχή των Βαλκανίων, παρουσίασαν τις αναμενόμενες κλιματικές αλλαγές σύμφωνα με τις αναλύσεις των σεναρίων των κλιματικών μοντέλων που δείχνουν μέχρι το έτος 2100, αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας (1,5°C έως 3,6°C), μείωση των βροχοπτώσεων (-24,3% έως -1,2%) και μικρή μείωση της ταχύτητας του ανέμου (-2,2% έως -0,1%), οι οποίες είναι προς την ίδια κατεύθυνση με τα αποτελέσματα του MAGIGG/SCENGEN. Επίσης οι Giannakopoulos et al. το 2011, χρησιμοποιώντας το μετριοπαθές κλιματικό σενάριο της IPCC SRES A1B (Nakicenovic et al. 2000) για την περίοδο 2021 – 2050, παρουσίασαν για την Ελλάδα αύξηση των ημερών με θερμοκρασίες πάνω από 35°C την ημέρα και πάνω από 20°C τη νύχτα (Giannakopoulos et al. 2011).

Το μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE προσομοίωσε τις δύο πυρκαγιές σύμφωνα με τις κλιματικές τάσεις των δύο σεναρίων για τη μέση μέγιστη θερμοκρασία (αύξηση της μέσης μέγιστης θερμοκρασίας περίπου στους 2,5°C και 2°C για τα σενάρια IS92A και IS92C αντίστοιχα), κρατώντας τον άνεμο σταθερό και μειώνοντας τη σχετική υγρασία του αέρα και την υγρασία των νεκρών καυσίμων. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι σύμφωνα με τις κλιματικές τάσεις, οι πυρκαγιές την περίοδο 2060-2089 για την περιοχή μελέτης, αυξάνουν την καμένη έκταση (έως και περίπου 75%), την ταχύτητα των μετώπων και την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας, δηλαδή γίνονται πιο επικίνδυνες και πιο καταστροφικές.

Όμως τα κλιματικά μοντέλα που κάνουν προβλέψεις για το κλίμα από το 1990 δεν έχουν καταφέρει να δώσουν αξιόπιστα αποτελέσματα σε μικρότερη ή σε μεγαλύτερη κλίμακα, σε σύγκριση με τα ιστορικά δεδομένα (Koutsoyiannis 2008). Υπάρχουν επίσης πολυάριθμες μελέτες που αμφισβητούν τις προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων προβάλλοντας τις ασυνέπειές τους με την πραγματικότητα (Feidas and Lalas 2001). Εξαιτίας αυτών, έγιναν έλεγχοι ευαισθησίας (Σενάρια) στο FARSITE, όπου οι μεταβολές των μετεωρολογικών, και μη παραγόντων, εισήχθησαν στο μοντέλο πυρκαγιάς FARSITE, δημιουργώντας τυχαία πιθανά σενάρια, και έγινε η περιγραφή της μεταβολής της συμπεριφοράς της δασικής πυρκαγιάς και η εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με την πυρο-

επικινδυνότητα των επόμενων δεκαετιών για την περιοχή μελέτης στη χώρα μας. Συγκεκριμένα επιβεβαιώθηκε ότι :

- Κάθε αύξηση της μέγιστης θερμοκρασίας με ταυτόχρονη μείωση της σχετικής υγρασίας και της υγρασίας των νεκρών καυσίμων, αυξάνει την καμένη έκταση, την ταχύτητα εξάπλωσης και την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας.
- Παρόλο που αυξήθηκε η μέγιστη θερμοκρασία κατά 2°C με ταυτόχρονη μείωση της μέγιστης και ελάχιστης σχετικής υγρασίας του αέρα κατά 8% καθώς και της υγρασίας των νεκρών καυσίμων κατά 2%, με την μείωση της έντασης του ανέμου κατά 10% μειώθηκε η καμένη έκταση (περίπου κατά 5% έως 10%) και στις δύο πυρκαγιές.
- Στην περιοχή μελέτης, όταν αυξηθεί η ταχύτητα του ανέμου κατά 5% θα πρέπει να μειωθεί η μέγιστη θερμοκρασία κατά 1°C με ταυτόχρονη αύξηση της σχετικής υγρασίας του αέρα κατά 5% και αύξηση της υγρασίας των νεκρών καυσίμων κατά 1% για να μην υπάρξει ιδιαίτερη μεταβολή στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς.
- Ο άνεμος αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα ανάπτυξης μιας πυρκαγιάς. Με το μηδενισμό της έντασης του ανέμου, παρόλο που μειώθηκε η υγρασία των νεκρών καυσίμων κατά 2%, η καμένη έκταση και στις δύο πυρκαγιές μειώθηκε περίπου κατά 95%.
- Με την αύξηση του ποσοστού κάλυψης κόμης κατά μια κατηγορία σύμφωνα με το Σενάριο 5 για την περιοχή ενδιαφέροντος, μειώνεται η καμένη βλάστηση (περίπου κατά 25%-40%) και οι ταχύτητες εξάπλωσης και των δύο πυρκαγιών.
- Με τη μείωση του ποσοστού κάλυψης κόμης κατά μια κατηγορία, παρότι μειώνεται κατά 35% η ένταση του ανέμου σύμφωνα με το Σενάριο 6, η καμένη βλάστηση στην πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά αυξάνεται (περίπου κατά 10%) λόγω της ομοιογένειας της βλάστησης που είναι πολύ σημαντική παράμετρος. Αντιθέτως, η καμένη βλάστηση στην πυρκαγιά της Ραφήνας μειώνεται (περίπου κατά 45%) με τη σημαντική μείωση του ανέμου.
- Μια μελλοντική υποβάθμιση της υπάρχουσας βλάστησης θα δημιουργούσε αύξηση της καμένης έκτασης στις δύο πυρκαγιές και θα έπρεπε να μειωθεί η ένταση του ανέμου κατά 50% για να μειωθεί η καμένη έκταση στην πυρκαγιά του Νέου Βουτζά περίπου κατά 30% και στην πυρκαγιά της Ραφήνας κατά 55%.
- Στην πυρκαγιά της Ραφήνας, η τοπογραφία προκαλεί διπλασιασμό της ταχύτητας εξάπλωσης, με αύξηση της καμένης βλάστησης περίπου κατά 35% σε συνθήκες με μηδενικό άνεμο.
- Όταν αυξάνεται ο δείκτης προσαρμογής (Adjustment Factor), για κάποιο μοντέλο καύσιμης ύλης, παρατηρείται μεγάλη αύξηση στην καμένη βλάστηση, στην ταχύτητα

εξάπλωσης και στην εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας. Συγκεκριμένα στην περιοχή μελέτης σύμφωνα με το Σενάριο 9, για την πυρκαγιά στο Νέο Βουτζά, μια αύξηση του δείκτη προσαρμογής κατά 20% θα προκαλούσε αύξηση της καμένης έκτασης περίπου κατά 30%, ενώ με μια αύξηση κατά 50% θα προκαλούσε αύξηση της καμένης έκτασης περίπου κατά 80%.

8.2 ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Συνοψίζοντας, τα παραπάνω συμπεράσματα είναι δυνατόν να αποτελέσουν το πρώτο βήμα για τη συστηματοποίηση στη λήψη άμεσων αποφάσεων και ένα πολύτιμο εργαλείο πληροφόρησης σε επιχειρησιακό επίπεδο. Επομένως, αφού πρώτα εισαχθούν τα κατάλληλα μοντέλα καύσιμης ύλης για μια περιοχή ενδιαφέροντος σε έναν προσομοιωτή εξάπλωσης πυρκαγιάς όπως είναι το FARSITE, θα μπορούσαν να γίνουν μια σειρά προσομοιώσεων με πιθανά σενάρια για περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλη πυρο-επικινδυνότητα και τα αποτελέσματά τους να καταχωρηθούν σε πίνακες (επιχειρησιακά πρωτόκολλα). Μέσα σε αυτούς θα μπορούσαν να εισαχθούν στοιχεία όπως η κατεύθυνση της πυρκαγιάς, η ταχύτητα μετώπου, το μήκος μετώπου, το μήκος φλόγας, η θερμική ένταση μετώπου και γενικά η περίπτωση ακραίας συμπεριφοράς πυρκαγιάς (επικόρυφη, κηλίδωση κ.λπ.), ανάλογα με το είδος και την κατάσταση της βλάστησης, την τοπογραφία, τις μετεωρολογικές συνθήκες και το χρόνο προσβολής. Έχοντας αυτά υπόψη του κάθε επιχειρησιακός αξιωματικός του Πυροσβεστικού Σώματος που μεταβαίνει για τον συντονισμό και την κατάσβεση μιας δασικής πυρκαγιάς, θα έχει μια εκτίμηση της κατάστασης της πυρκαγιάς πριν ακόμη την προσεγγίσει. Επίσης, στο μέτωπο της πυρκαγιάς θα συντονίζει τις δυνάμεις πυρόσβεσης, θα ζητήσει ενισχύσεις (επίγεια και εναέρια μέσα) με βάση τις πραγματικές συνθήκες και την αναμενόμενη συμπεριφορά της, που προκύπτει όχι μόνο από την προσωπική του εκτίμηση, αλλά σε συνδυασμό με τα επιχειρησιακά πρωτόκολλα. Από την άλλη μεριά, το Συντονιστικό Κέντρο Δασοπυρόσβεσης (Σ.ΚΕ.Δ.) το οποίο είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των εναέριων μέσων (αεροσκαφών και ελικοπτέρων), θα εξετάζει τα αιτήματα αποστολής εναέριας βοήθειας σε συμβάντα δασικών πυρκαγιών ανά την επικράτεια, βάσει επιχειρησιακών κριτηρίων σε συνδυασμό με τα επιχειρησιακά πρωτόκολλα.

Επομένως, η παρούσα μελέτη καλείται να καλύψει ένα κενό που υπάρχει στη γνώση που συνδυάζεται με την πράξη σε θέματα δασικών πυρκαγιών. Είναι αποδεκτό από όλο και περισσότερους επιχειρησιακούς αξιωματικούς του Πυροσβεστικού Σώματος σε συμβάντα δασικών πυρκαγιών ότι υπάρχει ένα έλλειμμα στη μεθοδολογία, στην πληροφόρηση και στη συστηματοποίηση. Οι αποφάσεις λαμβάνονται ανάλογα με την εμπειρία και τις συνθήκες που

αναπτύσσονται σε μια δασική πυρκαγιά, ενώ θα έπρεπε να υπάρχει μια συστηματοποίηση των διαδικασιών και μια πρόγνωση της μελλοντικής συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς ώστε να αποφεύγονται όσο είναι δυνατόν οι δυσάρεστες εκπλήξεις. Την προσπάθεια αυτή, συνεπικουρεί και το Εγχειρίδιο Πυρο-μετεωρολογίας / Μετεωρολογίας Δασικών Πυρκαγιών, που αποδίδεται στο Κεφάλαιο 5 της παρούσας διατριβής. Το εγχειρίδιο της πυρο-μετεωρολογίας αποτελεί ένα εκπαιδευτικό υλικό προσαρμοσμένο στις συνθήκες της χώρας μας. Επίσης, δίνει αναλυτικά και ομαδοποιημένα τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν και επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς. Είναι μια καινοτομία της μελέτης αυτής που καλύπτει κενά τα οποία υπάρχουν σε επίπεδο εκπαίδευσης, πρόληψης και σχεδιασμού σε επιτελικό και επιχειρησιακό επίπεδο.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τα προηγούμενα είναι ο προσομοιωτής εξάπλωσης της πυρκαγιάς να παράγει αξιόπιστα αποτελέσματα και η χρήση ενός υψηλής ανάλυσης ατμοσφαιρικού μοντέλου. Τα δύο μοντέλα είναι απαραίτητα στο να προσομοιωθεί σε επιχειρησιακό επίπεδο, μέσω αριθμητικών μοντέλων, η συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς σε σχέση με τους μετεωρολογικούς παράγοντες που την επηρεάζουν (πυρο-μετεωρολογία/ fire weather), καθώς επίσης να προσομοιωθούν οι διαφοροποιήσεις στη συμπεριφορά της από τις κλιματικές ή πιθανές διακυμάνσεις περιβαλλοντικών παραγόντων σε επίπεδο Ελλάδας.

8.3 ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ ΑΠΟ ΤΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΥΣΗ ΤΗΣ ΓΝΩΣΗΣ

Στην προσπάθεια διάχυσης της γνώσης και της πληροφόρησης στο αντικείμενο της πυρο-μετεωρολογίας (fire weather), πραγματοποιήθηκαν εργασίες από την παρούσα διδακτορική διατριβή (Πίνακας 8.1) που παρουσιάστηκαν στο 9^ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο, καθώς επίσης και στο 11^ο Διεθνές Συνέδριο Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας και δημοσιεύτηκαν από τον εκδοτικό οίκο Springer. Επίσης, με πρωτοβουλία και κύρια συγγραφή από τον επιβλέποντα της διδακτορικής διατριβής Καθ. Κ. Καλαμποκίδη εκπονήθηκε πανεπιστημιακό σύγγραμμα/ βιβλίο με τον τίτλο «ΠΥΡΟ-ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΟ ΚΛΙΜΑ», το οποίο είναι υπό έκδοση από τον εκδοτικό όμιλο ΙΩΝ (Πίνακας 8.1).

A/A	Συγγραφείς	Έτος	Τίτλος Εργασίας	Έκδοση
1	Ηλιόπουλος Ν., Κ. Καλαμποκίδης, Γ. Κάλλος, Χ. Φείδας, Α. Μαλούνης, Η. Μαυροματίδης	2010	Μοντελοποίηση δασικής πυρκαγιάς και η επίδραση της πυρο-μετεωρολογίας στη συμπεριφορά της σε κλίμακα τοπίου για την περιοχή της Αττικής.	Πρακτικά του 9ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου, 4-6 Νοεμβρίου 2010, Αθήνα, pp. 296-302
2	Ηλιόπουλος Ν., Κ. Καλαμποκίδης, Γ. Κάλλος, Χ. Φείδας, Π. Κατσαφάδος, Α. Μαλούνης	2010	Η επίδραση των κλιματικών τάσεων στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στην ανατολική Αττική.	Πρακτικά του 9ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου, 4-6 Νοεμβρίου 2010, Αθήνα, pp. 239-245
3	Πιόρουλος Ν., Kalabokidis K., Kallos G., Feidas H., Malounis A., Mavromatidis E.	2012	Forest fire modeling and the effect of fire-weather in landscape fire behavior for the region of Attica, Greece.	Πρακτικά του 11 ^ο Διεθνούς Συνεδρίου Μετεωρολογίας-Κλιματολογίας και Φυσικής της Ατμόσφαιρας - Springer Atmospheric Sciences, p.131-136
4	Καλαμποκίδης Κ., Ηλιόπουλος Ν., Γλιγγίνος Δ.	2012	Πυρο-μετεωρολογία και Συμπεριφορά Δασικών Πυρκαγιών σε ένα Μεταβαλλόμενο Κλίμα	Υπό έκδοση από τον εκδοτικό όμιλο ΙΩΝ

Πίνακας 8.1: Δημοσιευμένες εργασίες που αποτελούν τμήματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής

8.4 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ

Για να λειτουργήσει επιχειρησιακά ο προσομοιωτής εξάπλωσης πυρκαγιάς FARSITE θα πρέπει να έχει δεδομένα εισόδου βλάστησης, τοπογραφίας και μετεωρολογικά στοιχεία για ολόκληρο τον Ελλαδικό χώρο. Η παρούσα μελέτη κάλυψε μια μικρή περιοχή της Αττικής και αποτελεί ένα πρώτο βήμα. Η μελλοντική εξέλιξη ενός συστήματος RAMS - FARSITE και δεδομένων σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) θα μπορούσε να βελτιωθεί μελλοντικά με τα ακόλουθα:

- Για να είναι πιο εύχρηστο το σύστημα των δύο μοντέλων (του μετεωρολογικού και της πυρκαγιάς) θα μπορούσε να γίνει ένα αυτοματοποιημένο σύστημα ώστε τα αποτελέσματα του μετεωρολογικού μοντέλου να εισάγονται σε κατάλληλη μορφή απευθείας στο μοντέλο πυρκαγιάς. Με αυτό τον τρόπο θα γινόταν πιο λειτουργικό και εύκολο το σύστημα της προσομοίωσης μιας πυρκαγιάς.

- Η συνέχιση της έρευνας της συμπεριφοράς των πυρκαγιών με τη χρήση του RAMS θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην προσομοίωση με καλύτερη ανάλυση (κάτω από 1 km) των μετεωρολογικών παραγόντων και ειδικότερα του ανέμου με σκοπό τη μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων που θα εισαχθούν στο FARSITE. Επίσης θα μπορούσε να προσομοιώσει τον άνεμο στο ύψος της μέσης φλόγας, ύψος που επηρεάζει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Επιπροσθέτως, θα είχε ενδιαφέρον να ελεγχθεί η δυνατότητα προσομοίωσης με ένα ατμοσφαιρικό μοντέλο πολύ υψηλής ανάλυσης, όπως το RAMS, η διαφοροποίηση στο πεδίο της πυρκαγιάς των μετεωρολογικών παραμέτρων που προκαλεί η ίδια η πυρκαγιά.
- Επειδή η τοπογραφία επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς, η χρησιμοποίηση ενός ψηφιακού μοντέλου εδάφους πολύ υψηλής ανάλυσης θα έδινε καλύτερα αποτελέσματα.
- Η επίδραση των δυνάμεων πυρόσβεσης (εναέρια και επίγεια μέσα) στη μεταβολή της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς σε επιχειρησιακό επίπεδο θα μπορούσε να διερευνηθεί με τον προσομοιωτή εξάπλωσης πυρκαγιάς FARSITE.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αθανασίου, Μ. και Ξανθόπουλος, Γ. (2009). Η συμπεριφορά των μεγάλων δασικών πυρκαγιών του 2007 στην Ελλάδα. Σελ. 591-602. Πρακτικά του 14^{ου} Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου, 1-4 Νοεμβρίου 2009, Πάτρα. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία. Θεσσαλονίκη, σελ. 1101.
- Δημητρακόπουλος Α.Π., Mateeva V. και Ξανθόπουλος Γ. (2001). Μοντέλα Καύσιμης Ύλης Μεσογειακών Τύπων Βλάστησης της Ελλάδας. Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, Σειρά VI, 3(12):192-206.
- Ηλιόπουλος Ν., Καλαμποκίδης Κ., Κάλλος Γ., Φείδας Χ., Μαλούνης Α. και Μαυροματίδης Η. (2010). Μοντελοποίηση δασικής πυρκαγιάς και η επίδραση της πυρομετεωρολογίας στη συμπεριφορά της σε κλίμακα τοπίου για την περιοχή της Αττικής. Πρακτικά του 9ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου, 4-6 Νοεμβρίου 2010, Αθήνα, pp. 296-302.
- Ηλιόπουλος Ν., Καλαμποκίδης Κ., Κάλλος Γ., Φείδας Χ., Κατσαφάδος Π. και Μαλούνης Α. (2010). Η επίδραση των κλιματικών τάσεων στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στην ανατολική Αττική. Πρακτικά του 9ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου, 4-6 Νοεμβρίου 2010, Αθήνα, pp. 239-245.
- Καϊλίδης Δ. (1990). Δασικές πυρκαγιές, 3η έκδοση. Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη.
- Καλαμποκίδης, Κ., Ρούσσου, Ο., Βασιλάκος, Χ. και Μαρκοπούλου, Δ. (2004). Χωρική μοντελοποίηση καύσιμης ύλης και συμπεριφοράς πυρκαγιών τοπίου. Στα Πρακτικά 7ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου. 14-17 Οκτωβρίου 2004, Ελληνική Γεωγραφική Εταιρεία και Τμήμα Γεωγραφίας Πανεπιστημίου Αιγαίου, Μυτιλήνη. Τόμ. Ι, σελ. 486-494.
- Ξανθόπουλος Γ. και Ευτυχίδης Γ. (2007). Οι πυρκαγιές της 28-7-2005 στην περιοχή της Ραφήνας: Εξέλιξη, παρατηρήσεις και διδάγματα. 13^ο Πανελλήνιο Δασολογικό Συνέδριο, σελ. 185-196.
- Ξανθόπουλος Γ., Δόσης Σ., Καρπή Α., Παναγιωτίδου Ε. και Σουφλής Δ. (2009). Αντιπροσωπευτικά μοντέλα δασικής καύσιμης ύλης για την περιφέρεια της Αττικής: Δημιουργία και λογισμικό αξιοποίησης. Σελ. 615-626. Πρακτικά του 14^{ου} Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου, 1-4 Νοεμβρίου 2009, Πάτρα. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία. Θεσσαλονίκη, σελ. 1101.
- Φλόκας Α. (1997). Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Θεσσαλονίκη: Εκδ. Ζήτη.

- Albini F.A. (1979). Spot fire distance from burning trees- a predictive model, USDA Forest Service, General Technical Report INT-56.
- Albini F.A. and Baughman R.G. (1979). Estimating windspeeds for predicting wildland fire behavior. Research Paper INT-221. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden, Utah.
- Albright D. and Meisner B. N. (1998). "Classification of Numerical Fire Simulation Systems". 35 pp..
- Albright D. and Meisner B. N. (1999) "Classification of Fire Simulation Systems". Fire Management Notes 59 (2): 5-12.
- Alexander M.E. (1988). "Crown Fire Thresholds in Exotic Pine Plantations of Australasia". PhD Thesis. Australian National University, Canberra.
- Alexander M.E. (2000). "Fire Behaviour as a Factor in Forest and Rural Fire Suppression". Forest Research, Rotorua, in association with the National Rural Fire Authority, Wellington. Forest Research Bulletin No. 197, Forest and Rural Fire Scientific and Technical Series, Report No. 5. 30 pp..
- Alpert P., Krichak S.O., Shafir H., Haim D. and Osetinsky I. (2008). Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean. *Glob Planet Change* 63:163–170.
- Anderson H.E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behaviour . USDA Forest Service General Technical Report. INT-122.
- Anderson H.E. (1983). "Predicting Wind - Driven Fire Size and Shape". USDA Forest Service Research Paper INT - 305.
- Andrews P.L. (1986). BEHAVE. Fire behavior prediction and fuel modelling system. Burn subsystem, USDA Forest Service. Ogden, UT.
- Andrews P.L., Queen L.P. (2001). Fire modeling and information system technology. *International Journal of Wildland Fire* 10, 343–352. doi:10.1071/WF01033.
- Archer D. (2005). Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks Draft Report: 1990-2003, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Atmospheric Programs.
- Athanasiou M., and Xanthopoulos G. (2010). Fire behaviour of the large fires of 2007 in Greece. In proceedings of the 6 International Conference on Forest Fire Research, 15-18 November 2010, Coimbra, Portugal. D.G. Viegas, Editor. ADAI/CEIF, University of Coimbra, Portugal. Abstract p. 336, full text on CD.
- Atkinson B.W. (1981). "Mesoscale Atmospheric circulations" Academic Press. New York.
- Bachisio Arca, Duce P., Laconi M., Pellizzaro G., Salis M. and Spano D. (2007). Evaluation of FARSITE simulator in Mediterranean maquis. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16, 563–572

- Balafoutis Ch. J. and Makrogiannis T. J. (2000). A contribution to the study of the heatwave phenomenon over Greece in August 1999. In CD proceeding of 3ed European Conference on Applied Climatology 16-20 October 2000, Session V, Pisa, Italy.
- Biswell H.H. (1989). Prescribed burning in California wildlands vegetation management. University of California Press.
- Byram G.M. (1959). Combustion of forest fuels, pp. 61-89 in Davis K.P. (ed.). Forest fire: control and use. McGraw-Hill.
- Catchpole. T. and de Mestre N. (1986). Physical models for a spreading line fire. *Australian Forestry* 49(2): 102-111.
- Chandler C., Cheney P., Thomas P., Trabaud L., Williams D. (1983). Fire in forestry, vols. I and II. John Wiley & Sons.
- Charles F. R., (1976). Meteorological Problems in Smoke Management, Air Quality and Smoke From Urban and Forest Fires , Proceedings of International Symposium, October 24-26, 1973, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Clark T.L. and Farley R.D. (1984). Severe downslope windstorm calculations in two and three spatial dimensions using anelastic interactive grid nesting: A possible mechanism for gustiness. *J. Atmos. Sci.*, 41, 329-350.
- Countryman C.M. (1972). The fire environment concept. USDA Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Berkeley, California.
- Delmas R., Lacaux J.P., and Brocard, D. (1995). Determination of biomass burning emission factor: methods and results, *Environmental Monitoring and Assessment* 38,181-204 pp.
- Dimitrakopoulos A.P. (2002). 'Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece', *International Journal of Wildland Fire* 11(2) 127 – 130.
- Farina A. (1998). Principles and Methods in Landscape Ecology. Chapman & Hall, London, UK.
- Feidas H. and Lalas D. (2001). Climatic Changes in Mediterranean: a critical review. In: Proceedings of the 7th Conference on Environmental Science and Technology, 3-6 September 2001, Hermoupolis, Syros, Greece, pp. 211-218.
- Feidas H., Cartalis C. and Lagouvardos C. (2002). Temporal simulation of diurnal temperature and relative humidity evolution at a forested mountainous site in Attica, Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 2002,11,95-106.
- Fernandes PM. (2001). Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal. *Forest Ecology and Management* 144, 67–74. doi:10.1016/S0378- 1127(00)00363-7.
- Finney M. (1998). FARSITE Fire Area Simulator-model development and evaluation . Res. Pap.RMRS-RP-4, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.

- Finney M.A. (2007). A computational method for optimizing fuel treatment locations. *Intl. J. Wildl. Fire*. 16:702-711.
- Forthofer J.M., Butler B.W., Shannon K.S., Finney M.A., Bradshaw L. and Stratton R.E. (2003). Predicting surface winds in complex terrain for use in fire growth models. In '5th Symposium on fire and Forest Meteorology'. Orlando, FL. (American Meteorological Society).
- Gao X. and Giorgi F. (2008). Increased aridity in the Mediterranean region under greenhouse forcing estimated from high resolution simulations with a regional climate model. *Glob Planet Change* 62:195–209.
- Giannakopoulos Ch., Kostopoulou E., Varotsos K., Tziotziou K. and Plitharas A. (2011). An integrated assessment of climate change impacts for Greece in the near future. *Reg Environ Change* (2011) 11:829–843. doi 10.1007/s10113-011-0219-8.
- Giorgi F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophys Res Lett* 33:L08707. doi:10.1029/2006GL025734.
- Gómez-Tejedor J., Estrela M. and Millán M. (1999). A mesoscale model application to fire weatherwinds, *Int J Wildland Fire* 9(4):255-263. doi:10.1071/WF00010.
- Gordon M. and Forman T.T.R. (1983). Landscape modification and changing ecological characteristics P. 12-18 In: H.A. Mooney and M. Gordon (eds.). *Disturbance and ecosystem: Components of response*. Springer-Verlag N.Y.
- Green Lisle R. (1981). *Burning by prescription in chaparral*. Berkeley California. Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, Forest Service U.S. Department of Agriculture, General Technical Report PSW-51. 31 p.
- Haltiner G.J. and Williams R.T. (1980). "Numerical Prediction and Dynamic Meteorology" 2nd ed. John Wiley & Sons, New York.
- Hanson H.P., Bradley M.M., Bossert J.E., Linn R.R. and Younker L.W. (2000). The potential and promise of physics-based wildfire simulation. *Environmental Science & Policy* 3, 161–172. doi:10.1016/S1462-9011(00)00083-6.
- Harvey L.D. Danny and Elizabeth Bush. (1997). "Joint implementation: an effective strategy for combating global warming?" *Environment*, 39 (8) 14-20, 36-44.
- Henderson M., Kalabokidis K., Marmaras E., Konstantinidis P., Marangudakis M. (2005). *Fire and Society: A Comparative Analysis of Wildfire in Greece and the United State*. *Human Ecology Review*, Vol. 12. No 2. 169-182.
- Holton J.R. (1979). *An introduction to dynamic meteorology*, Academic Press.
- Iliopoulos N., Kalabokidis K., Kallos G., Feidas H., Malounis A., Mavromatidis E. (2012). Forest fire modeling and the effect of fire-weather in landscape fire behavior for the region of Attica, Greece. C.G. Helmisi; P. T. Nastos (Eds.), *Advances in Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics*, Springer Atmospheric Sciences, p.131-136

- ISBN 978-3-642-29171-5, ISBN 978-3-642-29172-2 (e-Book). doi:10.1007/978-3-642-29172-2_19, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
- IPCC (1992): *Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*, (Eds. Houghton J.T., Callander B.A. and Varney S.K.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. 200 pp.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC* (ed. by Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K. and Johnson C.A.). Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptations and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Kalabokidis K.D. (2004). Automated forest fire and flood hazard protection system. *Disaster management: linking people and the environment. GeoInformatics Mag* 7(2):14–17.
- Kallos G., Kassomenos P. and Pielke R.A. (1993). Synoptic and mesoscale weather conditions during air pollution episodes in Athens, Greece. *Boundary-Layer Meteorol.*, 62, pp. 163-184.
- Kassomenos P., Kotroni V. and Kallos G. (1995). "Analysis of the climatological and air quality observations from the Greater Athens Area" *Atmospheric Environment*, 29, pp. 3671-3688.
- Kattenberg A., Giorgi F., Grassl H., Meehl G.A., Mitchell J.F.B., Stouffer R.J., Tokioka T., Weaver A.J. and Wigley T.M.L. (1996). Climate models - projections of future climate. pp.285-357 In: *Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Houghton J.T., Filho L.G.M., Callander B.A., Harris N., Kattenberg A. and Maskell K. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 572pp.
- Keeley J.E., Fotheringham C.J. and Morais M. (1999). Re-examining fire suppression impacts on brushland fire regimes. *Science* 284, 1829 – 1832. doi:10.1126/SCIENCE.284.5421.1829.
- Kostopoulou E. and Jones P. (2005). Assessment of climate extremes in Eastern Mediterranean. *Meteorol Atmos Phys* 89:69–85.
- Koutsoyiannis D. (2006). A toy model of climatic variability with scaling behaviour. *J. Hydrol.* 322, 25–48.
- Koutsoyiannis D., Mamassis N., Christofides A., Efstratiadis A. and Papalexiou S. M. (2008). Assessment of the reliability of climate predictions based on comparisons with historical time series. *EGU General Assembly 2008, Geophys. Res. Abstracts*, vol. 10, Vienna, 09074. European Geosciences Union (www.itia.ntua.gr/en/docinfo/850/).

- Leggett J., Pepper W.J. and Swart R.J. (1992): Emissions Scenarios for the IPCC: An Update. In: Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, (Eds. Houghton J.T., Callander B.A. and Varney S.K.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 69-95.
- Ludwig J. A. and Reynolds J. F. (1988). Statistical ecology. New York: John Wiley & Sons.
- Luke R.H. and McArthur A.G. (1978). Bushfire in Australia, Department of Industry Forestry and Timber Bureau, CSIRO Division of Forest Research, Australian Government Publishing Service, Canberra 1978, 23-30 pp.
- Maheras P., Xoplaki E. and Kutiel H. (1999). Wet and dry monthly anomalies across the Mediterranean basin and their relationship with circulation, 1860-1900. *Theor. Appl. Climatol.* 64, 189-199.
- Mintz Y. and Dean G. (1952). The observed mean field of motion of the atmosphere, *Geophysical Research Papers*, no.17, Air Force Cambridge Research Center, Cambridge, Mass.
- Miranda A.I. and Borrego C. (1996). A prognostic meteorological model applied to the study of a forest fire. *International Journal of Wildland Fire* 6 (4), 157-163.
- Mitsopoulos I.D. and Dimitrakopoulos A.P. (2006). Canopy fuel characteristics and potential crown fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) forests. *Ann For Sci* 64:287-299. doi:10.1051/forest:2007006.
- Moreno J. M. and Oechel W. C. (1991). Fire intensity effects on germination of shrubs and herbs in southern California chaparral. *Ecology*, 72 (6), 1993–2004 (Davis Sacramento, CA).
- Nakicenovic N. and Swart R. Eds. (2000). IPCC special report on emissions scenarios. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- NWCG Fireline Handbook (2004). National Wildfire Coordinating Group. National Interagency Fire Center (U.S).
- Omi N. Philip (2005). Forest fires: a reference handbook. ISBN 1- 85109-438-5.
- Orlanski I. (1975). A relational subdivision of scales for atmosphere processes. *Bull. American Meteorology Society* 56:527-530.
- Papagiannaki K., Mirasgedis S., Georgopoulou E., Sarafidis Y. and Lalas D.P. (2003). Estimate of emissions scenarios effects on climate parameters on Balkan region. 8th International Conference on Environmental Science and Technology, Lemnos Island, Greece , 8-10 September 2003.
- Pastor E., Zárate L., Planas E., Arnaldos J. (2003). Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science* 29, 139–153. doi:10.1016/S0360-1285(03)00017-0.

- Petit J.R., et al. (1999). "Climate and Atmospheric History of the Past 420,000 Years from the Vostok Ice Core, Antarctica." *Nature* 399: 249-36.
- Pielke R.A., Cotton W.R., Walko R.L., Tremback C.J., Lyons W.A., Grasso L.D., Nicholls M.E., Moran M.D., Wesley D.A., Lee T.J. and Copeland J.H. (1992). A comprehensive meteorological modelling system - RAMS. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 49, 69-91.
- Plass G.N. (1956). "The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change." *Tellus* 8: 140-54.
- Pyne S.J., Andrews P.L. and Laven R.D. (1996). *Introduction to Wildland Fire*, second edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Raper S.C.B., Wigley T.M.L. and Warrick R.A. (1996). Global sea level rise: past and future. (In) *Sea-Level Rise and Coastal Subsidence: Causes, Consequences and Strategies* (eds. J. Milliman and B.U. Haq), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 11–45.
- Robinson E. (1984). Dispersion of fate of Atmospheric Pollutants, Air Pollution and Plant Life, Department of Biology, University of Utah, USA, 15-37 pp.
- Rothermel R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, General Technical Report INT-115.
- Rothermel R.C. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires. General Technical Report INT-143. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 161p
- Rothermel R.C. (1991). Predicting behavior and size of crown fires in the northern Rocky Mountains. USDA Forest Service, Paper INT-438.
- Rothermel R.C. and Andrews P.L. (1982). Charts for interpreting wildland fire behavior characteristics. USDA Forest Service, General Technical Report INT-131.
- Rouse J.W., Hass R.H., Shell J.A. and Deering D.W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP 351:301-317.
- S-290 Intermediate Wildland Fire Behavior Course. (1993). National Wildfire Coordinating Group of National Interagency Fire Center (U.S).
- S-390 Introduction to Wildland Fire Behavior Calculations. (2006). National Wildfire Coordinating Group of National Interagency Fire Center (U.S).
- S-490 Advanced Fire Behavior Calculations. (2008). National Wildfire Coordinating Group of National Interagency Fire Center (U.S).
- Sandberg D.V., Ottmar R.D., Cushon G.H. (2001). Characterizing fuels in the 21st Century. *International Journal of Wildland Fire* 10, 381-387.
- Schimel D., Enting I.G., Heimann M., Wigley T.M.L., Raynaud D., Alves D. and Siegenthaler U. (1995). CO₂ and the carbon cycle. pp.35-71 In: *Climate change 1994: radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92*

- emissions scenarios [Houghton J.T., Meira Filho L.G., Bruce J., Lee H., Callander B.A., Haites E., Harris N. and Maskell K. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 339pp.
- Schroeder J.M., Buck C.C. (1970). *Fire Weather. A guide for application of meteorological information to forest fire control operation*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook 360.
- Scott J.H. and Burgan R.E. (2005). *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. General Technical Report RMRS-GTR-153. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station; 72 p.
- Stull R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Atmospheric Sciences Library. Kluwer Academic Publishers.
- Thanos C. A. and Doussi M. (2000). *Post-fire regeneration of pinus brutia forests*. In: Ne' man G. and Trabaud L. (eds.). *Ecology, Biogeography and management of pinus halepensis and P. brutia forest ecosystems in the Mediterranean basin*. Backhuys Publishers, Leiden, pp 291-301.
- Trewartha T. G. and Horn H. L. (1985). *An introduction to climate*. Fifth Edition
- Valianatos O. (1999). *Prediction of smoke dispersion from fires using the Bureau of Meteorology meso Limited Area Prediction System (LAPS) and the Hybrid Single – Particle Lagrangian Intergraded Trajectory (HYSPLIT_4) models*. Volume I: The proposed operational system and the real data assessment of smoke dispersion forecasts generated by the HYSPLIT_4 system - Internal progress report – achievements of the Victorian Smoke Modelling Research Project for 01/02/1999 – 30/07/1999.
- Van Wagner C.E. (1977). *Conditions for the start and spread of crown fire*. Canadian Journal of Forest Research 7(1):23-34.
- Van Wagner C. W. (1993). *Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine*. Canadian Journal Forest Research 23:442-449.
- Van Wagendonk J.W. (1996). *Use of a Deterministic Fire Growth Model to Test Fuel Treatments*. In 'Sierra Nevada Ecosystem Project: Final Report to Congress'. Vol. II, Ch. 43, University of California – Davis, Wildland Resources Center Report 37. (Davis, CA).
- Ve'lez R. (2000). *Los incendios forestales en la Cuenca Mediterra'nea*. In: Velez R (ed) *La defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. MacGraw-Hill, Madrid, pp 3.1–3.15.
- Viegas D.X. (2002). *Fire Line Rotation as a Mechanism for Fire Spread on a Uniform Slope*. International Journal of Wildland Fire, (2002), Vol. 11(1): 11-23.

- Viegas, D.X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behaviour model. *International Journal of Wildland Fire* 15, 169-177.
- Viegas D.X., Pita L.P., Ribeiro L. and Palheiro P. (2005). Eruptive fire behaviour in past fatal accidents. *Proceedings, Eighth International Wildland Fire Safety Summit*, April 26-28. Missoula, MT.
- Watson R.T., Filho L.G.M., Sanhueza E. and others. (1992). Greenhouse gases: sources and sinks.
- Wigley T.M.L. (2000). Stabilization of CO₂ concentration levels. (In) *The Carbon Cycle*, (eds. Wigley T.M.L. and Schimel D.S.). Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 258–276.
- Zhou X., Mahalingam S. and Weise D. (2005*a*). Modelling of marginal burning state of fire spread in live chaparral shrub fuel bed. *Combustion and Flame* 143, 183–198. doi:10.1016/J.COMBUSTFLAME.2005.05.013.
- Zhou X., Weise D. and Mahalingam S. (2005*b*). Experimental measurements and numerical modelling of marginal burning in live chaparral fuel beds. *Proceedings of the Combustion Institute* 30, 2287–2294. doi:10.1016/J.PROCI.2004.08.022.

ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ:

www.manifold.net

www.wettepate.de

<http://www.noaa.gov>