

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: «Προσομοίωση της Εξέλιξης Δασικών Πυρκαγιών με Προσδιορισμό Μοντέλων Καύσιμης Ύλης από Τηλεπισκοπικά Δεδομένα»



Κοσμἁς Α. Σταμπουλίδης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS Remote Sensing Laboratory

INTERDISCIPLINARY PROGRAMME OF POSTGRADUATE STUDIES "ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT"

Master Thesis: "Simulating Forest Fire Spread by Estimating Fire Fuel Models from Remote Sensing Data"



Kosmas A. Stampoulidis

Athens, February 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: «Προσομοίωση της Εξέλιξης Δασικών Πυρκαγιών με Προσδιορισμό Μοντέλων Καύσιμης Ύλης από Τηλεπισκοπικά Δεδομένα»

Κοσμάς Α. Σταμπουλίδης Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

Τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Καράντζαλος Κων/νος (επιβλέπων)

Αργιαλάς Δημήτριος

Κολοκούσης Πολυχρόνης

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

(Υπογραφή)

.....



Περίληψη

Οι δασικές πυρκαγιές, ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες, αποτελούν ένα εξαιρετικά μεγάλο πρόβλημα για τις Μεσογειακές χώρες και ιδιαίτερα για την Ελλάδα. Η συνεισφορά της τεχνολογίας και ειδικότερα της Τηλεπισκόπησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, στην πρόληψη, καταγραφή αλλά και στην αποτελεσματικότερη καταπολέμηση των δασικών πυρκαγιών, είναι ιδιαίτερα σημαντική. Με χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων είναι δυνατό να δημιουργηθούν χάρτες επικινδυνότητας πυρκαγιών, να ανιχνευτούν έγκαιρα τα σημεία ανάφλεξης, να υπάρξει ακριβής πρόγνωση του καιρού έως και πέντε ημέρες νωρίτερα, και με χρήση κατάλληλων μοντέλων να προσομοιωθεί η συμπεριφορά δασικών πυρκαγιών. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά τεσσάρων παρελθοντικών δασικών πυρκαγιών μέσω της χρήσης του προγράμματος προσομοίωσης πυρκαγιών Farsite και η σύγκριση με την πραγματική τους συμπεριφορά. Για τις τέσσερις αυτές περιοχές δημιουργήθηκαν χάρτες καύσιμης ύλης και βαθμού συγκόμωσης με χρήση τηλεπισκοπικών απεικονίσεων Landsat 8 OLI και με αντικειμενοστρεφή ανάλυση εικόνας. Επίσης, συγκεντρώθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα και πληροφορίες για τη τοπογραφία της περιοχής από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM). Στόχος ήταν η εφαρμογή του μοντέλου προσομοίωσης πυρκαγιάς πριν τη φωτιά και η σύγκρισή του με την πραγματική καμένη έκταση ώστε να εξακριβωθεί η αποτελεσματικότητά του.

Λέξεις κλειδιά: προσομοίωση δασικών πυρκαγιών, τηλεπισκόπηση, ΓΣΠ, Farsite, Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.)

Abstract

Forest fires, especially during the summer months, are a major problem for Mediterranean countries and especially for Greece. For any fire preparedness, prevention, real-time control and resources allocation as well as mapping burned areas, Remote sensing and Geographic Information Systems play a significant role. Using remote sensing data it is possible to create fire risk maps, to timely detect the flash points, to obtain highly precise weather forecasts up to five days in advance and use appropriate models to simulate the behavior of forest fires. In this study, we examined the behavior of four past forest fires through the use of *Farsite*, which is a forest fire simulator we compared them with their actual behavior. For these four areas we created fuel maps and degree of canopy cover using Landsat 8 OLI satellite and object-oriented image analysis. Also we gathered meteorological data and information about the topography through digital elevation models. The main objective was the implementation of fire simulation model before the fire and to compare it with the actual burned area to determine its effectiveness. Experimental results and validation were quite promising.

Key words: forest, fire, simulator, satellite data, land cover, remote sensing, GIS, Farsite, fuel models

Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Τηλεπισκόπησης της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του Διεπιστημονικού Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Περιβάλλον και Ανάπτυξη».

Με την ολοκλήρωσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήταν παράλειψή μου να μην ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Πολυχρόνη Κολοκούση, ο οποίος με την υπομονή και την υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, συνέβαλλε σημαντικά στην ολοκλήρωσή της. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντά μου, Επίκουρο Καθηγητή κύριο Κωνσταντίνο Καράντζαλο για την καθοδήγηση και τις κατευθύνσεις του.

Ωστόσο, δε θα ήθελα να παραλείψω τη συνεισφορά του Δρ Κωνσταντίνου Λαγουβάρδου, Διευθυντή Ερευνών στο Εθνικού Αστεροσκοπείο Αθηνών, του οποίου η βοήθεια για τη συγκέντρωση των μετεωρολογικών δεδομένων υπήρξε σημαντική.

Τέλος, εκφράζω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου και στα αγαπημένα μου πρόσωπα για την αμέριστη υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Περιεχόμενα

Περ	ίληψη	v
Abst	tract	vi
Ευχα	χριστίες	vii
Περ	ιεχόμενα	Viii
1	Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	1
1.1	Κίνητρο – Πρόβλημα	1
1.2	Αντικείμενο και σκοπός	2
1.3	Δομή της εργασίας	2
2	Κεφάλαιο 2 : Ανασκόπηση βιβλιογραφίας	4
2.1	Το φαινόμενο της καύσης και οι δασικές πυρκαγιές	4
Ανατομ	ία της πυρκαγιάς	4
Θερμικ	ή ένταση και εξάπλωση της πυρκαγιάς	5
2.2	Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαι	γιών 7
2.2.1	Τοπογραφία	7
2.2.2	Καύσιμη ύλη	8
Μοντέλ	α Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.)	
2.2.3	Μετεωρολογικοί παράγοντες	11
2.3	Καλύψεις και χρήσεις γης	12
2.4	Δορυφορικά συστήματα για τη χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης	12
2.4.1	Πολυφασματικά δεδομένα	13
Ιστορία	των δορυφόρων Landsat – Τεχνικά χαρακτηριστικά	13
Δορυφά	όροι Landsat και χαρτογράφηση καύσιμης ύλης	16
2.5	Μοντέλα πρόβλεψης συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών	
2.5.1	Φυσικά μοντέλα	
2.5.2	Εμπειρικά μοντέλα	
2.5.3	Ημι-εμπειρικά μοντέλα	21
Μοντέλ	ο του Rothermel	21
Το μοντ	έλο Farsite	22
Το μοντ	έλο BehavePlus	22
2.6	Προσομοιώσεις συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών με το πρ	όγραμμα
Farsite	23	
3	Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογική προσέγγιση	24
3.1	Επιλογή Μοντέλων Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.)	
3.2	Δορυφορικές εικόνες Landsat 8 OLI	
3.2.1	Περιοχές μελέτης	
3.2.2	Εισαγωγή δορυφορικών εικόνων στο πρόγραμμα eCognition	
Επίπεδ	-1: Anu ouoví a váotn ka) údicov vnc	24

4	Κεφάλαιο	4:	Αποτελέσματα	προσομοιώσεων	συμπεριφοράς	δασικών
πυρκαγι	ών με χρήση	του	μοντέλου Farsite	••••••		54
4.1	Προσομοίω	οση τ	τυρκαγιάς στην τ	περιοχή της Κερατε	έας Αττικής – 201	4 54
4.1.1	Δεδομένα ε	εισόδ	δου – Κερατέα			54
4.1.2	Δεδομένα ε	εξόδο	ου – Κερατέα			58
4.1.3	Αξιολόγησι	η απο	οτελεσμάτων – Μ	(ερατέα		
4.2	Προσομοίω	οση τ	τυρκαγιάς στην ε	ευρύτερη περιοχή	της Αταλάντης – 2	201468
4.2.1	Δεδομένα ε	εισόδ	δου – Μαλεσίνα	Αταλάντης		
4.2.2	Δεδομένα ε	εξόδι	ου – Μαλεσίνα Α	Αταλάντης		73
4.2.3	Αξιολόγησι	η απο	οτελεσμάτων – Ν	Μαλεσίνα Αταλάντ	ης	79
4.3	Προσομοίω	οση τ	τυρκαγιάς στην τ	περιοχή του όρους	Υμηττός – 2015	
4.3.1	Δεδομένα ε	εισόδ	δου – Υμηττός			
4.3.2	Δεδομένα ε	εξόδι	ου – Υμηττός			
4.3.3	Αξιολόγησι	η απο	οτελεσμάτων – Υ	/μηττός		
4.4	Προσομοίω	οση τ	τυρκαγιάς στην τ	περιοχή της Νεάπο	λης Λακωνίας – 2	2015 97
4.4.1	Δεδομένα ε	εισόδ	δου – Νεάπολη /	\ακωνίας		
4.4.2	Δεδομένα ε	εξόδι	ου – Νεάπολη Λ	ακωνίας		103
4.4.3	Αξιολόγησι	ι απο	οτελεσμάτων – Ν	Νεάπολη Λακωνίας		109
5	Κεφάλαιο 5	: Συμ	περάσματα			112
5.1	Συζήτηση κ	αι Π	εριορισμοί			112
5.2	Χρήσεις – Γ	Ιροο	πτικές			114
6	Κεφάλαιο 6	: Βιβ	λιογραφικές ανα	φορές		116
Ξενόγλω	υσση βιβλιο	γραφ	νία			116
	3 = -0.03		a, ∔ í ai			101

1 Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο – Πρόβλημα

Η Δασική Πυρκαγιά εντάσσεται στις φυσικές καταστροφές. Στον Ελληνικό χώρο κάθε χρόνο καίγονται χιλιάδες στρέμματα με ανυπολόγιστες επιπτώσεις στην Ανθρώπινη ζωή και το Περιβάλλον. Με βάση τα στοιχεία του Πυροσβεστικού Σώματος και της Δασικής Υπηρεσίας, τα τελευταία 50 χρόνια, καίγονται κατά μέσον όρο 332.000 στρέμματα ανά έτος (1955 – 2007), ενώ τα τελευταία 25 χρόνια ο ρυθμός έχει αυξηθεί ξεπερνώντας τα 400.000 στρέμματα ανά έτος. Από τις 500 περίπου πυρκαγιές το χρόνο τη δεκαετία του 1950, φτάσαμε στις 2.000 πυρκαγιές ανά έτος το 2000! Οι τεχνολογίες Γεω-πληροφορικής, ασύρματων δικτύων αισθητήρων (wireless sensor networks - WSN), video analytics, ασύρματων επικοινωνιών, κ.ά., μπορούν να προσφέρουν κάτι παραπάνω στην πρόληψη, στην ενημέρωση και την καταστολή πυρκαγιών μέσω μοντέλων προσομοίωσης συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών.

Η εκτίμηση επικινδυνότητας αναδεικνύει ευάλωτα σημεία υψηλού ρίσκου και υποδεικνύει δράσεις πρόληψης. Τα μοντέλα πρόβλεψης δίνουν τη δυνατότητα στους ειδικούς (δασολόγους, γεωπόνους, γεωγράφους, τοπογράφους και άλλους) να οργανώσουν καταλόγους με μοντέλα μεγάλης ακρίβειας, προσαρμοσμένα στην τοπική πραγματικότητα. Η έγκαιρη προειδοποίηση εξασφαλίζει την κινητοποίηση του Μηχανισμού Καταστολής.

Η προσομοίωση του μετώπου μιας δασικής πυρκαγιάς σε πραγματικό χρόνο είναι πολύ σημαντική για τις επόμενες ώρες της εξέλιξής της, διότι παρέχει πληροφορίες, έτσι ώστε να είναι εφικτή η προστασίας της θέσης των επιγείων και εναερίων μέσων πυρόσβεσης, η αποτύπωση ασφαλών δρόμων διαφυγής για πολίτες και πυροσβέστες και η προστασία σημαντικών υποδομών που εκτίθενται σε κίνδυνο. Η ασφάλεια των ανθρώπων και η αποτελεσματικότητα των επιχειρήσεων έχουν προτεραιότητα.

Από τη σκοπιά του Μηχανισμού Καταστολής των δασικών πυρκαγιών και ιδιαίτερα του Πυροσβεστικού Σώματος, που έχει την κύρια επιφόρτιση και αρμοδιότητα για την αντιμετώπιση και καταστολή των δασικών πυρκαγιών, θεωρώ ότι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών θα μπορούσε να προσφέρει αρκετά ιδιαίτερα στον τομέα της πρόληψης. Η προσομοίωση μιας δασικής πυρκαγιάς θα μπορούσε να καλύψει το κενό που υπάρχει σχετικά με τη γνώση του πως θα εξελιχθεί κυρίως το μέτωπο τη πυρκαγιάς. Όταν "ξεσπά" μια δασική πυρκαγιά και ειδοποιείται το Πυροσβεστικό Σώμα για την αντιμετώπισή της, δεν υπάρχει γνώση για τη μελλοντική της κίνηση, παρά μόνο το σημείο που βρίσκεται εκείνη τη στιγμή. Όλες οι κινήσεις και οι επιλογές βασίζονται στην εμπειρία και στη διάσωση ορισμένων πολύ σημαντικών περιοχών, όπως για παράδειγμα οι κατοικημένες περιοχές. Μία πρόβλεψη της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών, βεβαίως δεν θα έλυνε το πρόβλημα, θα μπορούσε όμως να συνεισφέρει αρκετά στις επιλογές που θα γίνουν από τους επικεφαλείς, εφόσον αυτοί θα έχουν ήδη μια ιδέα για τη τοπογραφία, την καύσιμη ύλη και μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής και συνδυάζοντάς τα με τα μοντέλα πρόβλεψης να οδηγηθούν σε πιο ασφαλή συμπεράσματα και επιλογές.

1.2 Αντικείμενο και σκοπός

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία διαπραγματεύεται τη μοντελοποίηση συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών μέσω του Farsite (Fire Area Simulator), που είναι ένα από τα πιο γνωστά προγράμματα προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών. Για τη χρήση του Farsite πρέπει να ληφθούν υπόψη η καύσιμη ύλη, η τοπογραφία και οι μετεωρολογικές συνθήκες μιας περιοχής. Το μοντέλο αυτό αναπτύχθηκε σε ερευνητικά εργαστήρια για τις προσομοιώσεις δασικών πυρκαγιών ορισμένης έκτασης στις Η.Π.Α. Η χρήση του σε διαφορετικές περιοχές από αυτές για τις οποίες αναπτύχθηκε προϋποθέτει της εισαγωγή δεδομένων με ιδιαίτερη προσοχή και με προσαρμογή τους στις ιδιαίτερες συνθήκες της κάθε περιοχής. Ένας πολύ κρίσιμος παράγοντας δεδομένων εισαγωγής, είναι η καύσιμη ύλη, που όπως θα δούμε στα επόμενα κεφάλαια, χρειάζεται να προκύψουν συγκεκριμένα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.) που θα αντιστοιχούν στις ιδιαιτερότητες της μεσογειακής βλάστησης.

Η εργασία αυτή χρησιμοποιεί τηλεπισκοπικά δορυφορικά δεδομένα για τη χαρτογράφηση και ταξινόμηση της καύσιμης ύλης. Οι μέθοδοι και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν παρουσιάζονται στα παρακάτω κεφάλαια.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι η συνεισφορά γνώσης, περισσότερων επιλογών και εργαλείων σε αυτούς που ασχολούνται με την αντιμετώπιση και καταστολή των δασικών πυρκαγιών, ώστε σε συνδυασμό με την εμπειρία και τη γνώση των ιδιαίτερων συνθηκών μιας περιοχής, να προκύπτουν καλύτερα και πιο ασφαλή αποτελέσματα.

1.3 Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία αποτελείται από τα εξής κεφάλαια:

- Στο πρώτο κεφάλαιο αναφέρονται οι λόγοι για τους οποίους κρίνεται σημαντικό να υπάρξει μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών, καθώς και η συνεισφορά αυτής της εργασίας.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι κύριοι παράγοντες που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς, δορυφορικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης, καθώς και αναφορά σε μοντέλα πρόβλεψης συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών.
- Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την άντληση των δεδομένων που αφορούν την καύσιμη ύλη, τη τοπογραφία και τα μετεωρολογικά χαρακτηριστικά των περιοχών μελέτης.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η χρήση του προγράμματος Farsite,
 καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των περιοχών μελέτης και η αξιολόγησή τους.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα από τη λειτουργία του μοντέλου Farsite, καθώς και κάποιοι περιορισμοί που άπτονται της χρήσης του.
- Στο έκτο κεφάλαιο αναφέρονται με αλφαβητική σειρά όλες οι βιβλιογραφικές πηγές, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη και ολοκλήρωση της εργασίας.

2 Κεφάλαιο 2 : Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

2.1 Το φαινόμενο της καύσης και οι δασικές πυρκαγιές

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. Η καύση είναι μια ειδική μορφή οξείδωσης κατά την οποία μεγάλες ποσότητες θερμικής ενέργειας απελευθερώνονται με μεγάλη ταχύτητα από τα καύσιμα. Πολλές διαδικασίες οξείδωσης συμβαίνουν σταδιακά σε μεγάλες χρονικές περιόδους και οι χημικές αλλαγές που προκύπτουν δεν ακολουθούνται από σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας (Charles, 1976).

Ανατομία της 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, είτε λόγω βλάστησης, είτε λόγω έλλειψης οξυγόνου από τη ταχύτητα της πυρκαγιάς. Ψευδομέτωπα (σημειακές φωτιές) είναι οι πυρκαγιές που προκαλούνται μπροστά από το κυρίως μέτωπο της πυρκαγιάς εξαιτίας του φαινόμενου της κηλίδωσης (Σχήμα 2-1) (Rothermel, 1983, Alexander, 2000).



Σχήμα 2-1: Η ανατομία μιας δασικής πυρκαγιάς (Πηγή: Alexander, 2000)

Θερμική ένταση και εξάπλωση της 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 θερμική ένταση του μετώπου της πυρκαγιάς μετριέται σε kJ/sec m ή kW/m.

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 < 3μ.) και έμμεσης προσβολής (για φλόγες > 3μ.) για καταστολή των πυρκαγιών από επίγειες και εναέριες δυνάμεις δασοπυροσβεστών και μηχανημάτων, κατά περίπτωση (Byram 1959) (Πίνακας 2-1).

Οι κατηγορίες του Πίνακα 2-1 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 2-2), 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 επίγεια συνεργεία με χειρονακτικά εργαλεία θα είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν πυρκαγιές με μήκη φλόγας μέχρι 1μ., ενώ οι εκσκαφείς είναι δυσκολη, αν τα μήκη φλόγας ανέρχονται στα 3μ., λόγω λαμπαδιάσματος μεμονωμένων δένδρων και κηλίδωσης. Η καταστολή γίνεται πολύ δύσκολη έως αδύνατη όταν τα μήκη φλόγας φθάνουν ή υπερβαίνουν τα 4-5μ. με τις αντίστοιχες θερμική συμπεριφορά (Rothermel & Andrews, 1982).

Πίνακας 2-1: Αντιστοίχηση των τιμών του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες καταστολής μιας πυρκαγιάς (Byram, 1959)

Μήκος Φλόγας (μ.)	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.		



Σχήμα 2-2: Διάγραμμα της μεταβολής της ταχύτητας εξάπλωσης ανάλογα με την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας και τις κατηγορίες ανάλογα με τις ενέργειες καταστολής (Rothermel & Andrews, 1982)

2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα σύνθετο φαινόμενο που επηρεάζεται από μια πληθώρα παραγόντων. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών είναι η τοπογραφία, η καύσιμη ύλη και τα μετεωρολογικά δεδομένα μιας περιοχής (Ηλιόπουλος, 2013).

2.2.1 Τοπογραφία

Το υψόμετρο και ο προσανατολισμός (έκθεση) των πρανών 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 κατάντη 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 & Buck, 1970).

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

2.2.2 Καύσιμη ύλη

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 2μ. από το έδαφος που περιλαμβάνει τον ξηροτάπητα, την ποώδη βλάστηση, τους θάμνους, τα φρύγανα κλπ). Αυτά τα καύσιμα συνιστούν την επιφανειακή καύσιμη ύλη, στην οποία διαδίδονται οι πυρκαγιές επιφανείας. Στην εναέρια καύσιμη ύλη (που περιλαμβάνει τα καύσιμα υλικά πάνω από 2μ. από το έδαφος όπως το φύλλωμα, οι λειχήνες, τα όρθια νεκρά δέντρα κλπ), τα οποία συνιστούν την εναέρια δασική καύσιμη ύλη, μέσω των οποίων διαδίδονται οι επικόρυφες πυρκαγιές κόμης. 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, στην 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 & 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

9

ύλη και όχι τον τύπο βλάστησης. Έτσι, πολλοί τύποι βλάστησης που ως καύσιμη ύλη έχουν παρόμοια ή ισοδύναμα χαρακτηριστικά αντιπροσωπεύονται από το ίδιο μοντέλο.

Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.)

Υπάρχουν τρεις μεγάλες κατηγοριοποιήσεις των δασικών καυσίμων, οι οποίες συνιστούν τα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.) που χρησιμοποιούνται ανά περίπτωση στους προσομοιωτές συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών. Η πρώτη κατηγορία δημιουργήθηκε από τον Andrews (1986) και προσαρμόστηκε στη μεσογειακή βλάστηση από τον Kalabokidis (2004), Πίνακας 2-2. Περιλαμβάνει 13 Μ.Κ.Υ.

М.К.Ү.	Περιγραφή		
1	Short grasses (30cm)	Ποολίβαδα	
2	Timber (grass and understory)	Δασολίβαδα	
3	Tall grass (76 cm)	Λιβάδια (υψηλή βλάστηση)	
4	Chaparral (18 cm)	Θαμνώνες (αείφυλλα - σκληρόφυλλα)	
5	Brush (61cm)	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 2-2: Τα 13 Μ.Κ.Υ. από τους Andrews (1986) και Kalabokidis (2004)

Η δεύτερη κατηγορία ταξινόμησης Μ.Κ.Υ. πραγματοποιήθηκε από τον Dimitrakopoulos (2002), ο οποίος και προσάρμοσε 7 Μ.Κ.Υ. στον ελλαδικό χώρο μέγιστου ύψους έως 3μ., Πίνακας 2-3.

M.K.Y.	Περιγραφή
1	Χαμηλά Μακί (έως 1 μέτρο) – Evergreen schlerophyllous shrublands (up to 1.5 m)
2	Υψηλά Μακί (1,5 – 3 μέτρα) - Evergreen-schlerophyllous shrublands (1.5 – 3.0 m)
3	Πρινώνες (έως 2 μέτρα) – Quercus coccifera (up to 2.0 m)
4	Φρύγανα Ι (Ασφάκα) – Phrygana I (Phlomis fruticosa)
5	Φρύγανα ΙΙ (Αστοιβίδα) – Phrygana II (Sarcopoterium spinosum)
6	Μεσογειακά χορτολίβαδα – Mediterranean grasslands
7	Ξηροβελονοτάπητας σε Μεσογειακά Δάση Πεύκης – Mediterranean pine needle litter

Πίνακας 2-3: Τα 7 Μ.Κ.Υ. από τον Dimitrakopoulos (2002)

Η Τρίτη κατηγορία περιλαμβάνει 40 Μ.Κ.Υ. (Scott & Burgan, 2005), τα οποία αναπτύχθηκαν κυρίως για να ταιριάζουν με τις προσομοιώσεις πυρκαγιών που στηρίζονται στις εξισώσεις του Rothermel (1972), Πίνακας 2-4.

M.K.Y.	Περιγραφή		
GR1, GR2, GR3, GR4, GR5,	Nearly Pure Grass/Or Forb	Ποολιβαδα	
GR6, GR7, GR8, GR9	Type (Grass)	•	
	Mixture of grass and shrub	Θαμνολίβαδα (τουλάχιστον	
651, 652, 653, 654	(Grass-Shrub)	50% κάλυψη θάμνων)	
SH1, SH2, SH3, SH4, SH5,	Shrub cover at least 50 shrub	Θαμνότοποι	
SH6, SH7, SH8, SH9	coverage (Shrub)		
	Grass or shrubs mixed with	Σύμπυκνα δάση	
TU1, TU2, TU3, TU4, TU5	litter from forest canopy	(ξηροτάπητας και	
	(Timber- understory)	υπόροφος)	
	Dead and down woody fuel		
	(litter) beneath a forest	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)	
117, 118, 119	canopy (Timber-Litter)		
	Activity fuels (slash) or		
SB1, SB2, SB3, SB4	debrits from wind damage	Υπολείμματα υλοτομιών	
	(Slash – Blowdown)		
	Insufficient wildland fuel	Υλικά που δεν επιδέχονται	
INDI, INDZ, INDO, INDO, INDO	(Non-burnable)	καύση	

Πίνακας 2-4: Τα 40 Μ.Κ. Υ. των Scott & Burgan (2005)

2.2.3 Μετεωρολογικοί παράγοντες

Οι μετεωρολογικοί παράγοντες 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. Οι μετεωρολογικοί παράγοντες που αφορούν αμιγώς τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών, ανήκουν στην περιοχή της Πυρο-μετεωρολογίας (Ηλιόπουλος, 2013).

2.3 Καλύψεις και χρήσεις γης

Ο όρος "κάλυψη γης" είναι η βιοφυσική κατάσταση της γήινης επιφάνειας και του άμεσου υποστρώματός της (Turner et al., 1995). Με άλλα λόγια δηλαδή, ο όρος "κάλυψη γης" αναφέρεται στον τύπο της βλάστησης που καλύπτει την επιφάνεια της γης, τις ανθρώπινες κατασκευές όπως για παράδειγμα κτίρια ή δρόμους, αλλά και άλλες πλευρές του φυσικού περιβάλλοντος όπως είναι για παράδειγμα τα πετρώματα, η βιοποικιλότητα ή τα επιφανειακά νερά (Moser, 1996).

Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environment Agency, 2007) ως "χρήση γης" ορίζεται η ανθρώπινη τροποποίηση του φυσικού περιβάλλοντος ή των ακαλλιέργητων εκτάσεων σε αγρούς, λιβάδια, και οικισμούς. Αντιστοιχεί στην κοινωνικοοικονομική περιγραφή των εκτάσεων και περιγράφει εκτάσεις που χρησιμοποιούνται ως κατοικήσιμες, καθώς και εκτάσεις που χρησιμοποιούνται για σκοπούς βιομηχανικούς, εμπορικούς, δασοκομικούς και για καλλιέργειες. Συνεπώς η σχέση μεταξύ κάλυψης και χρήσης γης είναι ότι ο όρος της κάλυψης γης αφορά στη φυσική διάσταση της χρήσης γης.

2.4 Δορυφορικά συστήματα για τη χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης

Η επιστήμη της Τηλεπισκόπησης είναι πολύ σημαντική για τον άνθρωπο μιας και παρέχει την δυνατότητα για παρατήρηση, χαρτογράφηση και παρακολούθηση του περιβάλλοντος και της γήινης επιφάνειας. Η "φωτοερμηνεία" και η "τηλεπισκόπηση" είναι δύο προσεγγίσεις οι οποίες έχουν ως κύριο στόχο την ερμηνεία του φυσικού και τεχνητού περιβάλλοντος μέσω ποιοτικών και ποσοτικών πληροφοριών, που βρίσκονται στην διάθεση του επιστήμονα ειδικού. Η χαρτογράφηση στην επιστήμη της Τηλεπισκόπησης πραγματοποιείται με μεθόδους ταξινόμησης οι οποίες εξελίσσονται συνεχώς. Η πλέον σύγχρονη μέθοδος ταξινόμησης είναι αυτή της αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης εικόνας. Η Τηλεπισκόπηση σε συνδυασμό με την αντικειμενοστρεφή ανάλυση εικόνας αποτελούν δύο καταγραφή και την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος, με εφαρμογές σε πολλές κατηγορίες, όπως η γεωλογία των εδαφών, ο αστικός χώρος, οι φυσικές καταστροφές και διάφορα άλλα φαινόμενα τα οποία σχετίζονται με την γήινη επιφάνεια.

Στις μέρες μας υπάρχει μια πληθώρα από αισθητήρες, για εμπορικούς και ερευνητικούς σκοπούς, καθένας από τους οποίους παρουσιάζει διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά, τα οποία μειώνουν το κόστος, το χρόνο και βελτιώνουν τις συνθήκες εργασίας. Καθένας από τους αισθητήρες παρουσιάζει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στην καταγραφή των ιδιοτήτων της βλάστησης, στη σχέση κόστους – οφέλους κ.λ.π. που σχετίζονται με τα διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, όπως χωρικά, φασματική και χρονική ανάλυση. Για τη διερεύνηση και χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης έχει γίνει χρήση τηλεπισκοπικών προσεγγίσεων, όπως αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες χαμηλής, μέσης και υψηλής ανάλυσης, καθώς και συνδυασμός αυτών (Στεργιόπουλος, 2010).

Οι δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης και διακριτικής ικανότητας αποτελούν σήμερα τα σημαντικότερα δεδομένα τηλεπισκόπησης, καθώς επιδέχονται από το χρήστη κάθε είδους επεξεργασία, με τελικό σκοπό την εξαγωγή όσο το δυνατό ποιοτικής και ποσοτικής πληροφορίας σχετικά με τα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου και της κάλυψης της γης. Χρήσιμο εργαλείο της γεωπληροφορικής για την απεικόνιση γεωγραφικών δεδομένων αποτελεί η τρισδιάστατη οπτικοποίηση. Η «γεωγραφική οπτικοποίηση», ή «γεω-οπτικοποίηση» (geovisualization), όπως συχνά αναφέρεται, συνδυάζει υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες και συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών και επικεντρώνεται στην τρισδιάστατη προβολή των χωρικών δεδομένων, αυξάνοντας τον επιδιωκόμενο βαθμό ρεαλισμού. Η γεω-οπτικοποίηση μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα στάδια της επίλυσης προβλημάτων στη γεωγραφική ανάλυση, όπως ανάπτυξη σεναρίων, ανάλυση, παρουσίαση αποτελεσμάτων και αξιολόγηση (Buckley et al, 2000). Συνεπώς, οι τεχνολογίες της Γεω-Πληροφορικής μπορούν να συμβάλλουν νέες στην αποτελεσματικότερη οργάνωση της προστασίας του περιβάλλοντος με τον έγκαιρο εντοπισμό και εκτίμηση των κινδύνων, τη συστηματική παρακολούθηση των βιοφυσικών και κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων και την υποστήριξη των αποφάσεων διαχείρισης.

2.4.1 Πολυφασματικά δεδομένα

Ιστορία των δορυφόρων Landsat – Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η αρχική ονομασία του Δορυφορικού Τηλεπισκοπικού Προγράμματος LANDSAT ήταν ERTS (Earth Resources Technology Satellites) της NASA. Ο πρώτος δορυφόρος ERTS πήρε το όνομα LANDSAT-1 και μέχρι σήμερα έχουν εκτοξευθεί 8 δορυφόροι στο πλαίσιο του προγράμματος. Προβλέπεται μελλοντικά να εκτοξευθεί και ο 9^{ος} δορυφόρος LANDSAT το 2023, Σχήμα 2-3.

Οι τηλεπισκοπικοί δέκτες των δορυφόρων Landsat είναι οι εξής:

- Return Beam Vidicom (RBV) Landsat 1, 2 και 3
- Multi Spectral Scanner (MSS) Landsat 1, 2, 3, 4 και 5
- Thematic Mapper (TM) Landsat 4 και 5
- Enhanced Thematic Mapper (ETM) Landsat 6 και 7
- Operational Land Imager (OLI) Landsat 8
- Thermal Infrared Sensor (TIRS) Landsat 8



Σχήμα 2-3: Διαχρονική και μελλοντική εξέλιξη των δορυφόρων Landsat (Πηγή: <u>https://www.researchgate.net/</u>, 2017)

Στον παρακάτω Πίνακα 2-5, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ιστορικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων Landsat.

Δορυφόροι	Ημερομηνία εκτόξευσης	Τέλος αποστολής	Ύψος πτήσης (km)	Γωνία (μοίρες)	Κύκλος Τροχιάς	Τηλεπισκοπικοί δέκτες
Landsat 1	23/07/1972	06/01/1978	907	99,2	18	RBV, MSS
Landsat 2	22/01/1975	05/06/1982	908	99,2	18	RBV, MSS
Landsat 3	05/03/1978	07/01/1983	915	99,2	18	RBV, MSS
Landsat 4	16/07/1982	1993	705	98,2	16	MSS, TM
Landsat 5	01/03/1984	2013	705	98,2	16	MSS, TM
Landsat 6	05/10/1993	Απέτυχε	-	-	-	-
Landsat 7	15/04/1999	Σήμερα	705	98,2	16	ETM+
Landsat 8	11/02/2013	Σήμερα	701	98,2	16	OLI, TIRS

Πίνακας 2-5: Ιστορικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων Landsat (Πηγή: Φράγκου, 2016)

Ο δορυφόρος Landsat 8 μεταφέρει δύο όργανα καταγραφής:

- Operational Land Imager (OLI)
- Thermal Infrared Sensor (TIRS)

Αυτοί οι δύο αισθητήρες παρέχουν εποχιακή κάλυψη της παγκόσμιας ξηράς σε χωρική ανάλυση 30 μέτρων για τα κανάλια που βρίσκονται στο ορατό, κοντινό υπέρυθρο και μέσο υπέρυθρο, 100 μέτρων για τα θερμικά κανάλια και 15 μέτρων για το παγχρωματικό κανάλι. Ο αισθητήρας OLI συλλέγει δεδομένα στο ορατό κοντινό υπέρυθρο, μυκροκυματικό υπέρυθρο, καθώς και στο παγχρωματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τέλος, ο αισθητήρας OLI παρέχει δύο νέες φασματικές ζώνες, μία προσαρμοσμένη ειδικά για την ανίχνευση νεφών (Κανάλι 9) και μια για την παρατήρηση της παράκτιας ζώνης (Κανάλι 1). Όσον αφορά τον αισθητήρα TIRS, συλλέγει δεδομένα σε 2 φασματικά κανάλια στο τμήμα του θερμικού υπέρυθρου, σε αντίθεση με τους προηγούμενους δορυφόρους του προγράμματος Landsat στους οποίους υπήρχε μόνο 1 φασματικό κανάλι στο συγκεκριμένο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (Φράγκου, 2016). Στον Πίνακα 2-6, απεικονίζονται όλα τα κανάλια (Bands) του Landsat 8 με τα αντίστοιχά τους τεχνικά χαρακτηριστικά.

Στο Σχήμα 2-4, απεικονίζεται εικόνα του δορυφόρου Landsat 8.

Πίνακας 2-6: Κανάλια του δορυφόρου Landsat 8 και τα χαρακτηριστικά τους (Πηγή: <u>http://www.pancroma.com/</u>, 2017)

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100



Σχήμα 2-4: Δορυφόρος Landsat 8 (Πηγή: https://directory.eoportal.org/, 2017)

Δορυφόροι Landsat και χαρτογράφηση καύσιμης ύλης

Η χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης με εικόνες τηλεπισκόπησης γίνεται με την ανάλυση αισθητήρων μέτριας έως υψηλής ανάλυσης, όπως ο πολυφασματικός σαρωτής Landsat MSS και ο θεματικός χαρτογράφος Landsat TM. Τα χαρακτηριστικά του Landsat αποτελούν τη χρυσή τομή μεταξύ της φασματικής και χρονικής ανάλυσης και έχουν επαρκή χωρική κάλυψη για τις ανάγκες της χαρτογράφησης (Riano et al, 2002). Ωστόσο δεν παρέχουν άμεσα πληροφορίες σχετικά με το ύψος της βλάστησης που αποτελεί βασικό κριτήριο για τη διάκριση κάποιων τύπων καυσίμου. Επιπρόσθετα, όταν η κάλυψη της βλάστησης είναι πυκνή δεν καταγράφονται πληροφορίες σχετικά με το δασικό υπόροφο κι έτσι δεν υπάρχουν δεδομένα για τα επιφανειακά καύσιμα.

Ο Kourtz (1977) εφήρμοσε σε εικόνες Landsat MSS τις βασικότερες τεχνικές ψηφιακής ταξινόμησης των δορυφορικών δεδομένων. Χαρακτηριστικά πραγματοποίησε επιβλεπόμενη ταξινόμηση με τον αλγόριθμο μέγιστης πιθανότητας, μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση και ανάλυση των βασικών συνιστωσών. Εφήρμοσε ταξινόμηση με εννέα κλάσεις καυσίμων στον Καναδά. Με την διαχρονική ανάλυση δεδομένων των δορυφορικών εικόνων κατάφερε να αξιοποιήσει την μεταβλητότητα των καυσίμων σε σχέση με τον χρόνο. Με βάση την εργασία του Kourtz (1977) ο οποίος εισήγαγε τις βασικές τεχνικές ψηφιακής ταξινόμησης των τύπων καυσίμου σε δορυφορικά δομένα, βασίστηκαν πολλοί ερευνητές στη συνέχεια για μελέτες ψηφιακής ανάλυσης και ταξινόμησης δορυφορικών δεδομένων.

Ο θεματικός χαρτογράφος Landsat TM χρησιμοποιήθηκε το 2001 από τους Darmawan et al. με σκοπό την χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης στην Ινδονησία στο Ανατολικό Kalimantan. Ο σκοπός της έρευνας ήταν να δημιουργήσουν μοντέλο κινδύνου πυρκαγιάς, καθώς και ένα χάρτη καύσιμης ύλης. Από την ταξινόμηση των δορυφορικών εικόνων Landsat προέκυψε η καύσιμη ύλη σε συνδυασμό με δεδομένα καλύψεων – χρήσεων γης (δείκτης NDVI) εφαρμόζοντας την μέθοδο της επιβλεπόμενης ταξινόμησης.

Οι Riano et al. (2002) προσπάθησαν να διαχωρίσουν τους διαφορετικούς τύπους καύσιμης ύλης σε μεσογειακά οικοσυστήματα. Συνδύασαν βοηθητικά δεδομένα με στόχο την ανάπτυξη μεθοδολογίας για την παραγωγή χαρτών της καύσιμης ύλης για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πυρκαγιών. Με το σύστημα Prometheus πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση καύσιμης ύλης και χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον βοηθητικά δεδομένα όπως το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM), δείκτες βλάστησης NDVI, NVII5, NVII7, χάρτες με τις κλίσεις εδάφους σε συνδυασμό με τη φωτεινότητα και με μετρήσεις πεδίου σχετικά με την περιγραφή των καυσίμων.

Οι Chuvieco et al. (2002) πραγματοποίησαν μια προσπάθεια να προσδιορίσουν δείκτες οποίοι είναι δυνατόν να εκτιμήσουν την υγρασία ζωντανών καυσίμων. Οι δείκτες αυτοί προέκυψαν μετά από στατιστική ανάλυση των ανακλάσεων από δορυφόρο Landsat σε συνδυασμό με δείκτες NDVI, NDII, LWCI, υγρασίας κ.ο.κ.

Ο πολυφασματικός δορυφόρος Landsat TM χρησιμοποιήθηκε από τους Van Wagtendonk και Root (2003) με σκοπό την μελέτη και την εφαρμογή της χρήσης του δείκτη NDVI στην χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης στις ΗΠΑ. Οι τιμές του δείκτη NDVI προέκυψαν από δορυφορικά δεδομένα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Κατάφεραν να υλοποιήσουν αλγόριθμο μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης με σκοπό να οριστούν 30 κλάσεις, φασματικά και χρονικά, NDVI τιμών. Εν συνεχεία έγινε ο χαρακτηρισμός των κλάσεων και η αναγνώριση εκείνων με παρόμοια συμπεριφορά με σκοπό να συνδυαστούν στα μοντέλα καυσίμων του Yosemite National Park των ΗΠΑ.

Οι Flores-Garnica & Omi (2003) κατάφεραν να χαρτογραφήσουν την καύσιμη ύλη με την χρήση δορυφορικών εικόνων Landsat. Αρχικά μέτρησαν το βάρος των νεκρών καυσίμων και τα ταξινόμησαν με βάση το σύστημα Anderson(1982) για την περιοχή μελέτης. Για κάθε ένα δείγμα υπολογίστηκαν οι αναλογίες βάρους για κάθε φορτίο καυσίμου, δηλαδή Fuel Proportional Factor – FPF. Τέλος μετέτρεψαν τα παραπάνω στοιχεία σε επίπεδα πληροφοριών σε μορφή καννάβου με την χρήση γεωστατικών μεθόδων όπου τελικά

17

Το 2003 οι Wimberly et al., με στατιστικά μοντέλα επέλεξαν τις αντιπροσωπευτικές εκτάσεις εδάφους από ένα σύνολο περιοχών όπου πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες, με σκοπό να χαρακτηριστούν και οι περιοχές του τοπίου όπου δεν έγιναν δειγματοληψίες. Το είδος, το ύψος και η πυκνότητα της βλάστησης από τις επιλεγμένες περιοχές χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των υπόλοιπων περιοχών. Επιπλέον συνδυάστηκαν με μετρήσεις εικόνων Landsat, τοπογραφία, κλιματολογικές συνθήκες και άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες της περιοχής μελέτης ώστε να δημιουργήσουν μοντέλα καυσίμου.

Στην συνέχεια ακολούθησαν άλλες μελέτες στις οποίες ενσωματώθηκαν και συνεπεξεργάστηκαν με τα αρχικά δεδομένα όπως οι δείκτες βλάστησης κ.λ.π., με σκοπό την αύξηση της ακρίβειας της χαρτογράφησης (Van Wagtendonk, 1997).

Το 2003 οι Koutsias & Karteris με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων Landsat TM χαρτογράφησαν στη Χαλκιδική τους δασικούς τύπους με συγκεκριμένη πυρική συμπεριφορά. Για την πραγματοποίηση της χαρτογράφησης χρησιμοποιήθηκαν οι δίαυλοι του δορυφόρου, δείκτης βλάστησης NDVI, η Greennes συνιστώσα του μετασχηματισμού Tasseled Cap, συνιστώσες από την εφαρμογή της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες και τέλος το ψηφιακό μοντέλο εδάφους για τον νομό. Τα αποτελέσματα ήταν ικανοποιητικά και σημείωσαν πως με τη διαχρονική χρήση δεδομένων μπορεί να αυξηθεί η ακρίβεια και η λεπτομέρεια της ταξινόμησης.

Οι Brandis και Jacobson (2003) οι οποίοι μελέτησαν τη δυνατότητα εκτίμησης των φορτίων καυσίμου με δεδομένα Landsat σε δασικές εκτάσεις και θαμνολίβαδα στην Αυστραλία, ανέπτυξαν δυο μεθοδολογίες. Και οι δυο μεθοδολογίες αφορούν τη χρήση δεδομένων Landsat TM. Η πρώτη συνδυάζει τεχνικές ταξινόμησης για την εκτίμηση της βλάστησης και των τύπων της με βάση δεδομένα ιστορικών πυρκαγιών. Η δεύτερη χρησιμοποιώντας το ρυθμό ανακύκλωσης της βιομάζας στην κομοστέγη, με σκοπό την εκτίμηση της ποσότητας της οργανικής ουσίας και συνεπώς της οργανικής ύλης στο έδαφος. Και για τις δυο μεθοδολογίες χρησιμοποιήθηκαν και δεδομένα πεδίου από την περιοχή μελέτης. Στην πρώτη μεθοδολογία οι τιμές πεδίου ήταν μικρότερες ενώ στην δεύτερη πιο κοντά στις κανονικές ποσότητες των καυσίμων.

Στη Νότια Καλιφόρνια οι Yool et al. (1985) με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων Landsat MSS προσπάθησαν να περιγράψουν τα καύσιμα στις θαμνώδες εκτάσεις ενώ οι Hardwick et al. (1998) έκαναν αντιστοίχηση των μοντέλων καυσίμου του Anderson (1982)

18

με του τύπους βλάστησης που προέκυψαν από την ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων Landsat TM.

Οι Salas & Chuvieco (1994) κατάφεραν να ταξινομήσουν 11 μοντέλα του Anderson (1982) απευθείας σε δορυφορικές εικόνες του Landsat TM και προσδιόρισαν κατηγορίες βλάστησης για κάθε ένα μοντέλο καυσίμου με σκοπό τον υπολογισμό του κινδύνου έναρξης μιας πυρκαγιάς σε μεγάλη κλίμακα στην περιοχή της Ισπανίας.

Οι Campbell et al (1995) ταξινόμησαν τα μοντέλα καυσίμου σε δορυφορικές εικόνες Landsat TM της περιοχής Camp Lejuene, North Carolina με σκοπό να γίνει εξομοίωση προδιαγραμμένης καύσης με το σύστημα προσομοίωσης συμπεριφοράς πυρκαγιών Farsite.

Οι Lasaponara & Lanorte (2006) με την χρήση του πολυφασματικού δορυφόρου Landsat TM μελέτησαν τη δυνατότητα χαρτογράφησης καυσίμων με δεδομένα ίδιας χρονολογικής περιόδου με το εθνικό πάρκο Pollino, της Νότιας Ιταλίας. Σε συνδυασμό με μετρήσεις πεδίου οι οποίες πραγματοποιήθηκαν την ίδια χρονική περίοδο και αεροφωτογραφιών, πραγματοποιήθηκε η αναγνώριση των καυσίμων στα δορυφορικά δεδομένα. Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου της μέγιστης πιθανοφάνειας ακολούθησε η εκτίμηση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Το ίδιο έγινε μετά την εφαρμογή του μοντέλου Mixtured Tuned Filtering, το οποίο βασίζεται στην υπόθεση πως το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που καταγράφεται στον αισθητήρα είναι ένας γραμμικός συνδυασμός του φάσματος όλων των στοιχείων του εικονοστοιχείου. Από τη σύγκριση προέκυψε πως η χαρτογράφηση των καυσίμων με τη χρήση "unmixing methods" αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με τον κλασικό αλγόριθμο ταξινόμησης της μέγιστης πιθανοφάνειας.

2.5 Μοντέλα πρόβλεψης συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών

Τα μοντέλα και τα συστήματα πρόβλεψης της συμπεριφοράς και προσομοίωσης της χωρικής εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών, αξιοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων κατά τη διαχείρισή τους. Συχνά αποτελούν τμήματα Συστημάτων Υποστήριξης Λήψης Αποφάσεων (Decision Support Systems: DSS) ή/και τμήματα ευρύτερων μοντέλων για: α) την πρόβλεψη του Κινδύνου Πυρκαγιάς (Fire Danger) που περιλαμβάνει την πιθανότητα έναρξης, την ταχύτητα εξάπλωσης, τη δυσκολία αντιμετώπισης και τις συνέπειές της και β) για τη διαχείριση της καύσιμης ύλης (π.χ. προδιαγεγραμμένη καύση) (Αθανασίου, 2015). Σύμφωνα με τους Alexander & Cruz (2013), οι δύο κύριες κατηγορίες είναι τα φυσικά και τα εμπειρικά ή ημι-εμπειρικά μοντέλα.

2.5.1 Φυσικά μοντέλα

Τα φυσικά μοντέλα περιγράφουν τη συμπεριφορά της φωτιάς χρησιμοποιώντας τους φυσικούς και χημικούς νόμους της καύσης, εισάγοντας μεγάλο αριθμό παραμέτρων στις εξισώσεις τους, οπότε η αξιοποίησή τους μέσω ηλεκτρονικών υπολογιστών καθίσταται δυσχερείς και η χρήση τους σε πραγματικές συνθήκες, ουσιαστικά αδύνατη. Για την κατανόηση των αλγορίθμων τους, οι οποίοι περιγράφουν λεπτομερώς τις χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την έναυση και την ποσότητα της "αποδοτικής θερμότητας καύσης" (heat yield), απαιτείται πολύ καλή γνώση μαθηματικών. Χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή πειραμάτων, την ανάπτυξη λογισμικού ή για την υποστήριξη της έρευνας (Van Wagner, 1985).

2.5.2 Εμπειρικά μοντέλα

Τα εμπειρικά (ή στατιστικά) μοντέλα βασίζονται στη στατιστική ανάλυση της συμπεριφοράς πειραματικών ή πραγματικών τεκμηριωμένων πυρκαγιών και όχι στη θεωρία της καύσης. Δημιουργούνται μέσω στατιστικών συσχετίσεων και προσπαθούν να περιγράψουν και να ποσοτικοποιήσουν τα βασικά χαρακτηριστικά που περιγράφουν τη συμπεριφορά της φωτιάς. Στο σύνολο των εμπειρικών μοντέλων, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι για τον προσδιορισμό του ρυθμού εξάπλωσης της φωτιάς (Rate Of Spread) που συχνά αναφέρεται ως ROS στη διεθνή βιβλιογραφία. Άλλες βασικές παράμετροι είναι το ύψος και το μήκος της φλόγας, η ένταση και η χωρική απόδοση του σχήματος της πυρκαγιάς.

Αξιοποιούνται επιχειρησιακά, λόγω της απλότητας, της πρακτικής τους φύσης και της άμεσης σύνδεσής τους με τη συμπεριφορά των πραγματικών δασικών πυρκαγιών. Καλύπτουν ανάγκες που προκύπτουν κατά το σχεδιασμό της καταστολής, στοχεύοντας στην περιγραφή της εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών, σε πραγματικές συνθήκες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα δασοπυροσβεστικά πληρώματα πολλές φορές εργάζονται υπό συνθήκες ισχυρών ανέμων, όπου η ανάγκη ταχείας αναπροσαρμογής των τακτικών είναι δεδομένη, τα περισσότερα εμπειρικά μοντέλα είναι μονοδιάστατα και επικεντρώνονται στην πρόβλεψη του ROS της κεφαλής της πυρκαγιάς (downwind ή head ROS) (Αθανασίου, 2015).

2.5.3 Ημι-εμπειρικά μοντέλα

Τα ημι-εμπειρικά μοντέλα αναπτύσσονται με βάση δεδομένα τα οποία συλλέγονται κατά τη διάρκεια παρατηρήσεων εργαστηριακών πυρκαγιών και αναλύονται με βάση τους φυσικούς νόμους, αναζητώντας τη σχέση ή την απουσία σχέσης μεταξύ συγκεκριμένων παραμέτρων. Η κλίμακα στην οποία διεξάγονται τα πειράματα στο εργαστήριο, δεν μπορεί να αναπαραστήσει τις ροές ενέργειας και μάζας και τις σχετικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάδοση της φωτιάς στις πραγματικές πυρκαγιές (Van Wagner, 1985), περιορίζοντας καθοριστικά τη δυνατότητα μοντελοποίησης εξαιτίας αυτής της διαφοράς κλίμακας. Παραδείγματος χάριν, αδυνατούν να προσδιορίσουν τους βαθμούς επίδρασης της επαγωγής και της ακτινοβολίας σε σχέση με τα επίπεδα έντασης της πυρκαγιάς καθώς και την αλληλεπίδραση της οριζόντιας συνιστώσας του ανέμου με την κατακόρυφη επαγωγή. Η ένταση των πραγματικών πυρκαγιών μπορεί αντικειμενικά να προσεγγίσει ούτε το επίπεδο μερικών εκατοντάδων kW/m (Van Wagner 1985).

Το μοντέλο του Rothermel (1972) είναι το πιο δημοφιλές ημι-εμπειρικό μοντέλο. Αξιοποίησε δεδομένα από: α) εργαστηριακά πειράματα σε αεροδυναμική σήραγγα, σ' ένα μεγάλο εύρος χαρακτηριστικών της καύσης και β) από μελέτες πεδίου που είχαν διεξαχθεί στην Αυστραλία σε ποικίλες συνθήκες ανέμου (McArthur 1969). Η ευρεία δυνατότητα χρήσης του μοντέλου του Rothermel (1972), οδήγησε στη δημιουργία πολλών συστημάτων πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών και της χωρικής προσομοίωσης της εξάπλωσής τους που βασίζονται σ' αυτό.

Μοντέλο του Rothermel

Το μαθηματικό, ημιεμπειρικό μοντέλο διάδοσης της φωτιάς του Rothermel (1972), έχει διαπιστωθεί ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών επιφάνειας σε οποιονδήποτε τύπο δασικής βλάστησης (ύψους έως 2 μέτρων περίπου), αρκεί αυτός να περιγραφεί με τη μορφή αντιπροσωπευτικού μοντέλου καύσιμης ύλης (Rothermel, 1972, Ξανθόπουλος, 1990, Αθανασίου & Ξανθόπουλος 2009). Στο μοντέλο του Rothermel (1972) βασίζεται, με μικρές διαφοροποιήσεις, το Εθνικό Σύστημα Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιών (NFDRS) των Η.Π.Α. (Deeming et al, 1972) και το σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς επιφανείας Behave (Burgan & Rothermel, 1984) της Δασικής Υπηρεσίας των Η.Π.Α. Είναι προσαρμόσιμο και πρακτικό, η αξιοπιστία του έχει ελεγχθεί σε πολλούς διαφορετικούς τύπους δασικών καυσίμων και οι αδυναμίες του είναι γνωστές (Athanasiou & Xanthopoulos, 2010).

Το μοντέλο Farsite

Το μοντέλο του Rothermel (1972) αποτελεί, επίσης, τον πυρήνα του συστήματος FARSITE (Finney, 1998) το οποίο είναι ένα ελεύθερο λογισμικό που προσομοιώνει χωρικά – σε δύο διαστάσεις - την εξάπλωση και τη συμπεριφορά δασικών πυρκαγιών (Stratton, 2006). Περιλαμβάνει προσαρμογές του Albini (1976a) για την εξάπλωση της πυρκαγιάς επιφανείας και ενσωματώνει πολλά ακόμα μοντέλα και αλγόριθμους.

Η ένταση και η ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς επιφανείας υπολογίζεται για δεδομένο αριθμό σημείων ανάλογα με τη χωρική ανάλυση των πλεγματικών αρχείων που συνιστούν το αρχείο τοπίου. Η χωρική εξάπλωση της φωτιάς προσομοιώνεται ως ελλειπτικό κύμα διάδοσης με βάση την Αρχή του Huygens, κατά την οποία κάθε σημείο του μετώπου ενός κύματος συμπεριφέρεται σαν πηγή κύματος και το συνολικό μέτωπο είναι εφαπτόμενο στα επιμέρους μέτωπα που δημιουργεί κάθε σημείο. Η διάδοση της πυρκαγιάς παρουσιάζεται ως ένα συνεχώς διευρυνόμενο πολύγωνο πυρκαγιάς (Anderson et al, 1982).

Τα δεδομένα εξόδου (αποτελέσματα) των προσομοιώσεων, είναι είτε πίνακες (π.χ. καμένη έκταση ανά χρονικό βήμα) είτε διανυσματικά αρχεία (shapefiles) (περίμετρος της φωτιάς ανά χρονικό βήμα) είτε πλεγματικά αρχεία (με τιμές του ρυθμού εξάπλωσης, του μήκους φλόγας, κ.α.) (Finney, 1998).

Το μοντέλο BehavePlus

Αρχικά δημιουργήθηκε η εφαρμογή Behave που είχε ως πυρήνα το μοντέλο του Rothermel (1972) και αποτελείται από δύο υποσυστήματα: α) το FUEL (Burgan & Rothermel, 1984) για την περιγραφή των δασικών καυσίμων ώστε να είναι εφικτή η χρήση τους στο μοντέλο πρόβλεψης της συμπεριφοράς της φωτιάς, και β) το BURN (Andrews, 1986, Andrews & Chase, 1989) για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της φωτιάς.

Στη συνέχεια, το Behave αναπτύχθηκε σταδιακά και το σημερινό λογισμικό BehavePlus (Andrews et al, 2005, Andrews et al, 2008, Andrews, 2009) έχει ενσωματώσει πολλά επιμέρους μοντέλα και σύνολα μαθηματικών εξισώσεων, για την πρόβλεψη συμπεριφοράς της φωτιάς (Stratton, 2006). Το BehavePlus έχει δοκιμαστεί με επιτυχία και χρησιμοποιείται - εκτός από τις Η.Π.Α - σε χώρες της Ασίας και της Ευρώπης (Ξανθόπουλος, 1990). Για τον υπολογισμό της έντασης (Intensity) και του ρυθμού εξάπλωσης (ROS) της φωτιάς, ως δεδομένα εισόδου χρησιμοποιούνται η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του μέσου της φλόγας, η μορφολογική κλίση, η περιεχόμενη υγρασία των κατηγοριών των δασικών καυσίμων (με βάση τη διάμετρό τους) και ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο καύσιμης ύλης, που περιγράφει τα επιφανειακά δασικά καύσιμα (Rothermel, 1972, Ξανθόπουλος, 1990).

Η επιλογή του Μ.Κ.Υ. για την περιγραφή των δασικών καυσίμων τις περισσότερες φορές δεν είναι εύκολη ενώ υπάρχουν φορές που είναι απαγορευτική και απαιτείται η δημιουργία ειδικά προσαρμοσμένου (τοπικού) Μ.Κ.Υ.

Το μοντέλο του Rothermel (1972) που αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος BehavePlus (Andrews, 2005), έχει σχεδιαστεί για να προσομοιάζει τη συμπεριφορά της φωτιάς η οποία έχει προσεγγίσει μία περίπου σταθερή (quasi-steady) κατάσταση εξάπλωσης η οποία, σύμφωνα με τους Cheney and Gould (1997), για τα λεπτά καύσιμα (χόρτα) αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα από τα πρώτα τριάντα λεπτά έως και τις έξι ώρες μετά την έναρξή της. Οι προβλέψεις του ROS από το BehavePlus, αναφέρονται στη μέση τιμή του ROS αυτού του διαστήματος. Συχνά, εκτός αυτής της χρονικής περιόδου, η φωτιά συμπεριφέρεται διαφορετικά και χωρίς να μπορεί να προβλεφθεί ακόμα και από τα πιο επιτυχημένα και συχνά χρησιμοποιούμενα μοντέλα πρόβλεψης (Sullivan, 2009d).

2.6 Προσομοιώσεις συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών με το πρόγραμμα Farsite

Σε ότι αφορά τον ελλαδικό χώρο και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που αυτός ενσωματώνει, όπως το γεωμορφολογικό ανάγλυφο και τη μεσογειακή βλάστηση, υπάρχουν δύο μελέτες που πραγματεύονται τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών με χρήση του προγράμματος προσομοίωσης Farsite. Οι δύο μελέτες – Διδακτορικές Διατριβές ολοκληρώθηκαν από το Νικόλαο Ηλιόπουλο (2013) και τον Μιλτιάδη Αθανασίου (2015).

Οι μελέτες αυτές δεν περιελάμβαναν αμιγώς τη χρήση του Farsite, αλλά συνδυασμό του με άλλες περιοχές έρευνας, όπως η μετεωρολογία και τα εξειδικευμένα χαρακτηριστικά που απαντώνται κατά την εξέλιξη μιας δασικής πυρκαγιάς. Οι διατριβές αυτές έδειξαν, σε γενικές γραμμές, ότι το μοντέλο Farsite δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ολοκληρωτική και άρτια αποτύπωση μια δασικής πυρκαγιάς, διότι όπως θα δούμε παρακάτω υπεισέρχονται αρκετοί παράγοντες, πολλοί από τους οποίους είναι αστάθμητοι και απρόβλεπτοι. Παρόλα αυτά, μια καλή προετοιμασία των δεδομένων εισόδου στο πρόγραμμα μπορεί να δώσει, υπό συνθήκες, μια αρκούντως ικανοποιητική πρόβλεψη για τη συμπεριφορά μιας παρελθοντικής ή ενδεχόμενης δασικής πυρκαγιάς.

23

3 Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογική προσέγγιση

3.1 Επιλογή Μοντέλων Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.)

Για τις περιοχές μελέτης μας επιλέχθηκαν τα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.) των Scott & Burgan (2005) και αντιστοιχήθηκαν με τα Μ.Κ.Υ. που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα Farsite, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1.

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης (Scott-Burgan)	Περιοχή	Περιγραφή	Farsite (αντιστοίχιση)
NB1	Αδιαπέρατη επιφάνεια	Αστική περιοχή, Καλλιέργειες, Γυμνό έδαφος	91
NB8	Υδάτινη επιφάνεια	Υδάτινη επιφάνεια	98
GR4	Χορτολίβαδα	Χορτολιβαδικές εκτάσεις έως 0,6μ	104
SH2	Χαμηλοί θάμνοι	Χαμηλή σκληρόφυλλη βλάστηση έως 0,5μ	142
SH7	Υψηλοί θάμνοι	Υψηλή σκληρόφυλλη βλάστηση 1 έως 2μ	147
TU4	Αραιά κωνοφόρα	Αραιή σύσταση κωνοφόρου δάσους 2 έως 5μ	164
TU5	Πυκνά Κωνοφόρα	Πυκνή σύσταση κωνοφόρου δάσους 7 έως 10μ	165
TL2	Πλατύφυλλα	Δάσος πλατυφύλλων	182
TU1	Ελαιώνες	Ελαιώνες χωρίς υπόροφο έως 3μ	161

Πίνακας 3-1: Μοντέλα Καύσιμης Ύλης

Ο παραπάνω πίνακας προέκυψε και με τη χρήσιμη συμβολή της επιτόπιας έρευνας που έγινε στο πεδίο στις περιοχές του Υμηττού και της Κερατέας Αττικής. Στο Σχήμα 3-1, απεικονίζεται το Μ.Κ.Υ. GR4 – Χορτολίβαδα. Στο Σχήμα 3-2, απεικονίζεται το Μ.Κ.Υ. SH2 – Χαμηλοί θάμνοι. Στο Σχήμα 3-3, απεικονίζεται το Μ.Κ.Υ. SH7 – Υψηλοί θάμνοι. Στο Σχήμα 3-4, απεικονίζεται το Μ.Κ.Υ. TU4 – Αραιά κωνοφόρα. Στο Σχήμα 3-5, απεικονίζεται το Μ.Κ.Υ. TU5 – Πυκνά κωνοφόρα. Στο Σχήμα 3-6, απεικονίζεται το Μ.Κ.Υ. TU1 – Ελαιώνες.



Σχήμα 3-1: Μ.Κ.Υ. GR4 – Χορτολίβαδα



Σχήμα 3-2: Μ.Κ.Υ. SH2 – Χαμηλοί θάμνοι



Σχήμα 3-3: Μ.Κ.Υ. SH7 – Υψηλοί θάμνοι



Σχήμα 3-4: Μ.Κ.Υ. ΤU4 – Αραιά κωνοφόρα


Σχήμα 3-5: Μ.Κ.Υ. ΤU5 – Πυκνά κωνοφόρα



Σχήμα 3-6: Μ.Κ.Υ. ΤU1 – Ελαιώνες

3.2 Δορυφορικές εικόνες Landsat 8 OLI

Οι δορυφορικές εικόνες Landsat 8, αντλήθηκαν από την ιστοσελίδα της Αμερικάνικης Γεωλογικής Υπηρεσίας (USGS) <u>https://www.usgs.gov/</u>. Χρησιμοποιήθηκαν αυτές των πολυφασματικών καναλιών του δέκτη OLI κι έχουν χωρική ανάλυση (pixel size) 30x30 μέτρα.

3.2.1 Περιοχές μελέτης

Οι εικόνες Landsat που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της καύσιμης ύλης ανά ημερομηνία και περιοχή μελέτης είναι οι εξής:

• Κερατέα Αττικής: Εικόνα Landsat 8 OLI – 06/07/2014



Σχήμα 3-7: Εικόνα Landsat 8 OLI – 06/07/2014 – Κερατέα Αττικής

Μαλεσίνα Αταλάντης: Εικόνα Landsat 8 OLI – 01/04/2014



Σχήμα 3-8: Εικόνα Landsat 8 OLI – 01/04/2014 – Μαλεσίνα Αταλάντης

- Υμηττός Αττικής: Εικόνα Landsat 8 OLI 09/07/2015

Σχήμα 3-9: Εικόνα Landsat 8 OLI – 09/07/2015 – Υμηττός Αττικής

Νεάπολη Λακωνίας: Εικόνα Landsat 8 OLI – 09/07/2015



Σχήμα 3-10: Εικόνα Landsat 8 OLI – 09/07/2015 – Νεάπολη Λακωνίας

3.2.2 Εισαγωγή δορυφορικών εικόνων στο πρόγραμμα eCognition

Παρακάτω θα εφαρμοστεί, ενδεικτικά, η αντικειμενοστρεφής ανάλυση της εικόνας Landsat για την περιοχή της Νεάπολης Λακωνίας. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για τις υπόλοιπες τρεις περιοχές. Στο Σχήμα 3-11, απεικονίζεται η εισαγωγή των κατάλληλων καναλιών (Bands) για τη δημιουργία του έγχρωμου σύνθετου και επιλογή της περιοχής ενδιαφέροντος. Στο Σχήμα 3-12, εμφανίζεται η εικόνα της περιοχής μελέτης που έχουμε επιλέξει. Βάση των επιλογών στα δορυφορικά κανάλια της εικόνας οι τιμές 4-5-3 αντιστοιχούν στα εξής κανάλια: Εγγύς υπέρυθρο (Near infrared -NIR) – Μέσο υπέρυθρο (Short wave infrared –SWIR1) – Ερυθρό (Red), αντίστοιχα. Στο Σχήμα 3-13, εφαρμόζουμε τον παραπάνω συνδυασμό καναλιών γιατί μας δίνει μια πιο πλούσια απεικόνιση από άποψη καλύψεων γης.

Ένα κυρίαρχο ζήτημα της ψηφιακής τηλεπισκόπησης ήταν για πολλά χρόνια η δημιουργία ενός προγράμματος το οποίο προσφέρει την δυνατότητα «μίμησης» της ανθρώπινης σκέψης. Ο κοντινότερος προς την ανθρώπινη σκέψη τρόπος για να επιτευχθεί η ανάλυση μιας εικόνας και στη συνέχεια η ταξινόμηση της, δεν είναι η ανάλυση η οποία έχει ως στοιχειώδη μονάδα τα εικονοστοιχεία, αλλά μια νέα μέθοδος, αυτή της αντικειμενοστρεφούς ανάλυσης (Object Oriented Image Analysis – OBIA). Ο ανθρώπινος εγκέφαλος μπορεί εύκολα να κατηγοριοποιήσει μια εικόνα σε περιοχές ενδιαφέροντος. Οι άνθρωποι με την βοήθεια της όρασης τους, για να παρατηρήσουν μια εικόνα κινούν μια σειρά από νοητικές διεργασίες. Οι διεργασίες αυτές προσφέρουν στον παρατηρητή την ικανότητα να νοήσει μια εικόνα, να την επεξεργαστεί και τελικά να την ερμηνεύσει. Μέσα από την παρατήρηση της, ο ανθρώπινος εγκέφαλος την κατηγοριοποιεί σε ποικίλες περιοχές. Πιο συγκεκριμένα, τμήματα των περιοχών αυτών καταγράφονται ανάλογα με το σχήμα, το χρώμα, το μέγεθος. Η αντικειμενοστρεφής ανάλυση εικόνας, αποτελεί μια μεθοδολογία η οποία εισήγαγε την διαδικασία της κατάτμησης της εικόνας σε αντικείμενα, μια διαδικασία η οποία αποτελούσε σκέψη πολλές δεκαετίες πριν (Αργιαλάς, 1999).

Create Project	8 22	Subset Selection
Project Image Layers Thematic Layers Metadata		
Project Name LC81830352015190LGN00_B2		
Map main	C Subset	
Coordinate System WGS 84 / UTM zone 34N Transverse_Mercator WI Resolution (Meters) 30 Pixel Size 30 Project Size 7631x7771 pixels Geocoding (Lower Left) (533385 / 3872985) Geocoding (Upper Right) (768315 / 4106115)	Selection Clear Subset Resolution (m/pxl) 30 V Use geocoding Pixel size (unit) auto	
Ima File Location Layer 1 D:\Web GIS\Data Landsat\Landsat L8:2015\09:07-2015 III\LC818303 Layer 2 D:\Web GIS\Data Landsat\Landsat L8:2015\09:07-2015 III\LC818303 Layer 3 D:\Web GIS\Data Landsat\Landsat L8:2015\09:07-2015 III\LC818303 Layer 4 D:\Web GIS\Data Landsat\Landsat L8:2015\09:07-2015 III\LC818303 Layer 5 D:\Web GIS\Data Landsat\Landsat L8:2015\09:07-2015 III\LC818303 Layer 6 D:\Web GIS\Data Landsat\Landsat L8:2015\09:07-2015 III\LC818303	A Insert A Remove Edk No Data 22 V Enforce fitting	
		Layer 1
Thematic Layer Alias F., A., W. I	I Insert	
	Remove	Subset
	Edit	Minimum X 4850 Maximum X 5121
Metadata Name F 1		Minimum Y 5291 Maximum Y 5681
	Bemove	Resolution Scene size Active image layer
	Edit	30 271 390 Layer 1 💌
Ok	Preview	Use geocoding for subset Store subset in own file(s) OK Cancel

Σχήμα 3-11: Εισαγωγή των κατάλληλων επιπέδων για τη δημιουργία του έγχρωμου σύνθετου

και επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος.



Σχήμα 3-12: Εικόνα της περιοχής μελέτης – Νεάπολη Λακωνίας



Σχήμα 3-13: Απεικόνιση με το συνδυασμό: Εγγύς υπέρυθρο – Μέσο υπέρυθρο - Ερυθρό

Στην αρχική εικόνα εφαρμόστηκαν διαδικασίες κατάτμησης, με τις οποίες η εικόνα μετατρέπεται σε ένα σύνολο πρωτογενών αντικειμένων (Αργιαλάς et al, 2007). Η κατάτμηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία μια δορυφορική εικόνα διαμερισματοποιείται σε περιοχές, ενώ παράλληλα αποτελεί το πρώτο στάδιο της αντικειμεμοστρεφούς ανάλυσης των εικόνων. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δημιουργεί μικρές ομοιογενείς ομάδες εικονοστοιχείων ξεκινώντας από μεμονωμένα εικονοστοιχεία της εικόνας που στην συνέχεια ενώνονται σχηματίζοντας μεγαλύτερες ομοιογενείς περιοχές (Μιχελάκης, 2008). Οι διαδικασίες κατάτμησης είναι διαδικασίες χαμηλού ή μέσου επιπέδου που δεν χρησιμοποιούν γνώση (Αργιαλάς et al, 2007). Στο λογισμικό eCognition στη διαδικασία της κατάτμησης ο εκάστοτε χρήστης έχει την δυνατότητα να αλλάξει αρκετές παραμέτρους ώστε να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα κατάτμησης (Πουλάκη, 2016). Στην περιοχή μελέτης για τη Νεάπολη Λακωνίας, η κατάτμηση της εικόνας έχει ως εξής: Scale parameter: 75, Shape: 0.1 και Compactness: 0.1, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 3-14.

All competition light end if in the source of the source o	5 (hype:0.1] compd: 0.1] compd: 1.01 (compd: 0.1] compd: 1.01 (co	(dage 0.1 compet: 0.1) creating Level 1* ontim mittered discover/Model ge 0bject Donain el vold el vold rametter Valué Descritorianis pe 0bject Donain el vold el vold rametter Valué Descritorianis pe 0bject Donain el vold el vold rametter Valué Descritorianis pe 0 from Paert Compactine of homogenetity criterion Shope 0.1 Compactines 0.1 converties 0.1
Paramèter Value Overwite existing level Ves Loval Name toral Name Value Yalue Yalue Yalue Yalue Yalue Yalue Yalue Sode paramèter Sode paramèter	goolfm Parameter Value mape Object Domain Interest-addition segment value Yes mape Object Domain Interest-addition segment value New I segment value interest-addition Settings Interest-addition settings fage From Parent The Description of homogeneity certainon fage Societer Octope the something changes only 0.1	bit Condition Parameter Value 0 Cepted Condaria Usered Solitings bit Condition Image Layer registric conspanding changes only Image Layer registric
brandshard in the set of th	DetextSubscrupture/SNDC Operate entry level Status Status Status Compactness I Department of thomage interview Status Status Compactness I Status Status	Denset booms drog level Yes go Dject Onnain Level Sattings el evel Level Sattings nameter Value se From Parent se From Parent se From Parent se Composition of homogeneity criterion Scale parenter 75 Composition of homogeneity criterion Stape 0.1 Composition of homogeneity criterion Spape 0.1 composition contering charge only met or cycle: 1
tr Value r	hage Diport Domain Love Name Love Na	ge Object Domain el evel :
r Vale r Vale sondton - tet	ide lovel Tarameter Value tege From Parent From Paren	value • pi From Paret reachdo condition - pi From Paret reachdo condition - pi From Paret composition of homogeneity criterion - Sp & Cycles 0.1 Composition of homogeneity criterion - Sp & Cycles 0.1 Composition of homogeneity criterion - Sp & Cycles 0.1 Composition of homogeneity criterion - Sp & Cycles 0.1 Composition of homogeneity criterion - Sp & Cycles 0.1 Composition of homogeneity criterion - Sp & Cycles - Hord cycles 1 To be composition of homogeneity criterion - Stape 0.1 Composition of homogeneity criterion -
er Value Inspellage wegsta 1, 1, 1, 1, 1, 1 From Parent Scale parameter 75 Scale parameter 75 Composition of homogeneity criterion Stope 0.1 Composition of homogeneity criterion Stope 0.1 Composition of homogeneity criterion	Parameter Value IB Image Layer weights 1,1,1,1,1 IB Image Layer weights 1,1,1,1,1,1 IB Image Layer weights 1,1,1,1,1 IB Image Layer weights 1,1,1,1,1,1 IB Image Layer weights 1,1,1,1,1,1,1 IB Image Layer weights 1,1,1,1,1,1 IB Image Layer weights 1,1,1,1,1,1,1 IB Image Layer weights 1,1,1,1,1,1,1,1 IB Image Layer weights 1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,	rameter Value pa From Paret reaching condition - Composition of homogenetity criterion Stope arounder 0.1 Composition of homogenetity criterion Stope 0.1 Composition of homogenetity criterion Stope 0.1 Composition of homogenetity criterion Stope 0.1 Composition of homogenetity criterion
er Valo (a) Iteliato Laporato lago (b) Iteliato Laporato lago (b) Iteliato Laporato lago (b) Iteliato Laporato (b) Iteliato (b) It	All all active value of the second of the se	har infection page 5 and 2 an
sondbin - Compation of homogeneity criterion Snope 0.1 Compactness 0.1	In the set of the set	approximation
State 0.1 Compactness 0.1	Nos & Cycles B Loop while something changes only	so & Cucles and a second and a
let	xop & Dyales : 1 Loop while something changes only	ps & Cycles Loop while something changes only more d cycles 1
	Npp & Cycles - Loop while something changes only	es 16 Doles Loop while scoreching charges only meet or opes 1
er	spos & Dyckes - Loop while something changes only	ps & Cycles Loop while something changes only more of cycles 1 •
	xps & Cycles . 3 Loop while something changes only	ps & Cycles Loop while somehing changes only ment of cycles
	xpps & Queles	ps & Cycles Loop while something changes only mber of cycles 1 •
	Dops & Lyceles The something changes only	loge kUpder Loge while something changes only meter dayles 1 •
	// Loop while something changes only	Loop while something changes only mber of cycles 1
ile something changes only		mber of cycles 1
	umber of cycles 1	
ile something changes only		mber of cycles 1

Σχήμα 3-14: Κατάτμηση εικόνας με Scale parameter: 75, Shape: 0.1 και Compactness: 0.1

Επίπεδο 1: Δημιουργία χάρτη καλύψεων γης

Για τη δημιουργία του χάρτη καλύψεων γης πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση Nearest Neighbour. Μέσω φωτοερμηνείας της περιοχής μελέτης ορίζοντας συγκεκριμένες περιοχές εκπαίδευσης ανά Μοντέλο Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.), όπως αυτά έχουν οριστεί στον Πίνακα 3-1. Είναι σαφές ότι εφόσον οι εικόνες που ταξινομήθηκαν είναι παλαιών εποχών και δεν υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα πεδίου, ο καθορισμός των Μ.Κ.Υ. με φωτοερμηνεία ήταν μονόδρομος. Ο αλγορίθμος της ταξινόμησης θα αναζητήσει τα εικονοστοιχεία εκείνα που παρουσιάζουν κοινά χαρακτηριστικά με εκείνα όπου επιλέχθηκαν σαν δείγματα εκπαίδευσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί τον καθορισμό αντιπροσωπευτικών δειγμάτων για κάθε κατηγορία από τον χειριστή τα οποία καταγράφονται από το λογισμικό και παρουσιάζονται υπό μορφή μέσης τιμής για το σύνολο των layers στο ιστόγραμμα των δειγμάτων. Αυτό επιτρέπει αφενός την περιγραφή του φασματικού εύρους κάθε κατηγορίας σύμφωνα με τα δείγματα, αφετέρου σε μακροσκοπικό επίπεδο να αντιληφθεί ο χρήστης την ποιότητα των επιλεγμένων δειγμάτων και κατά πόσο αυτά συγχέονται μεταξύ τους (Πουλάκη, 2016). Στο Σχήμα 3-15, απεικονίζονται οι ορισθείσες περιοχές εκπαίδευσης, καθώς και η χρωματική αντιστοίχηση μεταξύ περιοχών εκπαίδευσης και Μ.Κ.Υ.



Σχήμα 3-15: Επιλογή περιοχών εκπαίδευσης

Στο Σχήμα 3-16, απεικονίζεται το αποτέλεσμα της ταξινόμησης της περιοχής μελέτης μας στη Νεάπολη Λακωνίας, καθώς και η χρωματική αντιστοίχηση μεταξύ περιοχών εκπαίδευσης και Μ.Κ.Υ. Το αποτέλεσμα αυτό αποτελεί το χάρτη καύσιμης ύλης για την περιοχή μελέτης μας.



Σχήμα 3-16: Ταξινόμηση περιοχής μελέτης

Ακολουθεί μια διαδικασία αξιολόγησης της ακρίβειας της ταξινόμησης. Για την αξιολόγηση της ταξινόμησης και το κατά πόσο είναι ακριβής, γίνεται από τον χρήστη και από το πρόγραμμα eCognition. Υπάρχουν κάποιοι μέθοδοι αξιολόγησης που προσφέρει το eCognition. Εμείς επιλέγουμε τη μέθοδο Error Matrix based on Samples. Αυτός ο έλεγχος γίνεται μέσω διαφορετικών δειγμάτων των οποίων επιλέγονται με σκοπό να επιβεβαιώσουν τα πρώτα δείγματα που είχαν επιλεγεί κατά τον αρχικό ορισμό των περιοχών εκπαίδευσης. Εφόσον επιλεχθούν τα δείγματα για κάθε μια κατηγορία στην συνέχεια επιλέγουμε την αξιολόγηση Error Matrix based on Samples. Στο Σχήμα 3-17, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της ταξινόμησης. Το ποσοστό επιτυχίας της εν λόγω ταξινόμησης είναι 74%.

Confusion Matrix NB1 - (Alkianéporty enquéveu) 13 2 1 0 0 1 0 GR4 - (Aportrißloßch) 2 0 0 0 1 0	Disel Class / Dallible	ΝΒ1 - (Αδιαπέρατη επιφάνεια)	GR4 · (Χορτολίβαδα)	SH2 · (Χαμηλοί θάμνοι)	SH7 - (Υψηλοί θάμνοι)	TU4 · (Αραιά κωνοφόρα)	ΤU5 - (Πυκνά κωνοφόρα)	TL2 · (Πλατύφυλλα)	ΝΒ8 · (Υδάτινη επιφάνεια) Sur						
NB1 - (Abianéparty enquévea) 1 2 1 0 0 1 0 GR4 - (XaproR)Baba) 2 0 0 1 0 0 0 SH2 - (XaproR)Baba) 2 0 0 1 0 0 0 0 SH2 - (Yauphol Bájuva) 0 1 1 1 0 0 0 0 SH7 - (Yauphol Bájuva) 1 0 0 0 0 0 0 0 0 SH7 - (Yauphol Bájuva) 1 0 <	onfusion Matrix															
GR4 - (Xoprohi[pa6a] 2 0 0 1 0 0 0 SH2 - (Xourphol 6duvol) 0 1 1 0 0 0 0 SH7 - (Yuuphol 6duvol) 1 0 <td>B1 · (Αδιαπέρατη επιφάνεια)</td> <td>13</td> <td>2</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>17</td>	B1 · (Αδιαπέρατη επιφάνεια)	13	2	1	0	0	0	1	0	17						
SH2 - (Aqun)fol Báµvol) 0 1 1 0 0 0 0 SH7 - (Yun)fol Báµvol) 1 0 <td>R4 · (Χορτολίβαδα)</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>3</td>	R4 · (Χορτολίβαδα)	2	0	0	0	1	0	0	0	3						
SH7 - (Yum)ol 6qiuvol 1 0 0 2 0 0 0 TU4 - (Apacia Nuvoqoʻqo) 0 0 0 1 2 0 0 0 TU5 - (Muxiq Nuvoqoʻqo) 0 0 0 0 0 0 0 0 TU5 - (Inkraiq Nuvoqoʻqo) 0	Η2 · (Χαμηλοί θάμνοι)	0	1	1	1	0	0	0	0	3						
TU4 - (Apariá navopajon) 0 0 0 1 2 0 0 0 TU5 - (Thavá navopajon) 0 0 0 0 0 0 0 0 0 TL2 - (Thavá navopajon) 0 <th< td=""><td>Η7 · (Υψηλοί θάμνοι)</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>3</td></th<>	Η7 · (Υψηλοί θάμνοι)	1	0	0	2	0	0	0	0	3						
TU5 - (Покуа́ жикорафор) 0 0 0 0 3 2 0 TL2 - (Покуа́ жикорафор) 0	U4 · (Αραιά κωνοφόρα)	0	0	0	1	2	0	0	0	3						
TL2 - (Πλατόφοιλλα) 0 0 0 0 0 4 0 NB8 - (Yδάτνη επφάνεια) 0 0 0 0 0 13 NB8 - (Yδάτνη επφάνεια) 0 0 0 0 0 13 unclassified 0 0 0 0 0 0 0 0 Sum 16 3 2 4 3 3 7 13 Accuracy v v v v v v v v v v v v v v v v v v v v v	U5 · (Πυκνά κωνοφόρα)	0	0	0	0	0	3	2	0	5						
NB8 - (Ybártvyn smydvova) 0 0 0 0 0 13 unclassified 0 0 0 0 0 0 0 0 Sum 16 3 2 4 3 3 7 13 Accuracy Froducer Sim Sim Sim Accuracy Sim Accuracy Sim Sim <th colspan="6" sim<"6"sim<"6"sim<="" sim<"6"sim<"6"sim<"6"sim<"6"sim<"6"sim<="" sim<"6"sim<<="" td=""><td>L2 - (Πλατύφυλλα)</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>0</td><td>4</td></th>	<td>L2 - (Πλατύφυλλα)</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>4</td> <td>0</td> <td>4</td>						L2 - (Πλατύφυλλα)	0	0	0	0	0	0	4	0	4
unclassified 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	B8 · (Υδάτινη επιφάνεια)	0	0	0	0	0	0	0	13	13						
Sum 16 3 2 4 3 3 7 13 Accuracy	nclassified	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
Accuracy Accuracy Noducer 0.8125000 0 0.5 0.5666667 1 0.5714286 1 Yoducer 0.7647059 0 0.3333333 0.6666667 0.6666667 0.6 1 1 Helden 0.7578788 0 0.4 0.5714286 0.6666667 0.75 0.7272727 1 Short 0.65 0 0.25 0.4 0.5 0.6 0.5714286 1 SJA Per Class 0.7187500 -0.0625 0.4687500 0.6458333 1 0.535 1	um	16	3	2	4	3	3	7	13							
Producer 0.8125000 0 0.5 0.5 0.6666667 1 0.5714286 1 User 0.7647059 0 0.333333 0.6666667 0.6 1 1 Heliden 0.7878788 0 0.4 0.5714286 0.6666667 0.75 0.7272727 1 Short 0.65 0 0.25 0.4 0.5 0.6 0.5714286 1 KIA Per Class 0.7187500 -0.0625 0.4687500 0.6458333 1 0.535 1	ccuracy															
User 0.7647059 0 0.333333 0.6666667 0.6 1 1 Helden 0.7878788 0 0.4 0.5714286 0.6666667 0.75 0.7272727 1 Short 0.65 0 0.25 0.4 0.5 0.6 0.5714286 1 KIA Per Class 0.7187500 -0.0625 0.4687500 0.6458333 1 0.535 1	roducer	0.8125000	0	0.5	0.5	0.6666667	1	0.5714286	1							
Helden 0.7878788 0 0.4 0.5714286 0.6666667 0.75 0.7272727 1 Short 0.65 0 0.25 0.4 0.5 0.6 0.5714286 1 KIA Per Class 0.7187500 -0.0625 0.4687500 0.6458333 1 0.535 1	ser	0.7647059	0	0.3333333	0.6666667	0.66666667	0.6	1	1							
Short 0.65 0 0.25 0.4 0.5 0.6 0.5714286 1 KIA Per Class 0.7187500 -0.0625 0.4687500 0.4687500 0.6458333 1 0.535 1	ellden	0.7878788	0	0.4	0.5714286	0.6666667	0.75	0.7272727	1							
KIA Per Class 0.7187500 -0.0625 0.4687500 0.4687500 0.6458333 1 0.535 1	hort	0.65	0	0.25	0.4	0.5	0.6	0.5714286	1							
	A Per Class	0.7187500	-0.0625	0.4687500	0.4687500	0.6458333	1	0.535	а <u>,</u>							
Totals	otals															
Dverall Accuracy 0.745	verall Accuracy	0.745														
KIA 0.6814032	IA	0.6814032														

Σχήμα 3-17: Αξιολόγηση ταξινόμησης με τη διαδικασία Error Matrix based on Samples

Επίπεδο 2: Δημιουργία χαρτών βαθμού συγκόμωσης για την επιμέρους δενδρώδη καύσιμη ύλη με χρήση του δείκτη NDVI

Βασικό στοιχείο για την προσομοίωση της πυρκαγιάς, μετά τον χάρτη καύσιμης ύλης, είναι ο βαθμός συγκόμωσης των δέντρων. Για να δημιουργήσουμε τον χάρτη βαθμού συγκόμωσης θα πρέπει αρχικά να δημιουργήσουμε τρεις διαφορετικούς χάρτες βαθμού συγκόμωσης για κάθε μια από τις τρεις κατηγορίες των δέντρων (πλατύφυλλα, αραιά κωνοφόρα, πυκνά κωνοφόρα). Για τον σκοπό αυτό θα δημιουργήσουμε ένα δεύτερο επίπεδο (Level 2) ταξινόμησης στο περιβάλλον του eCognition όπου θα εφαρμόσουμε την μέθοδο ασαφούς λογικής. Το δεύτερο επίπεδο δημιουργήθηκε με σκοπό, την παραγωγή ενός χάρτη βαθμού συγκόμωσης των δέντρων για κάθε μια από τις τρείς κατηγορίες. Έγινε λοιπόν η παραδοχή πως ο βαθμός συγκόμωσης των δέντρων ανάλογα με τον τύπο τους (κωνοφόρα, πλατύφυλλα κλπ) έχει γραμμική σχέση με τον δείκτη βλάστησης NDVI, σε εκείνο το εύρος του δείκτη το οποίο είναι αντιπροσωπευτικό για τον εκάστοτε τύπο.

Η βλάστηση έχει μια μοναδική φασματική υπογραφή η οποία καθιστά ικανό τον άμεσο διαχωρισμό της από άλλους τύπους εδαφικής κάλυψης σε μια εικόνα στο ορατό ή στο εγγύς υπέρυθρο. Οι φωτοχρωστικές ουσίες του φυλλώματος των φυτών (κυρίως η χλωροφύλλη) απορροφούν κυρίως στο ορατό φάσμα για τη φωτοσύνθεση. Η υγιής πράσινη βλάστηση απορροφά ισχυρά στο ορατό φάσμα και ιδιαίτερα στην ερυθρή ακτινοβολία (0.63-0.69μm), ενώ ταυτόχρονα ανακλά ισχυρά στο εγγύς υπέρυθρο μέρος του φάσματος (0.76-0.90μm). Κατά συνέπεια, στο ερυθρό η φασματική υπογραφή της βλάστησης παρουσιάζει ελάχιστο, ενώ στο εγγύς υπέρυθρο παρουσιάζει τοπικό μέγιστο.

Η αντίθεση μεταξύ της ανάκλασης στο ερυθρό και στο εγγύς υπέρυθρο είναι μια ευαίσθητη μέτρηση της ποσότητας της βλάστησης. Έτσι, τα τηλεπισκοπικά δεδομένα από το ερυθρό (RED) και το εγγύς υπέρυθρο (NIR) μπορούν να συνδυαστούν και να αποτελέσουν τους λεγόμενους δείκτες βλάστησης – vegetation indices. Οι δείκτες βλάστησης είναι πολύ καλοί φασματικοί μετασχηματισμοί δύο ή περισσότερων καναλιών μιας δορυφορικής εικόνας, συνήθως του ερυθρού και του εγγύς υπέρυθρου κι έχουν σχεδιαστεί για να βελτιώνουν το σήμα της βλάστησης ώστε να επιτρέπουν αξιόπιστες χωρικές και χρονικές συγκρίσεις της επίγειας φωτοσυνθετικής δραστηριότητας και των δομικών μεταβολών της κόμης.

Ο περισσότερο χρησιμοποιημένος δείκτης βλάστησης είναι ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) (Rouse et al, 1974) που ορίζεται ως εξής:

> NDVI= (NIR – RED) / (NIR + RED) όπου, NIR: η ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο και RED: η ανακλαστικότητα στο ερυθρό κανάλι.

Δεδομένου ότι κάθε είδος βλάστησης, εξαιτίας του συγκεκριμένου φυλλώματος και δομής, παρουσιάζει συγκεκριμένο εύρος τιμών του δείκτη του βλάστησης, έγινε η παραδοχή πως ο βαθμός συγκόμωσης έχει γραμμική σχέση με τον δείκτη βλάστησης NDVI, σε διαφορετικό ωστόσο εύρος τιμών του δείκτη για κάθε τύπο βλάστησης. Έτσι ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία.

Δημιουργήθηκε ένα δεύτερο επίπεδο ακριβώς το ίδιο segmatation (κατάτμηση) με το πρώτο επίπεδο για να βγουν τα ίδια ακριβώς αντικείμενα. Στο επίπεδο αυτό δημιουργήθηκαν τρείς διαφορετικοί χάρτες βαθμού συγκόμωσης για τις κατηγορίες: Πλατύφυλλα, Αραιά κωνοφόρα και Πυκνά κωνοφόρα. Για την δημιουργία των τριών χαρτών, όπου θα δείχνουν το βαθμού συγκόμωσης για κάθε μια κατηγορία, αρχικά εντοπίστηκε η ελάχιστη και μέγιστη τιμή του NDVI. Στην συνέχεια, δημιουργήθηκαν 6 μεταβλητές που αφορούν το σύνολο της σκηνής με βάση την ελάχιστη και μέγιστη τιμή της κάθε κατηγορίας. Αυτές οι μεταβλητές δημιουργήθηκαν για το ελάχιστο (Min) και μέγιστο (Max) των κατηγοριών που ανήκουν στη δενδρώδη καύσιμη ύλη. Στην περίπτωσή μας, για τα Πλατύφυλλα, Αραιά κωνοφόρα και Πυκνά κωνοφόρα, όπως παρακάτω:

- Min_NDVI_platyfylla (Ελάχιστη τιμή NDVI για τα Πλατύφυλλα)
- Max_NDVI_platyfylla (Μέγιστη τιμή NDVI για τα Πλατύφυλλα)
- Min_NDVI_araia_konofora (Ελάχιστη τιμή NDVI για τα Αραιά κωνοφόρα)
- Max_NDVI_araia_konofora (Μέγιστη τιμή NDVI για τα Αραιά κωνοφόρα)
- Min_NDVI_pykna_konofora (Ελάχιστη τιμή NDVI για τα Πυκνά κωνοφόρα)
- Max_NDVI_pykna_konofora (Μέγιστη τιμή NDVI για τα Πυκνά κωνοφόρα)

Στο Σχήμα 3-18, απεικονίζεται η δημιουργία της μεταβλητής **Min_NDVI_platyfylla**. Αρχικά επιλέχθηκε η κλάση που αναφέρεται στα Πλατύφυλλα (TL2- Πλατύφυλλα), από το Επίπεδο 1 (Level 1). Έπειτα ονομάστηκε η μεταβλητή: Min_NDVI_platyfylla και επιλέχθηκε στο Operation η επιλογή "minimum". Αντίστοιχα επιλέχθηκε η επιλογή "maximum", όταν επρόκειτο για τις μεταβλητές με μέγιστη τιμή. Τέλος, από την επιλογή Feature, επιλέχθηκε ο δείκτης NDVI. Με αυτή τη διαδικασία επιλέχθηκε η ελάχιστη τιμή του δείκτη NDVI για την κατηγορία των Πλατυφύλλων και τοποθετήθηκε σε μια μεταβλητή που ονομάστηκε "Min_NDVI_platyfylla". Με τον ίδιο τρόπο δημιουργήθηκαν και οι ελάχιστες (Min) και μέγιστες (Max) μεταβλητές για όλες τις παραπάνω κατηγορίες.

Name				
V Automatic	and the second se	Algorithm Description		
V Automatic		Perform a statistical operation domain and store the result	n on the feature distribution within an image object in a process variable.	
TL2 · (Πλατύφυλλα) at Level 1	1: Min_NDVI_platyfylla = min	Algorithm parameters		E- ■ classes
Algorithm		Parameter	Value	
compute statistical value		Variable	Min NDVI platyfylla	Η Ο Η Ο Η Ο Η Ο Η Ο Η Ο Η Ο Η Ο Η Ο Η Ο
		Operation	minimum	ΝΒΙ - (Αδιαπερατή επιφανεία)
Image Object Domain		Parameter	1	SH2 - Mao - (Tou (Vr) shipuvsiu)
image object level		Feature	NDVI	SH2 - (Yupino ourvoi)
ininge objectioner		Unit	No Unit	
Parameter	Value			
Level	Level 1			ΤΟΣ (Πυκνά κωνοφόρα)
Class filter	TL2 - (Πλατύφυλλα)			🖶 🗐 🛑 Level 2 - ΤL2 - (Πλατύφυλλα)
Threshold condition -				
Map	From Parent			
Region	From Parent			
Max. number of image obj a	all			
				Ε - Ε - Ε - Ε - Ε - Ε - Ε - Ε - Ε - Ε -
				Αραιά κωνοφορά - ραθμός συγκομωσης 0-25%
Loops & Cycles		1 i		Αραιά κωνοφόρα - βαθμός συγκόμωσης 20-50%
V Loop while something chan	aes only			Αραιά κωνοφορά Τράσμος συγκόμωσης 35/100%
Number of cycles 1)) •			The Annual States and Annual Constraints
				Aiwdys use all classes Use Alfay.
		Fxe	cute Ok Cancel Help	Deselect All OK Cancel

Σχήμα 3-18: Δημιουργία μεταβλητής Min_NDVI_platyfylla

Η εξίσωση του NDVI γενικά, δίνει τιμές που κυμαίνονται από «-1 έως +1». Ενδεικτικές αρνητικές τιμές είναι τα σύννεφα, το χιόνι, το νερό και άλλες περιοχές δίχως βλάστηση, ενώ οι θετικές τιμές υποδηλώνουν βλάστηση ή ανακλαστικές επιφάνειες. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή NDVI, τόσο πιο πράσινο ή φωτοσυνθετικά ενεργά είναι η φυτική κάλυψη (Πουλάκη, 2016).

Στο Σχήμα 3-19, απεικονίζεται ο τρόπος δημιουργίας κανονικοποιημένων δεικτών NDVI για κάθε τύπο δέντρων, μέσω της σχέσης (π.χ. σε ότι αφορά τα αραιά κωνοφόρα):

> 100*([NDVI]-[Min_NDVI_araia_konofora])/([Max_NDVI_araia_konofora]-[Min_NDVI_araia_konofora])



Σχήμα 3-19: Τρόπος δημιουργίας κανονικοποιημένων δεικτών NDVI σε διάστημα 0-100

Αρχικά γίνεται ο διαχωρισμός στους διαφορετικούς τύπους βλάστησης οι οποίες ορίζονται ως μητρικές κατηγορίες. Οι μητρικές αυτές κατηγορίες προκύπτουν από την ταξινόμηση των Μ.Κ.Υ. του 1ου επιπέδου. Για κάθε μια «μητρική» κατηγορία εφαρμόζεται ο κανόνας που περιορίζει την ταξινόμηση σε συγκεκριμένη κατηγορία βλάστησης. Ο λόγος που εφαρμόζεται στην μητρική κατηγορία είναι έτσι ώστε να την κληρονομήσουνε και οι υποκατηγορίες. Εφαρμόζεται λοιπόν ο κανόνας που λέει πως, όπου τα υποαντικείμενα συγκεκριμένου τύπου βλάστησης παρουσιάζουν κάλυψη μεγαλύτερη από 60%, η συγκεκριμένη κατηγορία βλάστησης θα επιλέγεται. Στην ουσία προστίθεται ο περιορισμός του ποσοστού κάλυψης να είναι μεγαλύτερος από 60% για να επιλεχθεί, έτσι ώστε να αποκλειστούν οι άλλες κατηγορίες. Αυτή η διαδικασία εφαρμογής κανόνα μητρικής κατηγορίας απεικονίζεται στο Σχήμα 3-20.



Σχήμα 3-20: Εφαρμογής κανόνα μητρικής κατηγορίας (0,5-0,7)

Στον χάρτη βαθμού συγκόμωσης για να δημιουργηθεί κλιμάκωση της πυκνότητας σε 4 κατηγορίες εφαρμόστηκε ο παρακάτω κανόνας. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-21 για τον συγκεκριμένο κανόνα επιλέγουμε την αυστηρή εφαρμογή του με τιμές από 0 έως 25, επαναλαμβάνουμε την διαδικασία και για τα διαστήματα 25-50, 50-75, 75-100.

Στα Σχήματα 3-22, 3-23 και 3-24, απεικονίζονται οι επιμέρους χρωματικές βαθμονομήσεις των βαθμών συγκόμωσης σε πλατύφυλλα, αραιά κωνοφόρα και πυκνά κωνοφόρα.



Σχήμα 3-21: Εφαρμογή κανόνα διαστημάτων βαθμού συγκόμωσης



Σχήμα 3-22: Βαθμός συγκόμωσης – Πλατύφυλλα



Σχήμα 3-23: Βαθμός συγκόμωσης – Αραιά κωνοφόρα



Σχήμα 3-24: Βαθμός συγκόμωσης – Πυκνά κωνοφόρα

Επίπεδο 3: Δημιουργία χάρτη βαθμού συγκόμωσης συνολικά για τη δενδρώδη καύσιμη ύλη

Σκοπός της ταξινόμησης 3ου επιπέδου είναι να ενοποιήσει τους τρεις χάρτες βαθμού συγκόμωσης σε έναν. Ο τελικός χάρτης μετά την ενοποίηση των τριών κατηγοριών θα παρουσιάζει το τελικό βαθμό συγκόμωσης για την περιοχή μελέτης ανεξαρτήτως τύπου βλάστησης. Ο τελικός χάρτης περιλαμβάνει τα πλατύφυλλα, τα αραιά κωνοφόρα και τα πυκνά κωνοφόρα. Στο Σχήμα 3-25, απεικονίζονται όλα τα επίπεδα ταξινομήσεων.



Σχήμα 3-25: Συνολικά επίπεδα ταξινομήσεων (1°, 2°, 3°)

Στο Σχήμα 3-26, εφαρμόστηκε ο κανόνας που καθορίζει την κατηγορία που επιλέγεται με βάση την επικρατούσα (πάνω από 60%) στα υποαντικείμενα του 2^{ου} επιπέδου κατηγορίας συγκόμωσης ανεξαρτήτως τύπου βλάστησης. Ο τελικός χάρτης που απεικονίζει συνολικά το βαθμό συγκόμωσης της δενδρώδους καύσιμης ύλης (Canopy Cover), απεικονίζεται στο Σχήμα 3-27.

Class Description	
Name Display	Membership Function
Ναπε Οτραγ Βαθμός συγκόμωσης 0-25% Αlways Parent class for display Modifiers Level 3 Shared	Feature: Rel. area of sub objects Αραιά κωνοφόρα - βαθμός
Use parent class color	
All Contained * Inherited	
or (max) A Rel. area of sub objects Αραιά κωνοφόρα - βαθμός συγ Rel. area of sub objects Πλατύφυλλα - βαθμός συγ Rel. area of sub objects Πυκνά κωνοφόρα - βαθμός Inherited	συγ κόμο συγ Maximum value x/y 0.5738955823 / 0.10 1 1 Minimum value 0 0.5 0.7 Left border Right border
	Entire range of values: [01] Display unit: No Unit
	Class: Βαθμός συγκόμωσης 0-25% OK Cancel

Σχήμα 3-26: Εφαρμογή κανόνα κατηγορίας (0,5-0,7)



Σχήμα 3-27: Τελική απεικόνιση συνολικού βαθμού συγκόμωσης της δενδρώδους καύσιμης ύλης

3.2.3 Ψηφιοποίηση καμένων περιοχών στο πρόγραμμα QGIS

Οι εικόνες Landsat που χρησιμοποιήθηκαν για την ψηφιοποίηση των καμένων εκτάσεων ανά ημερομηνία και περιοχή μελέτης είναι οι εξής:

- Κερατέα Αττικής: Εικόνα Landsat 8 OLI 22/07/2014
- Μαλεσίνα Αταλάντης: Εικόνα Landsat 8 OLI 22/07/2014
- Υμηττός Αττικής: Εικόνα Landsat 8 OLI 26/08/2015
- Νεάπολη Λακωνίας: Εικόνα Landsat 8 OLI 26/08/2015

Οι παραπάνω εικόνες Landsat εισήχθησαν στο πρόγραμμα QGIS. Για την κάθε μια εικόνα ορίστηκε ο εξής συνδυασμός καναλιών: Μέσο υπέρυθρο (Short wave infrared – SWIR2) – Εγγύς υπέρυθρο (Near infrared -NIR) – Ερυθρό (Red). Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει την παρατήρηση χαρακτηριστικών ουλών με σκούρο μωβ χρώμα, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις δασικές καμένες εκτάσεις. Έπειτα ψηφιοποιήθηκαν οι ουλές αυτές

και εξήχθησαν τα πολύγωνα των καμένων εκτάσεων ανά περίπτωση σε μορφή shapefile (.shp).

Στα παρακάτω Σχήματα 3-28, 3-29, 3-30 και 3-31, απεικονίζονται οι ουλές των καμένων εκτάσεων ανά περίπτωση.



Σχήμα 3-28: Καμένη έκταση – Κερατέα (SWIR2-NIR-RED)



Σχήμα 3-29: Καμένη έκταση – Μαλεσίνα Αταλάντης (SWIR2-NIR-RED)



Σχήμα 3-30: Καμένη έκταση – Υμηττός (SWIR2-NIR-RED)



Σχήμα 3-31: Καμένη έκταση – Νεάπολη Λακωνίας (SWIR2-NIR-RED)

3.3 Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM)

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Aster GDEM) που χρησιμοποιήθηκε προέρχεται από τα ελεύθερα δεδομένα των Ministry of Economy, Trade, and Industry (METI) της Ιαπωνίας και της NASA και είναι ανάλυσης 30 μέτρων (https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp). Κατά την εισαγωγή του στο πρόγραμμα QGIS, επιλέχθηκε η περιοχή μελέτης (στην περίπτωσή μας η Νεάπολη Λακωνίας), αφαιρέθηκαν οι αρνητικές τιμές και κατόπιν εξήχθησαν τα στοιχεία του υψομέτρου, των κλίσεων γης και του προσανατολισμού των πρανών, όπως απεικονίζονται στα παρακάτω Σχήματα 3-32, 3-33 και 3-34. Έπειτα οι εικόνες αυτές μετατράπηκαν σε μορφή ASCII, ώστε να καταστεί δυνατό να εισαχθούν στο πρόγραμμα Farsite. Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε για όλες τις περιοχές μελέτης.



Σχήμα 3-32: Εικόνα υψομέτρου – Νεάπολη Λακωνίας



Σχήμα 3-33: Εικόνα κλίσεων γης – Νεάπολη Λακωνίας



Σχήμα 3-34: Εικόνα προσαντολισμού πρανών – Νεάπολη Λακωνίας

3.4 Μετεωρολογικά δεδομένα

Τα μετεωρολογικά δεδομένα αποτελούν μια πάρα πολύ σημαντική και κρίσιμη παράμετρο για τη λειτουργία του προγράμματος Farsite. Αντλήθηκαν από τους εγγύτερους, στις περιοχές μελέτης, μετεωρολογικούς σταθμούς του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Τα δεδομένα είχαν βήμα 10λέπτου. Αναλύθηκαν και υπολογίστηκαν ανάλογα με τις ανάγκες των προσομοιώσεων σε 30λεπτα και 3ωρα βήματα. Έπειτα μετατράπηκαν σε μορφή ASCII. Εκτενής αναφορά των μετεωρολογικών δεδομένων καθώς και των επιμέρους μετεωρολογικών σταθμών ανά περίπτωση γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο που περιλαμβάνει τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος Farsite.



3.5 Διάγραμμα ροής επιμέρους βημάτων της εργασίας

Σχήμα 3-35: Διάγραμμα ροής της άντλησης, επεξεργασίας, εισαγωγής και εξαγωγής των δεδομένων από το πρόγραμμα Farsite

4 Κεφάλαιο 4: Αποτελέσματα προσομοιώσεων συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών με χρήση του μοντέλου Farsite

Στο μοντέλο Farsite έγινε η εισαγωγή των τριών γενικών και κύριων τύπων δεδομένων, μετεωρολογικά δεδομένα, καύσιμη ύλη και τοπογραφία, όπως αναλύονται στο τμήμα της μεθοδολογίας. Οι προσομοιώσεις και ο τρόπος εισόδου των δεδομένων αποτελούν μια προσεγγιστική μέθοδο που θα παρουσιαστεί παρακάτω. Ως σύστημα αναφοράς συντεταγμένων έχει οριστεί το Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς – WGS84/UTM34N.

4.1 Προσομοίωση πυρκαγιάς στην περιοχή της Κερατέας Αττικής – 2014

4.1.1 Δεδομένα εισόδου – Κερατέα

Τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο Farsite είναι σε μορφή ASCII (.asc). Τα δεδομένα των χαρακτηριστικών του τοπίου (Landscape file) που επιλέχθηκε για την προσομοίωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-1. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν τον παράλληλο του γεωγραφικού πλάτους που ανήκει η περιοχή μας, ο οποίος είναι ο 37^{°C}, τα χαρακτηριστικά του υψομέτρου (αρχείο Elevation), των κλίσεων γης (αρχείο Slope) και τον προσανατολισμό των πρανών (αρχείο Aspect), τα οποία αντλούνται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής. Επίσης περιλαμβάνεται η ταξινόμηση των καλύψεων γης (αρχείο Fuel Model) και ο βαθμός συγκόμωσης του ανώροφου (αρχείο Canopy Cover) των δέντρων που περιλαμβάνονται στην καύσιμη ύλη.

Στο Σχήμα 4-2, εισάγονται δεδομένα τα οποία περιλαμβάνουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Μοντέλων Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.) που έχουν επιλεχθεί, όπως την αντιστοίχιση των Μ.Κ.Υ. (Scott & Burgan, 2005) με αυτά που περιέχει το πρόγραμμα Farsite (αρχείο Conversions ".CNV"), Πίνακας 4-1 και τη χρονική υστέρηση της καύσιμης ύλης ανάλογα με το μέγεθός της και τη φύση της, ποώδης ή ξυλώδης (αρχείο Moistures ".FMS"), Πίνακας 4-2.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που σχετίζονται κυρίως με τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, τον άνεμο και τα επιμέρους χαρακτηριστικά του, όπως ταχύτητα και

προσανατολισμός, περιλαμβάνονται στα αρχεία Weather ".WTR" και Wind ".WND" και αντλήθηκαν από τον Πίνακα 4-3.

Load File (,LCP)	Clear Files	KERATEA_U	ANDSCAPE.L
Save File (.LCP)	Latitude ?	Units and Options DISTANCE	
Elevation ASCII	Keratea_Elevation.asc		ОК
🗌 Slope ASCII	Keratea_Slopes.asc		
Aspect ASCII	Keratea_Aspects.asc	C 1-25 @ Degrees	
🗌 Fuel Model ASCII	atea_Classification.asc	🗆 Custom 🗖 Convert 🗖 Const	Help
Canopy Cover ASCII	Keratea_Canopy.asc	Cat. 0-4 C Percent □ Const Const	
StandHeight ASCII		Meters*10 💽 🗆 Const	
🗖 Crown Base Height		Meters*10 🗾 🗖 Const	Cancel
🗖 Crown Bulk Density		kg/m3*100 🖵 🗖 Const	
Duff Loading ASCII		ⓒ T/ac C Mg/ha □ Const	
Coarse Woody ASCII		🗖 Const	

Σχήμα 4-1: Εισαγωγή χαρακτηριστικών τοπίου – Κερατέα



Σχήμα 4-2: Επιμέρους εισαγωγή χαρακτηριστικών της προσομοίωσης – Κερατέα

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης (Scott-Burgan)	Περιοχή	Περιγραφή	Farsite (αντιστοίχιση)
NB1	Αδιαπέρατη επιφάνεια	Αστική περιοχή, Καλλιέργειες, Υδάτινη επιφάνεια, Γυμνό έδαφος	91
GR4	Χορτολίβαδα	Χορτολιβαδικές εκτάσεις έως 0,6μ	104
SH2	Χαμηλοί θάμνοι	Χαμηλή σκληρόφυλλη βλάστηση έως 0,5μ	142
SH7	Υψηλοί θάμνοι	Υψηλή σκληρόφυλλη βλάστηση 1 έως 2μ	147
TU1	Ελαιώνες	Ελαιώνες χωρίς υπόροφο έως 3μ	161

Πίνακας 4-1: Μοντέλα καύσιμης ύλης και αντιστοίχησή τους με το Farsite, για την περιοχή της Κερατέας

Πίνακας 4-2: Χρονική υστέρηση Μ.Κ.Υ. – Κερατέα

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 1h (%)	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 10h (%)	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 100h (%)	Υγρασία ζωντανής ποώδους (LH) Καύσιμης Ύλης (%)	Υγρασία ζωντανής ξυλώδους (LW) Καύσιμης Ύλης (%)
91	3	4	8	0	75
104	3	4	8	0	75
142	3	4	8	0	75
147	3	4	8	0	75
161	3	4	8	0	75

Ημερομηνία	Ώρα	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη σχετική υγρασία (%)	Ελάχιστη σχετική υγρασία (%)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Προσανατολισμός ανέμου (μοίρες)
12/7/2014	15:00-18:00	28,3	25,0	79,0	42,0	20,9	180,0
12/7/2014	18:01-21:00	24,8	24,1	87,0	79,0	9,7	180,0
12/7/2014	21:01-00:00	25,7	23,8	86,0	56,0	6,4	157,5
13/7/2014	00:01-03:00	24,8	23,6	67,0	62,0	12,9	270,0
13/7/2014	03:01-06:00	26,5	23,4	68,0	57,0	4,8	270,0
13/7/2014	06:01-09:00	28,9	25,3	69,0	50,0	4,8	247,5
13/7/2014	09:01-12:00	29,4	27,9	54,0	45,0	8,0	67,5
13/7/2014	12:01-15:00	29,8	28,2	55,0	44,0	14,5	135,0
13/7/2014	15:01-18:00	28,1	26,0	65,0	50,0	14,5	157,5
13/7/2014	18:01-21:00	25,9	24,6	66,0	61,0	6,4	202,5
13/7/2014	21:01-00:00	25,8	24,8	62,0	60,0	0,0	202,5
14/7/2014	00:01-03:00	25,8	24,6	68,0	58,0	17,7	270,0
14/7/2014	03:01-06:00	27,1	24,3	69,0	57,0	14,5	270,0
14/7/2014	06:01-09:00	29,2	26,1	65,0	49,0	6,4	270,0
14/7/2014	09:01-12:00	30,4	28,2	59,0	43,0	8,0	90,0
14/7/2014	12:01-15:00	30,7	29,6	46,0	42,0	12,9	135,0
14/7/2014	15:01-18:00	29,4	26,5	62,0	48,0	16,1	157,5
14/7/2014	18:01-21:00	26,9	25,7	63,0	53,0	4,8	180,0
14/7/2014	21:01-00:00	26,5	25,7	63,0	52,0	3,2	292,5

Πίνακας 4-3: Μετεωρολογικά δεδομένα – Κερατέα

Τα ανωτέρω μετεωρολογικά δεδομένα προέκυψαν ύστερα από ανάλυση και προέρχονται από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στο Λαύριο Αττικής (LGD6) (LAT: 37° 42' 40" N, LONG: 24° 03' 21" Ε), ο οποίος είναι ο εγγύτερος σε συνάρτηση με το συμβάν της πυρκαγιάς. Το ύψος των αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας βρίσκεται στα 3μ και το ύψος του ανεμομέτρου στα 5μ. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν τις τρεις κρίσιμες ημέρες του Ιουλίου 2014 κι έχουν αναλυθεί σε τρίωρα αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 4-3, περιλαμβάνεται ο ορισμός της χρονικής περιόδου που θα λειτουργήσει το μοντέλο για να προσομοιώσει την πυρκαγιά που θα του ορίσουμε. Σύμφωνα με στοιχεία του Ενιαίου Συντονιστικού Κέντρου Επιχειρήσεων του Πυροσβεστικού Σώματος, στη μελέτη περίπτωσης της πυρκαγιάς στην Κερατέα Αττικής, η έναρξη της εντοπίζεται περί τις 3μ.μ. στις 12/07/2014 και η καταστολή στις 12 μ.μ. στις 14/07/2014. Επιλέχθηκε χρονικό βήμα ανάλυσης 30 λεπτών και βήμα οπτικοποίησης περιμέτρου ανά μία ώρα. Επίσης η ανάλυση περιμέτρου και η ανάλυση απόστασης εξάπλωσης ορίστηκαν στα 50 μέτρα. Το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς προέκυψε επίσης από τα στοιχεία του Πυροσβεστικού Σώματος στο Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς - WGS84 (LAT: 37° 46' 14" N, LONG: 24° 00' 47" Ε) και ορίστηκε στο μοντέλο μέσω σημείου σε shapefile (.shp).

Month Image: Staturg Crowing Image: Staturg I	Use Ci	onditioning Period	for Fuel Moistures	Fodina	Time Step
OK Help Cancel	Month Day Hour Min	- 7 - 12 - 12 	12 ↓ 12 ↓ 1500 ↓ 0	Churg ∴ 7 ∴ 14 ∴ 1200 ∴ 0	
↓ 50 m Units		OK	Help	Cancel	Distance Resolution
					↓ 50 m Units

Σχήμα 4-3: Χρονική διάρκεια πυρκαγιάς και ρύθμιση παραμέτρων

4.1.2 Δεδομένα εξόδου - Κερατέα

Στο Σχήμα 4-4, απεικονίζεται η χωρική προσομοίωση της πυρκαγιάς στην Κερατέα Αττικής. Η εξάπλωση της πυρκαγιάς εμφανίζεται με τη λευκή αραχνώδη υφή. Επίσης εμφανίζεται ένα σχετικό υπόμνημα για την εικόνα της προσομοίωσης, το οποίο περιλαμβάνει με χαρακτηριστικά χρώματα τα Μ.Κ.Υ. όπως έχουν οριστεί στον Πίνακα 4-1 και την περίμετρο της πραγματικής καμένης έκτασης με μαύρο χρώμα, καθώς και το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς με κίτρινο χρώμα.

Το Σχήμα 4-5 περιλαμβάνει τη τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση της χωρικής εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Στην εικόνα αυτή είναι εμφανείς οι αλλαγές του υψομέτρου και των κλίσεων της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4-4: Χωρική προσομοίωση πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος Farsite στην περιοχή της Κερατέας (από 12/07/2014 - 3μ.μ. έως 14/07/2014 - 12 μ.μ.)



Σχήμα 4-5: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Κερατέα 2014

Το Σχήμα 4-6, περιλαμβάνει το διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min), της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²), καθώς και τιμές μήκους φλόγας από 1m έως 5m. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2-1, αντιστοίχησης των τιμών του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες καταστολής μιας πυρκαγιάς (Byram, 1959) και το Σχήμα 2-2, που περιλαμβάνει το διάγραμμα της μεταβολής της ταχύτητας εξάπλωσης ανάλογα με την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας και τις κατηγορίες ανάλογα με τις ενέργειες καταστολής (Rothermel and Andrews, 1982), γίνεται εμφανές, λόγω των κόκκινων κουκίδων του διαγράμματος, ότι η εν λόγω πυρκαγιά βρίσκεται στην δεύτερη κατηγορία από άποψης επικινδυνότητας και για την καταστολή της θα απαιτηθούν μηχανήματα όπως εκσκαφείς, πυροσβεστικά οχήματα και εναέρια μέσα. Η μέγιστη ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς, Rate of Spread υπολογίζεται σε ROS=0,7km/h.



Σχήμα 4-6: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/ m²) – Κερατέα 2014

Το Σχήμα 4-7, απεικονίζει τη χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας (°F) (μωβ χρώμα) και υγρασίας (%) (μαύρο χρώμα) ανά ώρα, κατά τη χρονική διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Από αυτό το διάγραμμα μπορούμε να αντλήσουμε αρκετά στοιχεία που σχετίζονται με την έναρξη, αλλά και εξέλιξη της πυρκαγιάς. Η θερμοκρασία όσο μεγαλύτερες τιμές παίρνει, τόσο περισσότερο μειώνεται το ποσοστό της σχετικής υγρασίας του αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προπαρασκευή της καύσιμης ύλης και τη μετατροπή της σε εύφλεκτο υλικό, αφού η υγρασιακή αποστέρηση είναι μεγαλύτερη όταν τα ποσοστά της σχετικής υγρασίας του αέρα είναι μικρά. Η καύσιμη ύλη τότε γίνεται θετική είτε για την έναρξη είτε για την εξάπλωση μιας δασικής πυρκαγιάς. Συνήθως οι αρνητικές επιπτώσεις στις δασικές πυρκαγιές σχετικά με το ποσοστό της σχετικής υγρασίας, αυτές εμφανίζονται όταν τα ποσοστά αυτά είναι κάτω του 50% (Ηλιόπουλος, 2013). Από το παρακάτω διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας φαίνεται ότι οι συνθήκες για την έναρξη, διατήρηση και εξάπλωση της πυρκαγιές είναι ιδανικές.



Σχήμα 4-7: Διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας ανά ώρα – Κερατέα 2014

Στο Σχήμα 4-8, απεικονίζεται το διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Οι τιμές Flaming και Smoldering αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τη τέλεια και την ατελή καύση. Στα Σχήματα 4-9, 4-10 και 4-11 απεικονίζονται άλλα τρία διαγράμματα που εμφανίζουν τις εκπομπές (mg) μεθανίου (CH4), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO2). Παρατηρούμε ότι μόνο κατά την απεικόνιση των εκπομπών μονοξειδίου του άνθρακα η ατελής καύση παίρνει μεγαλύτερες τιμές από τη τέλεια καύση. Αυτό είναι απόλυτα λογικό γιατί κατά τη διάρκεια ατελούς καύσης παράγονται κυρίως αέρια μονοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, έχουμε τη δυνατότητα, παρατηρώντας τα παρακάτω διαγράμματα, να αντλήσουμε πληροφορίες και τιμές για τη ρύπανση της ατμόσφαιρας από την προσομοίωση της πυρκαγιάς από τη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης.



Σχήμα 4-8: Διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Κερατέα 2014



Σχήμα 4-9: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μεθανίου (CH4) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Κερατέα 2014


Σχήμα 4-10: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Κερατέα 2014



Σχήμα 4-11: Διάγραμμα εκπομπών (mg) διοξειδίου του άνθρακα (CO2) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Κερατέα 2014

Στο Σχήμα 4-12, απεικονίζεται η δυναμική λειτουργία του προγράμματος Farsite για την Κερατέα, ως περιοχή μελέτης, αφού κατά της εξέλιξη της προσομοίωσης υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης των διαγραμμάτων και την εξέλιξή τους, όπως το διάγραμμα χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς. Επίσης, όπως φαίνεται από το σχήμα υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου του υπολοίπου χρονικά της προσομοίωσης, καθώς και ανεμολόγιο που δείχνει την κατεύθυνση και τη ταχύτητα του ανέμου. Τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης, όπως η χρονική διάρκεια, η χρονική υστέρηση της καύσιμης ύλης και παράμετροι όπως η περίμετρος ανάλυσης ή το βήμα ανάλυσης και πρόβλεψης είναι δυνατό να μεταβληθούν κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης.



Σχήμα 4-12: Δυναμική λειτουργία του προγράμματος Farsite στην Κερατέα Αττικής 2014

4.1.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – Κερατέα

Στον Πίνακα 4-4, απεικονίζεται η εμβαδομέτρηση των περιοχών της πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοιωμένης έκτασης μετρημένη σε εκτάρια και στρέμματα. Η περιοχή της ταύτισης περιλαμβάνει την ένωση των περιοχών της καμένης έκτασης και της προσομοίωσης. Η υπερεκτίμηση περιλαμβάνει την περιοχή που προσομοιώθηκε από το πρόγραμμα Farsite ότι θα καεί, αλλά στην πραγματικότητα δεν κάηκε. Η υποεκτίμηση αντιστοιχεί στην περιοχή που πραγματικά κάηκε, αλλά δεν προβλέφθηκε ότι θα καεί από την προσομοίωση.

Περιοχή	Εκτάρια (ha)	Στρέμματα
Καμένη έκταση	512	5120
Προσομοιωμένη έκταση	697	6970
Ταύτιση	450,5	4505
Υπερεκτίμηση	297	2970
Υποεκτίμηση	61,5	615

Πίνακας 4-4: Εμβαδομέτρηση πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοιωμένης έκτασης

Στον Πίνακα 4-5, εμφανίζονται οι δυνάμεις που συνέβαλαν στην κατάσβεση της δασικής πυρκαγιάς στην Κερατέα. Περιληπτικά έλαβαν μέρος 189 άτομα, 67 οχήματα, 3 χωματουργικά μηχανήματα και 5 εναέρια μέσα (2 ελικόπτερα και 3 αεροσκάφη – Α/Φ).

Πίνακας 4-5: Συνολικές δυνάμεις καταστολής της πυρκαγιάς στην Κερατέα Αττικής

ΠΥΡΟΣ.	ΕΘΕΛΟ-	ΣΤΡΑΤΟΣ	ΑΛΛΕΣ	ΠΥΡΟΣ.	ОХНМ.	ΒΥΤΙΟ-	MHXANH-	ΕΛΙΚΟ-	Α/Φ
ΣΩΜΑ	ΝΤΕΣ		ΔΥΝΑΜΕΙΣ	ΟΧΗΜ.	ОТА	ΦΟΡΑ	MATA	ΠΤΕΡΑ	CL415
100	16	44	29	48	11	8	3	2	3

Στο Σχήμα 4-13, απεικονίζονται χωρικά και γεωγραφικά στην περιοχή μελέτης της Κερατέας οι εμβαδομετρημένες εκτάσεις της πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοίωσης. Στην εν λόγω προσομοίωση υπάρχει ένα μεγάλο ποσοστό ταύτισης της πραγματικής με την προσομοιωμένη καμένη έκταση, της τάξης του 78%. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η πυρκαγιά δεν παρουσίασε κάποια εκρηκτική συμπεριφορά, ήταν πυρκαγιά επιφανείας και οι εξισώσεις του Rothermel, 1972, στις οποίες και στηρίζεται το πρόγραμμα Farsite, ικανοποιούνταν από τις συνθήκες εξάπλωσης της πυρκαγιάς.



Σχήμα 4-13: Αξιολόγηση προσομοίωσης πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος Farsite στην περιοχή της Κερατέας

4.2 Προσομοίωση πυρκαγιάς στην ευρύτερη περιοχή της Αταλάντης– 2014

4.2.1 Δεδομένα εισόδου – Μαλεσίνα Αταλάντης

Τα δεδομένα των χαρακτηριστικών του τοπίου (Landscape file) που επιλέχθηκε για την προσομοίωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-14. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν τον παράλληλο του γεωγραφικού πλάτους που ανήκει η περιοχή μας, ο οποίος είναι ο 38°ς, τα χαρακτηριστικά του υψομέτρου (αρχείο Elevation), των κλίσεων γης (αρχείο Slope) και τον προσανατολισμό των πρανών (αρχείο Aspect), τα οποία αντλούνται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής. Επίσης περιλαμβάνεται η ταξινόμηση των καλύψεων γης (αρχείο Fuel Model) και ο βαθμός συγκόμωσης του ανώροφου (αρχείο Canopy Cover) των δέντρων που περιλαμβάνονται στην καύσιμη ύλη.

Στο Σχήμα 4-15, εισάγονται δεδομένα τα οποία περιλαμβάνουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Μοντέλων Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.) που έχουν επιλεχθεί, όπως την αντιστοίχιση των Μ.Κ.Υ. (Scott & Burgan, 2005) με αυτά που περιέχει το πρόγραμμα Farsite (αρχείο Conversions ".CNV"), Πίνακας 4-6 και τη χρονική υστέρηση της καύσιμης ύλης ανάλογα με το μέγεθός της και τη φύση της, ποώδης ή ξυλώδης (αρχείο Moistures ".FMS"), Πίνακας 4-7.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που σχετίζονται κυρίως με τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, τον άνεμο και τα επιμέρους χαρακτηριστικά του, όπως ταχύτητα και προσανατολισμός, περιλαμβάνονται στα αρχεία Weather ".WTR" και Wind ".WND" και αντλήθηκαν από τον Πίνακα 4-8.

Load File (.LCP)	Clear Files	ATALANTI_LA	ANDSCAPE.L
Save File (.LCP)	Latitude ?	Units and Options DISTANCE	
Elevation ASCII	Atalanti_Elevation.asc	Meters C Feet	ок
🔲 Slope ASCII	Atalanti_Slopes.asc	C Degrees C Percent	<u>0</u>
Aspect ASCII	Atalanti_Aspect.asc	C 1-25	
Fuel Model ASCII	alanti_Classification.asc	Custom Convert Const	Help
Canopy Cover ASCII	Atalanti_Canopy.asc	Cat. 0-4 ○ Percent □ Const	Thep
🔲 StandHeight ASCII		Meters*10 💌 🗖 Const	
🔲 Crown Base Height		Meters*10 🗾 🗖 Const	Cancel
🔲 Crown Bulk Density		kg/m3*100 🗨 🗖 Const	
Duff Loading ASCII		ⓒ T/ac C Mg/ha □ Const	
Coarse Woody ASCII		Const	

Σχήμα 4-14: Εισαγωγή χαρακτηριστικών τοπίου – Μαλεσίνα Αταλάντης

Load Project	Atalanti_Project.FPJ	Attache	d Vector Files	
Save Project	Close Project	Canopy Characteristi		
Landscape File (.LCP)	Weather Files (.WTR)			
ANTI_LANDSCAPE.LCP	T ATALANTI.WTF	Ā ->		
Fuel Files	2	>		
Adjustments (.ADJ)	3	->	ОК	
ATALANTI.ADJ ->	4	•>	-	
✓ Moistures (.FMS)	□ 5	·>		
ATALANTI.FMS ->	Wind Files (.WND)		Halo	
	T ATALANTI.WNE) ->	Пер	
 Conversions (.CNV) 	□ 2	->		
ATALANTI.CNV _.	□ 3	->		
Custom Models (.FMD)	□ 4 □	· ->	Cancel	
>	5	·>	8	
Coarse Woody (.CWD)	Burn Period (BPD)	d		

Σχήμα 4-15: Επιμέρους εισαγωγή χαρακτηριστικών της προσομοίωσης – Μαλεσίνα Αταλάντης

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης (Scott-Burgan)	Περιοχή	Περιγραφή	Farsite (αντιστοίχιση)
NB (NB1,3,8,9)	Αδιαπέρατη επιφάνεια	Αστική περιοχή, Καλλιέργειες, Γυμνό έδαφος	91
NB8	Υδάτινη επιφάνεια	Υδάτινη επιφάνεια	98
GR4	Χορτολίβαδα	Χορτολιβαδικές εκτάσεις έως 0,6μ	104
SH2	Χαμηλοί θάμνοι	Χαμηλή σκληρόφυλλη βλάστηση έως 0,5μ	142
SH7	Υψηλοί θάμνοι	Υψηλή σκληρόφυλλη βλάστηση 1 έως 2μ	147
TU4	Αραιά κωνοφόρα	Αραιή σύσταση κωνοφόρου δάσους 2 έως 5μ	164
TU5	Πυκνά Κωνοφόρα	Πυκνή σύσταση κωνοφόρου δάσους 7 έως 10μ	165

Πίνακας 4-6: Μοντέλα καύσιμης ύλης και αντιστοίχησή τους με το Farsite, για την περιοχή της Μαλεσίνας Αταλάντης

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 1h (%)	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 10h (%)	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 100h (%)	Υγρασία ζωντανής ποώδους (LH) Καύσιμης Ύλης (%)	Υγρασία ζωντανής ξυλώδους (LW) Καύσιμης Ύλης (%)
91	3	4	8	0	75
98	3	4	8	0	75
104	3	4	8	0	75
142	3	4	8	0	75
147	3	4	8	0	75
164	3	4	8	0	75
165	3	4	8	0	75

Πίνακας 4-7: Χρονική υστέρηση Μ.Κ.Υ. – Αταλάντη

Πίνακας 4-8: Μετεωρολογικά δεδομένα – Αταλάντη

Ημερομηνία	Ώρα	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη σχετική υγρασία (%)	Ελάχιστη σχετική υγρασία (%)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Προσανατολισμός ανέμου (μοίρες)
26/6/2014	12:00-15:00	40,3	32,1	30,0	18,0	14,5	22,5
26/6/2014	15:01-18:00	41,7	39,9	16,0	11,0	14,5	247,5
26/6/2014	18:01-21:00	41,0	34,3	26,0	12,0	12,9	247,5
26/6/2014	21:01-00:00	34,0	32,8	25,0	18,0	4,8	225
27/6/2014	00:01-03:00	32,6	28,6	33,0	21,0	3,2	292,5
27/6/2014	03:01-06:00	31,3	28,2	31,0	24,0	9,7	180
27/6/2014	06:01-09:00	32,3	27,7	28,0	23,0	14,5	180
27/6/2014	09:01-12:00	37,2	32,6	26,0	20,0	27,4	225
27/6/2014	12:01-15:00	40,2	37,7	21,0	16,0	16,1	180
27/6/2014	15:01-18:00	40,2	38,6	22,0	15,0	12,9	225
27/6/2014	18:01-21:00	38,8	30,2	46,0	20,0	27,4	225
27/6/2014	21:01-00:00	29,8	26,4	57,0	48,0	19,3	45

28/6/2014	00:01-03:00	26,6	25,6	73,0	54,0	4,8	67,5
28/6/2014	03:01-06:00	25,6	23,6	75,0	68,0	27,4	45
28/6/2014	06:01-09:00	24,8	23,4	72,0	69,0	16,1	225
28/6/2014	09:01-12:00	26,6	24,4	73,0	66,0	24,1	45
28/6/2014	12:01-15:00	29,1	24,3	72,0	54,0	24,1	45
28/6/2014	15:01-18:00	28,9	27,4	59,0	54,0	22,5	45
28/6/2014	18:01-21:00	27,2	24,6	62,0	59,0	20,9	45
28/6/2014	21:01-00:00	24,4	23,5	65,0	59,0	12,9	360
29/6/2014	00:01-03:00	24,1	21,0	77,0	59,0	14,5	292,5
29/6/2014	03:01-06:00	20,8	19,4	83,0	77,0	1,6	315
29/6/2014	06:01-09:00	24,7	19,4	85,0	70,0	1,6	315
29/6/2014	09:01-12:00	28,5	24,9	68,0	49,0	17,7	292,5
29/6/2014	12:01-15:00	29,8	28,7	47,0	40,0	11,3	22,5
29/6/2014	15:00					22,5	67,5

Τα ανωτέρω μετεωρολογικά δεδομένα προέκυψαν ύστερα από ανάλυση και προέρχονται από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στο Θεολόγο Φθιώτιδας (LGO6) (LAT: 38° 14' 24" N, LONG: 23° 03' 36" E), ο οποίος είναι ο εγγύτερος σε συνάρτηση με το συμβάν της πυρκαγιάς. Ο σταθμός βρίσκεται σε υψόμετρο 30μ. Το ύψος των αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας βρίσκεται στα 2μ και το ύψος του ανεμομέτρου στα 5μ. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν τις τέσσερις κρίσιμες ημέρες του Ιουνίου 2014 κι έχουν αναλυθεί σε τρίωρα αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 4-16, περιλαμβάνεται ο ορισμός της χρονικής περιόδου που θα λειτουργήσει το μοντέλο για να προσομοιώσει την πυρκαγιά που θα του ορίσουμε. Σύμφωνα με στοιχεία του Ενιαίου Συντονιστικού Κέντρου Επιχειρήσεων του Πυροσβεστικού Σώματος, στη μελέτη περίπτωσης της πυρκαγιάς στη Μαλεσίνα Αταλάντης, η έναρξη της εντοπίζεται στη 1μ.μ. στις 26/06/2014 και η καταστολή στις 4μ.μ. στις 29/06/2014. Επιλέχθηκε χρονικό βήμα ανάλυσης 30 λεπτών και βήμα οπτικοποίησης περιμέτρου ανά μία ώρα. Επίσης η ανάλυση περιμέτρου ορίστηκε στα 68μ και η ανάλυση απόστασης εξάπλωσης στα 43 μέτρα. Το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς προέκυψε επίσης από τα στοιχεία του Πυροσβεστικού Σώματος στο Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς - WGS84 (LAT: 38° 36' 00" N, LONG: 23° 13' 00" Ε) και ορίστηκε στο μοντέλο μέσω σημείου σε shapefile (.shp).

Use Conditioning Period for Fuel Moistures Month Day Hour Min DK Help Cancel Month Day Help Cancel Month Day Conditioning Conditioning Starting Ending Conditioning C	eters

Σχήμα 4-16: Χρονική διάρκεια πυρκαγιάς και ρύθμιση παραμέτρων

4.2.2 Δεδομένα εξόδου – Μαλεσίνα Αταλάντης

Στο Σχήμα 4-17, απεικονίζεται η χωρική προσομοίωση της πυρκαγιάς στην Κερατέα Αττικής. Η εξάπλωση της πυρκαγιάς εμφανίζεται με τη λευκή αραχνώδη υφή. Επίσης εμφανίζεται ένα σχετικό υπόμνημα για την εικόνα της προσομοίωσης, το οποίο περιλαμβάνει με χαρακτηριστικά χρώματα τα Μ.Κ.Υ. όπως έχουν οριστεί στον Πίνακα 4-6 και την περίμετρο της πραγματικής καμένης έκτασης με μαύρο χρώμα, καθώς και το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς με κίτρινο χρώμα.

Το Σχήμα 4-18 περιλαμβάνει τη τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση της χωρικής εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Στην εικόνα αυτή είναι εμφανείς οι αλλαγές του υψομέτρου και των κλίσεων της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4-17: Χωρική προσομοίωση πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος Farsite στην περιοχή της Μαλεσίνα Αταλάντης (από 26/06/2014 - 1μ.μ. έως 29/06/2014 -



Σχήμα 4-18: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Αταλάντη 2014

Το Σχήμα 4-19, περιλαμβάνει το διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min), της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²), καθώς και τιμές μήκους φλόγας από 1m έως 5m. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2-1, αντιστοίχησης των τιμών του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες καταστολής μιας πυρκαγιάς (Byram, 1959) και το Σχήμα 2-2, που περιλαμβάνει το διάγραμμα της μεταβολής της ταχύτητας εξάπλωσης ανάλογα με την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας και τις κατηγορίες ανάλογα με τις ενέργειες καταστολής (Rothermel and Andrews, 1982), γίνεται εμφανές, λόγω των κόκκινων κουκίδων του διαγράμματος, ότι η συγκεκριμένη πυρκαγιά μπορεί να αντιμετωπιστεί με άμεση προσβολή χρησιμοποιώντας πεζοπόρα τμήματα και χειρωνακτικά εργαλεία. Η μέγιστη ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς, Rate of Spread υπολογίζεται σε ROS=0,1km/h.



Σχήμα 4-19: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²) – Αταλάντη 2014

Το Σχήμα 4-20, απεικονίζει τη χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας (°F) (μωβ χρώμα) και υγρασίας (%) (μαύρο χρώμα) ανά ώρα, κατά τη χρονική διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Από αυτό το διάγραμμα μπορούμε να αντλήσουμε αρκετά στοιχεία που σχετίζονται με την έναρξη, αλλά και εξέλιξη της πυρκαγιάς. Η θερμοκρασία όσο μεγαλύτερες τιμές παίρνει, τόσο περισσότερο μειώνεται το ποσοστό της σχετικής υγρασίας του αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προπαρασκευή της καύσιμης ύλης και τη μετατροπή της σε εύφλεκτο υλικό, αφού η υγρασιακή αποστέρηση είναι μεγαλύτερη όταν τα ποσοστά της σχετικής υγρασίας του αέρα είναι μικρά. Η καύσιμη ύλη τότε γίνεται θετική είτε για την έναρξη είτε για την εξάπλωση μιας δασικής πυρκαγιάς. Συνήθως οι αρνητικές επιπτώσεις στις δασικές πυρκαγιές σχετικά με το ποσοστό της σχετικής υγρασίας, αυτές εμφανίζονται όταν τα ποσοστά αυτά είναι κάτω του 50% (Ηλιόπουλος, 2013). Από το παρακάτω διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας φαίνεται ότι οι συνθήκες για την έναρξη, διατήρηση και εξάπλωση της πυρκαγιές είναι ιδανικές.



Σχήμα 4-20: Διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας ανά ώρα – Αταλάντη 2014

Στο Σχήμα 4-21, απεικονίζεται το διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Οι τιμές Flaming και Smoldering αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τη τέλεια και την ατελή καύση. Στα Σχήματα 4-22, 4-23 και 4-24 απεικονίζονται άλλα τρία διαγράμματα που εμφανίζουν τις εκπομπές (mg) μεθανίου (CH4), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO2). Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα, παρατηρώντας τα παρακάτω διαγράμματα, να αντληθούν πληροφορίες και τιμές για τη ρύπανση της ατμόσφαιρας από την προσομοίωση της πυρκαγιάς στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης της Μαλεσίνας Αταλάντης.



Σχήμα 4-21: Διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό βήμα της

προσομοίωσης – Αταλάντη 2014



Σχήμα 4-22: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μεθανίου (CH4) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Αταλάντη 2014



Σχήμα 4-23: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Αταλάντη 2014



Σχήμα 4-24: Διάγραμμα εκπομπών (mg) διοξειδίου του άνθρακα (CO2) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Αταλάντη 2014

4.2.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – Μαλεσίνα Αταλάντης

Στον Πίνακα 4-9, απεικονίζεται η εμβαδομέτρηση των περιοχών της πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοιωμένης έκτασης μετρημένη σε εκτάρια και στρέμματα. Η περιοχή της ταύτισης περιλαμβάνει την ένωση των περιοχών της καμένης έκτασης και της προσομοίωσης. Η υπερεκτίμηση περιλαμβάνει την περιοχή που προσομοιώθηκε από το πρόγραμμα Farsite ότι θα καεί, αλλά στην πραγματικότητα δεν κάηκε. Η υποεκτίμηση αντιστοιχεί στην περιοχή που πραγματικά κάηκε, αλλά δεν προβλέφθηκε ότι θα καεί από την προσομοίωση.

Περιοχή	Εκτάρια (ha)	Στρέμματα
Καμένη έκταση	2490	24900
Προσομοιωμένη έκταση	1549	15490
Ταύτιση	1208	12080
Υπερεκτίμηση	341	3410
Υποεκτίμηση	1282	12820

Πίνακας 4-9: Εμβαδομέτρηση πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοιωμένης έκτασης

Στον Πίνακα 4-10, εμφανίζονται οι δυνάμεις που συνέβαλαν στην κατάσβεση της δασικής πυρκαγιάς στην Κερατέα. Περιληπτικά έλαβαν μέρος 187 άτομα, 31 οχήματα, 3 χωματουργικά μηχανήματα και 5 εναέρια μέσα (1 ελικόπτερο και 4 αεροσκάφη – Α/Φ).

Πίνακας 4-10: Συνολικές δυνάμεις καταστολής της πυρκαγιάς στη Μαλεσίνα Αταλάντης

ΠΥΡΟΣ.	ПЕΖОПОРА	ΣΤΡΑΤΟΣ	ΑΛΛΕΣ	ΠΥΡΟΣ.	ΒΥΤΙΟ-	MHXANH-	ΕΛΙΚΟ-	Α/Φ	Α/Φ
ΣΩΜΑ	ТМНМАТА		ΔΥΝΑΜΕΙΣ	ΟΧΗΜ.	ΦΟΡΑ	MATA	ΠΤΕΡΑ	CL215	PZL
60	70	50	7	27	4	3	1	2	2

Στο Σχήμα 4-25, απεικονίζονται χωρικά και γεωγραφικά στην περιοχή μελέτης της Μαλεσίνας Αταλάντης οι εμβαδομετρημένες εκτάσεις της πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοίωσης. Στην εν λόγω προσομοίωση το ποσοστό ταύτισης της πραγματικής με την προσομοιωμένη καμένη έκταση ανέρχεται σε 49%.



Σχήμα 4-25: Αξιολόγηση προσομοίωσης πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος Farsite στην περιοχή της Μαλεσίνας Αταλάντης

4.3 Προσομοίωση πυρκαγιάς στην περιοχή του όρους Υμηττός – 2015

4.3.1 Δεδομένα εισόδου - Υμηττός

Τα δεδομένα των χαρακτηριστικών του τοπίου (Landscape file) που επιλέχθηκε για την προσομοίωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-26. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν τον παράλληλο του γεωγραφικού πλάτους που ανήκει η περιοχή μας, ο οποίος είναι ο 37°ς, τα χαρακτηριστικά του υψομέτρου (αρχείο Elevation), των κλίσεων γης (αρχείο Slope) και τον προσανατολισμό των πρανών (αρχείο Aspect), τα οποία αντλούνται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής. Επίσης περιλαμβάνεται η ταξινόμηση των καλύψεων γης (αρχείο Fuel Model) και ο βαθμός συγκόμωσης του ανώροφου (αρχείο Canopy Cover) των δέντρων που περιλαμβάνονται στην καύσιμη ύλη.

Στο Σχήμα 4-27, εισάγονται δεδομένα τα οποία περιλαμβάνουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Μοντέλων Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.) που έχουν επιλεχθεί, όπως την αντιστοίχιση των Μ.Κ.Υ. (Scott & Burgan, 2005) με αυτά που περιέχει το πρόγραμμα Farsite (αρχείο Conversions ".CNV"), Πίνακας 4-11 και τη χρονική υστέρηση της καύσιμης ύλης ανάλογα με το μέγεθός της και τη φύση της, ποώδης ή ξυλώδης (αρχείο Moistures ".FMS"), Πίνακας 4-12.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που σχετίζονται κυρίως με τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, τον άνεμο και τα επιμέρους χαρακτηριστικά του, όπως ταχύτητα και προσανατολισμός, περιλαμβάνονται στα αρχεία Weather ".WTR" και Wind ".WND" και αντλήθηκαν από τον Πίνακα 4-13.

Load File (.LCP)	Clear Files	YMITTOS_LANDSCAF	PE_30MINS.L
Save File (.LCP)	Latitude ?	Units and Options DISTANCE	
Elevation ASCII	Ymmitos_Elevation.asc		ОК
🗌 Slope ASCII	Ymmitos_Slopes.asc	C Degrees C Percent	
C Aspect ASCII	Ymmitos_Aspects.asc	C 1-25	
🔲 Fuel Model ASCII	mitos_Classification.asc	Custom Convert Const	Help
🗌 Canopy Cover ASCII	Ymmitos_Canopy.asc	Cat. 0-4 ○ Percent □ Const	
StandHeight ASCII		Meters*10 💽 🗖 Const	
🗌 Crown Base Height		Meters*10 💽 🗖 Const	Cancel
Crown Bulk Density		kg/m3*100 💽 🗆 Const	
Duff Loading ASCII		ⓒ T/ac O Mg/ha □ Const	
Coarse Woody ASCII		Const	

Σχήμα 4-26: Εισαγωγή χαρακτηριστικών τοπίου – Υμηττός

Load Project	Ymittos_Project_30mins.FPJ	Attached Vector Fil		
Save Project	Close Project	Canopy (Canopy Characteristics	
🔽 Landscape File (.LCP)	- Weather Files (.WTR)			
NDSCAPE_30MINS.LCP	1 YMMITOS.WT	R ->		
Fuel Files	□ 2	->		
🔽 Adjustments (.ADJ)	□ 3	->	οκ	
YMMITOS.ADJ ->	4	->		
Moistures (.FMS)	5	->		
YMMITOS.FMS →	Wind Files (.WND)		Hale	
	T YMMITOS.WN	D ->	пер	
Conversions (.CNV)	2	->		
YMMITOS.CNV ->	3			
Custom Models (.FMD)	4	->	Cancel	
>	5	·>		
Coarse Woody (.CWD)	Burn Period (BPD)			

Σχήμα 4-27: Επιμέρους εισαγωγή χαρακτηριστικών της προσομοίωσης – Υμηττός

Πίνακας 4-11: Μοντέλα καύσιμης ύλης και αντιστοίχησή τους με το Farsite, για την περιοχή του

Υμηττού

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης (Scott-Burgan)	Περιοχή	Περιγραφή	Farsite (αντιστοίχιση)
NB1	Αδιαπέρατη επιφάνεια	Αστική περιοχή, Καλλιέργειες, Υδάτινη επιφάνεια, Γυμνό έδαφος	91
GR4	Χορτολίβαδα	Χορτολιβαδικές εκτάσεις έως 0,6μ	104
SH2	Χαμηλοί θάμνοι	Χαμηλή σκληρόφυλλη βλάστηση έως 0,5μ	142
SH7	Υψηλοί θάμνοι	Υψηλή σκληρόφυλλη βλάστηση 1 έως 2μ	147
TU4	Αραιά κωνοφόρα	Αραιή σύσταση κωνοφόρου δάσους 2 έως 5μ	164
TU5	Πυκνά Κωνοφόρα	Πυκνή σύσταση κωνοφόρου δάσους 7 έως 10μ	165
TL2	Πλατύφυλλα	Δάσος πλατυφύλλων	182

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 1h (%)	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 10h (%)	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 100h (%)	Υγρασία ζωντανής ποώδους (LH) Καύσιμης Ύλης (%)	Υγρασία ζωντανής ξυλώδους (LW) Καύσιμης Ύλης (%)
91	3	4	8	0	75
104	3	4	8	0	75
142	3	4	8	0	75
147	3	4	8	0	75
164	3	4	8	0	75
165	3	4	8	0	75
182	3	4	8	0	75

Πίνακας 4-12: Χρονική υστέρηση Μ.Κ.Υ. – Υμηττός

Πίνακας 4-13: Μετεωρολογικά δεδομένα – Υμηττός

Ημερομηνία	Ώρα	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη σχετική υγρασία (%)	Ελάχιστη σχετική υγρασία (%)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Προσανατολισμός ανέμου (μοίρες)
17/7/2015	13:01-13:30	25,1	25,3	33	32	20,9	22,5
17/7/2015	13:31-14:00	24,7	25,1	34	32	20,9	22,5
17/7/2015	14:01-14:30	24,9	25,2	33	32	16,1	22,5
17/7/2015	14:31-15:00	24,2	24,5	35	34	16,1	360
17/7/2015	15:01-15:30	23,3	23,8	37	34	17,7	22,5
17/7/2015	15:31-16:00	23	23	39	37	16,1	22,5
17/7/2015	16:01-16:30	22,1	22,6	41	40	16,1	22,5
17/7/2015	16:31-17:00	21,5	21,9	44	42	16,1	22,5
17/7/2015	17:01-17:31	21,1	21,3	46	45	16,1	22,5
17/7/2015	17:31-18:00	20,6	20,9	49	47	14,5	22,5
17/7/2015	18:01-18:30	20,4	20,5	52	50	14,5	360
17/7/2015	18:31-19:00	20,2	20,3	55	52	12,9	360

17/7/201519:01-19:3019,819,9565512,936017/7/201519:31-20:0019,819,9585614,522,517/7/201520:01-20:3019,519,7595914,522,517/7/201520:31-21:0019,419,5616117,722,5	
17/7/2015 19:31-20:00 19,8 19,9 58 56 14,5 22,5 17/7/2015 20:01-20:30 19,5 19,7 59 59 14,5 22,5 17/7/2015 20:31-21:00 19,4 19,5 61 61 17,7 22,5	
17/7/201520:01-20:3019,519,7595914,522,517/7/201520:31-21:0019,419,5616117,722,5	1
17/7/2015 20:31-21:00 19,4 19,5 61 61 17,7 22,5	1
	1
17/7/2015 21:01-21:30 19,3 19,4 61 61 19,3 22,5	1
17/7/2015 21:31-22:00 19,2 19,3 62 61 19,3 22,5	1
17/7/2015 22:01-22:30 18,8 19 63 63 16,1 22,5	1
17/7/2015 22:31-23:00 18,8 18,8 62 61 17,7 22,5	1
17/7/2015 23:01-23:30 18,9 19,1 60 57 19,3 22,5	1
17/7/2015 23:31-24:00 19,2 19,3 57 56 17,7 360	

Τα παραπάνω μετεωρολογικά δεδομένα προέκυψαν ύστερα από ανάλυση και προέρχονται από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στο όρος Υμηττός (LGO2) (LAT: 37° 57' 00" N, LONG: 23° 48' 00" Ε), ο οποίος είναι ο εγγύτερος σε συνάρτηση με το συμβάν της πυρκαγιάς. Ο σταθμός βρίσκεται σε υψόμετρο 1011μ. Το ύψος των αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας βρίσκεται στα 2μ και το ύψος του ανεμομέτρου στα 3,5μ. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν την 17^η Ιουλίου 2015 κι έχουν αναλυθεί σε 30λεπτα (30mins) αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 4-28, περιλαμβάνεται ο ορισμός της χρονικής περιόδου που θα λειτουργήσει το μοντέλο για να προσομοιώσει την πυρκαγιά που θα του ορίσουμε. Σύμφωνα με στοιχεία του Ενιαίου Συντονιστικού Κέντρου Επιχειρήσεων του Πυροσβεστικού Σώματος, στη μελέτη περίπτωσης της πυρκαγιάς στον Υμηττό, η έναρξη της εντοπίζεται στις 12μ.μ. στις 17/07/2015 και η καταστολή στις 11μ.μ. στις 17/07/2015. Επιλέχθηκε χρονικό βήμα ανάλυσης 20 λεπτών και βήμα οπτικοποίησης περιμέτρου ανά 40 λεπτά. Επίσης η ανάλυση περιμέτρου ορίστηκε στα 56μ και η ανάλυση απόστασης εξάπλωσης στα 40 μέτρα. Το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς προέκυψε επίσης από τα στοιχεία του Πυροσβεστικού Σώματος στο Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς - WGS84 (37° 55' 50" Ν, 23° 45' 59" Ε) και ορίστηκε στο μοντέλο μέσω σημείου σε shapefile (.shp).

86

	Conditioning	Starting	- Ending	◆ 20.00 min
lonth				- Yeible Stope
Toriar		× [17]		
Jay			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
łour	*	1200	±2300	Primary C Secondary 40.00 min
1in	*	<u>*</u> 0		Perimeter Resolution
				▲ ► 56 m
	OK	Help	Cancel	
				Distance Resolution
				▲ ↓ 40 m
				Units
				OK Hele Caread @ Metric

Σχήμα 4-28: Χρονική διάρκεια πυρκαγιάς και ρύθμιση παραμέτρων

4.3.2 Δεδομένα εξόδου – Υμηττός

Στο Σχήμα 4-29, απεικονίζεται η χωρική προσομοίωση της πυρκαγιάς στην Υμηττό Αττικής, χωρίς πυροσβεστικό εμπόδιο. Η εξάπλωση της πυρκαγιάς εμφανίζεται με τη λευκή αραχνώδη υφή. Επίσης εμφανίζεται ένα σχετικό υπόμνημα για την εικόνα της προσομοίωσης, το οποίο περιλαμβάνει με χαρακτηριστικά χρώματα τα Μ.Κ.Υ. όπως έχουν οριστεί στον Πίνακα 4-11 και την περίμετρο της πραγματικής καμένης έκτασης με μαύρο χρώμα, καθώς και το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς με μπλε χρώμα. Στο Σχήμα 4-30, απεικονίζεται η ίδια προσομοίωση, αλλά με την παρεμβολή πυροσβεστικού εμποδίου. Κατόπιν ενημέρωσης από το Ενιαίο Συντονιστικό Κέντρο Επιχειρήσεων του Πυροσβεστικού Σώματος, στην εν λόγω πυρκαγιά είχε τεθεί ως σημείο ανακοπής της πορείας της η κορυφογραμμή του Υμηττού, με τη συμβολή εναέριων μέσων και πεζοπόρων τμημάτων. Αυτό τελικά κατέστη εφικτό και η πυρκαγιά δεν προχώρησε προς τα κατάντη του Υμηττού παρόλο που στην περιοχή η μετεωρολογικές συνθήκες και η καύσιμη ύλη ήταν ιδανικές. Στο Σχήμα 4-29 απεικονίζεται αυτή η υποτιθέμενη κάθοδος της πυρκαγιά προς την κατωφέρεια του Υμηττού.

Το Σχήμα 4-31 περιλαμβάνει τη τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση της χωρικής εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Στην εικόνα αυτή είναι εμφανείς οι αλλαγές του υψομέτρου και των κλίσεων της περιοχής μελέτης καθώς και του εικονικού πυροσβεστικού εμποδίου που απεικονίζεται στην κορυφογραμμή του Υμηττού.



Σχήμα 4-29: Χωρική προσομοίωση πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος Farsite – Υμηττός (από 17/07/2015 - 12μ.μ. έως 17/07/2015 - 11 μ.μ.) – χωρίς

πυροσβεστικό εμπόδιο



Σχήμα 4-30: Χωρική προσομοίωση πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος Farsite – Υμηττός (από 17/07/2015 - 12μ.μ. έως 17/07/2015 - 11 μ.μ.) – με

πυροσβεστικό εμπόδιο



Σχήμα 4-31: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Υμηττός 2015

Το Σχήμα 4-32, περιλαμβάνει το διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min), της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²), καθώς και τιμές μήκους φλόγας από 1m έως 5m. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2-1, αντιστοίχησης των τιμών του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες καταστολής μιας πυρκαγιάς (Byram, 1959) και το Σχήμα 2-2, που περιλαμβάνει το διάγραμμα της μεταβολής της ταχύτητας εξάπλωσης ανάλογα με την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας και τις κατηγορίες ανάλογα με τις ενέργειες καταστολής (Rothermel and Andrews, 1982), γίνεται εμφανές, λόγω των κόκκινων κουκίδων του διαγράμματος, ότι η συγκεκριμένη πυρκαγιά πλησίασε τα 2μ μήκους φλόγας. Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη πυρκαγιά για κάποιο χρονικό διάστημα μαινόταν ανεξέλεγκτη και χρειάστηκαν πολλές προσπάθειες άμεσης αλλά και έμμεσης προσβολής για να τεθεί υπό έλεγχο και τελικά να κατασταλεί. Η αντιμετώπισή της πραγματοποιήθηκε με υδροφόρα οχήματα, πεζοπόρα τμήματα και εναέρια μέσα αεροπυρόσβεσης. Η μέγιστη ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς, Rate of Spread υπολογίζεται σε ROS=1,2km/h, μια πραγματικά μεγάλη ταχύτητα εξάπλωσης που μπορεί να προκαλέσει εκρηκτική συμπεριφορά της πυρκαγιάς.



Σχήμα 4-32: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²) – Υμηττός 2015

Το Σχήμα 4-33, απεικονίζει τη χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας (°F) (μωβ χρώμα) και υγρασίας (%) (μαύρο χρώμα) ανά ώρα, κατά τη χρονική διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Από αυτό το διάγραμμα μπορούμε να αντλήσουμε αρκετά στοιχεία που σχετίζονται με την έναρξη, αλλά και εξέλιξη της πυρκαγιάς. Η θερμοκρασία όσο μεγαλύτερες τιμές παίρνει, τόσο περισσότερο μειώνεται το ποσοστό της σχετικής υγρασίας του αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την προπαρασκευή της καύσιμης ύλης και τη μετατροπή της σε εύφλεκτο υλικό, αφού η υγρασιακή αποστέρηση είναι μεγαλύτερη όταν τα ποσοστά της σχετικής υγρασίας του αέρα είναι μικρά. Η καύσιμη ύλη τότε γίνεται θετική είτε για την έναρξη είτε για την εξάπλωση μιας δασικής πυρκαγιάς. Συνήθως οι αρνητικές επιπτώσεις στις δασικές πυρκαγιές σχετικά με το ποσοστό της σχετικής υγρασίας, αυτές εμφανίζονται όταν τα ποσοστά αυτά είναι κάτω του 50% (Ηλιόπουλος, 2013). Από το παρακάτω διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας φαίνεται ότι οι συνθήκες για την έναρξη, διατήρηση και εξάπλωση της πυρκαγιές είναι ιδανικές. Κατά διάρκεια εξέλιξης της πυρκαγιάς οι τιμές της σχετικής υγρασίας πέφτουν κάτω από το 30%.



Σχήμα 4-33: Διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας ανά ώρα – Υμηττός 2015

Στο Σχήμα 4-34, απεικονίζεται το διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Οι τιμές Flaming και Smoldering αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τη τέλεια και την ατελή καύση. Στα Σχήματα 4-35, 4-36 και 4-37 απεικονίζονται άλλα τρία διαγράμματα που εμφανίζουν τις εκπομπές (mg) μεθανίου (CH4), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO2). Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα, παρατηρώντας τα παρακάτω διαγράμματα, να αντληθούν πληροφορίες και τιμές για τη ρύπανση της ατμόσφαιρας από την προσομοίωση της πυρκαγιάς στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης του Υμηττού. Παρατηρούμε στα διαγράμματα του μεθανίου και του μονοξειδίου του άνθρακα, ότι οι τιμές της ατελούς καύσης είναι εκθετικά μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις τιμές της τέλειας καύσης.



Σχήμα 4-34: Διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Υμηττός 2015



Σχήμα 4-35: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μεθανίου (CH4) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Υμηττός 2015



Σχήμα 4-36: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Υμηττός 2015



Σχήμα 4-37: Διάγραμμα εκπομπών (mg) διοξειδίου του άνθρακα (CO2) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Υμηττός 2015

4.3.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – Υμηττός

Στον Πίνακα 4-14, απεικονίζεται η εμβαδομέτρηση των περιοχών της πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοιωμένης έκτασης μετρημένη σε εκτάρια και στρέμματα. Η περιοχή της ταύτισης περιλαμβάνει την ένωση των περιοχών της καμένης έκτασης και της προσομοίωσης. Η υπερεκτίμηση περιλαμβάνει την περιοχή που προσομοιώθηκε από το πρόγραμμα Farsite ότι θα καεί, αλλά στην πραγματικότητα δεν κάηκε. Η υποεκτίμηση αντιστοιχεί στην περιοχή που πραγματικά κάηκε, αλλά δεν προβλέφθηκε ότι θα καεί από την προσομοίωση.

Περιοχή	Εκτάρια (ha)	Στρέμματα
Καμένη έκταση	818	8180
Προσομοιωμένη έκταση	636	6360
Ταύτιση	547	5470
Υπερεκτίμηση	89	890
Υποεκτίμηση	271	2710

Πίνακας 4-14: Εμβαδομέτρηση πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοιωμένης έκτασης

Στον Πίνακα 4-15, εμφανίζονται οι δυνάμεις που συνέβαλαν στην κατάσβεση της δασικής πυρκαγιάς στην Κερατέα. Περιληπτικά έλαβαν μέρος 584 άτομα, 64 οχήματα, 2 χωματουργικά μηχανήματα και 2 εναέρια μέσα (1 ελικόπτερο και 1 αεροσκάφος – Α/Φ).

Πίνακας 4-15: Συνολικές δυνάμεις καταστολής της πυρκαγιάς στον Υμηττό

ΠΥΡΟΣ.	ПЕΖОПОРА	ΕΘΕΛΟΝΤΕΣ	ΑΛΛΕΣ	ΠΥΡΟΣ.	ОХНМ.	ΒΥΤΙΟ-	MHXANH-	ΕΛΙΚΟ-	Α/Φ
ΣΩΜΑ	ТМНМАТА		ΔΥΝΑΜΕΙΣ	ΟΧΗΜ.	ОТА	ΦΟΡΑ	MATA	ΠΤΕΡΑ	CL215
386	116	80	2	30	22	12	2	1	1

Στο Σχήμα 4-38, απεικονίζονται χωρικά και γεωγραφικά στην περιοχή μελέτης του Υμηττού Αττικής οι εμβαδομετρημένες εκτάσεις της πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοίωσης. Στο εν λόγω σχήμα απεικονίζεται με σκούρο καφέ χρώμα το εικονικό πυροσβεστικό εμπόδιο στην κορυφογραμμή του Υμηττού. Στην εν λόγω προσομοίωση το ποσοστό ταύτισης της πραγματικής με την προσομοιωμένη καμένη έκταση ανέρχεται σε 67%.



Σχήμα 4-38: Αξιολόγηση προσομοίωσης πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος Farsite στην περιοχή του όρους Υμηττός

4.4 Προσομοίωση πυρκαγιάς στην περιοχή της Νεάπολης Λακωνίας – 2015

4.4.1 Δεδομένα εισόδου - Νεάπολη Λακωνίας

Τα δεδομένα των χαρακτηριστικών του τοπίου (Landscape file) που επιλέχθηκε για την προσομοίωση παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-39. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν τον παράλληλο του γεωγραφικού πλάτους που ανήκει η περιοχή μας, ο οποίος είναι ο 36°ς, τα χαρακτηριστικά του υψομέτρου (αρχείο Elevation), των κλίσεων γης (αρχείο Slope) και τον προσανατολισμό των πρανών (αρχείο Aspect), τα οποία αντλούνται από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους της περιοχής. Επίσης περιλαμβάνεται η ταξινόμηση των καλύψεων γης (αρχείο Fuel Model) και ο βαθμός συγκόμωσης του ανώροφου (αρχείο Canopy Cover) των δέντρων που περιλαμβάνονται στην καύσιμη ύλη.

Στο Σχήμα 4-40, εισάγονται δεδομένα τα οποία περιλαμβάνουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των Μοντέλων Καύσιμης Ύλης (Μ.Κ.Υ.) που έχουν επιλεχθεί, όπως την αντιστοίχιση των Μ.Κ.Υ. (Scott & Burgan, 2005) με αυτά που περιέχει το πρόγραμμα Farsite (αρχείο Conversions ".CNV"), Πίνακας 4-16 και τη χρονική υστέρηση της καύσιμης ύλης ανάλογα με το μέγεθός της και τη φύση της, ποώδης ή ξυλώδης (αρχείο Moistures ".FMS"), Πίνακας 4-17.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα που σχετίζονται κυρίως με τη θερμοκρασία, τη σχετική υγρασία, τον άνεμο και τα επιμέρους χαρακτηριστικά του, όπως ταχύτητα και προσανατολισμός, περιλαμβάνονται στα αρχεία Weather ".WTR" και Wind ".WND" και αντλήθηκαν από τον Πίνακα 4-18.

Load File (.LCP)	Clear Files	NEAPOLI_LANDSCAF	PE_30MINS.LC
Save File (.LCP)	Latitude ?	Units and Options DISTANCE	
Elevation ASCII	Neapoli_Elevation.asc		ок
🗔 Slope ASCII	Neapoli_Slopes.asc	Degrees O Percent	
Aspect ASCII	Neapoli_Aspects.asc	C 1-25 @ Degrees	
🗐 Fuel Model ASCII	apoli_Classification.asc	Custom Convert Const	Halo
🔲 Canopy Cover ASCII	Neapoli_Canopy.asc	Cat. 0-4 ○ Percent □ Const Const	
🗖 StandHeight ASCII		Meters*10 🖵 🗖 Const	
🔲 Crown Base Height		Meters*10 🗾 🗖 Const	Cancel
🔲 Crown Bulk Density	İ	kg/m3*100 □ Const	
Duff Loading ASCII		⊙ T/ac C Mg/ha □ Const	
Coarse Woody ASCII		Const	

Σχήμα 4-39: Εισαγωγή χαρακτηριστικών τοπίου – Νεάπολη

Load Project	Neapoli_Project_30mins.FPJ	Attached \	/ector Files
Save Project	Close Project Canopy Charac		
Landscape File (.LCP)	┌─Weather Files (.WTR)	-	
NDSCAPE_30MINS.LCP	▼ 1 APOLI_ENGLISH.WTR	->	
- Fuel Files	2	->	
🔽 Adjustments (.ADJ)	Г 3	->	ок
NEAPOLI.ADJ	4	<u> </u>	
₩ Moistures (.FMS)	5	·>	
NEAPOLI.FMS ->	Wind Files (.WND)		Help
	I APOLI_ENGLISH.WND		
	□ 2	->	
NEAFULI.UNV ->	3	->	
Custom Models (.FMD)	4	->	Cancel
<u>></u>	5	<u>></u>	
Coarse Woody (.CWD)	Burn Period (.BPD)		
•		1	

Σχήμα 4-40: Επιμέρους εισαγωγή χαρακτηριστικών της προσομοίωσης – Νεάπολη

Πίνακας 4-16: Μοντέλα καύσιμης ύλης και αντιστοίχησή τους με το Farsite, για την περιοχή της Νεάπολης

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης (Scott-Burgan)	Περιοχή	Περιοχή Περιγραφή			
NB1	Αδιαπέρατη επιφάνεια	Αστική περιοχή, Καλλιέργειες, Γυμνό έδαφος	91		
NB8	Υδάτινη επιφάνεια	Υδάτινη επιφάνεια	98		
GR4	Χορτολίβαδα	Χορτολιβαδικές εκτάσεις έως 0,6μ	104		
SH2	Χαμηλοί θάμνοι	Χαμηλή σκληρόφυλλη βλάστηση έως 0,5μ	142		
SH7	Υψηλοί θάμνοι	Υψηλή σκληρόφυλλη βλάστηση 1 έως 2μ	147		
TU4	Αραιά κωνοφόρα	Αραιή σύσταση κωνοφόρου δάσους 2 έως 5μ	164		
TU5	Πυκνά Κωνοφόρα	Πυκνή σύσταση κωνοφόρου δάσους 7 έως 10μ	165		
TL2	Πλατύφυλλα	Δάσος πλατυφύλλων	182		
Μοντέλο Καύσιμης Ύλης	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 1h (%)	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 10h (%)	Υγρασία Νεκρής Καύσιμης Ύλης 100h (%)	Υγρασία ζωντανής ποώδους (LH) Καύσιμης Ύλης (%)	Υγρασία ζωντανής ξυλώδους (LW) Καύσιμης Ύλης (%)
-----------------------------	---	--	---	--	---
91	3	4	8	0	75
98	3	4	8	0	75
104	3	4	8	0	75
142	3	4	8	0	75
147	3	4	8	0	75
164	3	4	8	0	75
165	3	4	8	0	75
182	3	4	8	0	75

Πίνακας 4-17: Χρονική υστέρηση Μ.Κ.Υ. – Νεάπολη

Πίνακας 4-18: Μετεωρολογικά δεδομένα – Νεάπολη

Ημερομηνία	Ώρα	Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	Ελάχιστη θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη σχετική υγρασία (%)	Ελάχιστη σχετική υγρασία (%)	Ταχύτητα ανέμου (km/h)	Προσανατολισμός ανέμου (μοίρες)
17/7/2015	0:00-0:30	27,3	27,3	51	50	27,4	270
17/7/2015	0:31-01:00	27,3	27,3	51	51	22,5	360
17/7/2015	01:01-01:30	27,2	27,3	51	51	19,3	360
17/7/2015	01:31-02:00	27,3	27,4	50	49	24,1	360
17/7/2015	02:01-02:30	27,3	27,3	49	49	25,7	360
17/7/2015	02:31-03:00	27,3	27,3	49	49	24,1	360
17/7/2015	03:01-03:30	27,3	27,3	49	48	33,8	360
17/7/2015	03:31-04:00	27,3	27,3	49	48	24,1	360
17/7/2015	04:01-04:30	27,3	27,4	48	48	27,4	360
17/7/2015	04:31-05:00	27,5	27,7	47	47	27,4	360
17/7/2015	05:01-05:30	27,8	28,1	46	44	32,2	360
17/7/2015	05:31-06:00	28,2	28,2	44	43	33,8	360

17/7/2015	06:01-06:30	28,4	28,6	44	43	35,4	360
17/7/2015	06:31-07:00	28,8	30,1	43	40	37	360
17/7/2015	07:01-07:30	30,8	33,4	39	35	33,8	360
17/7/2015	07:31-08:00	31,3	33,3	38	35	38,6	360
17/7/2015	08:01-08:30	30,4	30,7	40	38	35,4	360
17/7/2015	08:31-09:00	30,4	30,6	38	37	29	360
17/7/2015	09:01-09:30	30,2	30,5	38	37	29	360
17/7/2015	09:31-10:00	29,7	29,9	42	40	30,6	360
17/7/2015	10:01-10:30	29,3	29,6	42	41	33,8	360
17/7/2015	10:31-11:00	29,4	29,6	38	36	33,8	360
17/7/2015	11:01-11:30	29,2	29,4	38	36	37	360
17/7/2015	11:31-12:00	28,8	28,9	40	40	35,4	360
17/7/2015	12:01-12:30	28,4	28,8	48	41	35,4	360
17/7/2015	12:31-13:00	27,9	28,2	50	47	27,4	360
17/7/15	13:01-13:30	27,3	27,6	56	55	30,6	360
17/7/2015	13:31-14:00	27,2	27,3	57	57	27,4	360
17/7/2015	14:01-14:30	27,3	27,7	54	51	25,7	360
17/7/2015	14:31-15:00	27,2	27,4	55	53	20,9	360
17/7/2015	15:01-15:30	26,8	27	57	56	19,3	360
17/7/2015	15:31-16:00	26,6	26,9	60	56	17,7	360
17/7/2015	16:01-16:30	26,1	26,5	61	60	24,1	315
17/7/2015	16:31-17:00	25,9	25,9	61	60	24,1	22,5
17/7/2015	17:01-17:31	25,6	25,8	62	60	22,5	360
17/7/2015	17:31-18:00	25,1	25,3	66	64	20,9	360
17/7/2015	18:01-18:30	25,1	25,1	66	66	17,7	360
17/7/2015	18:31-19:00	25,1	25,3	65	62	24,1	360
I							1

17/7/2015	19:01-19:30	25,5	25,7	60	59	27,4	360
17/7/2015	19:31-20:00	25,4	25,7	61	56	24,1	360
17/7/2015	20:01-20:30	25,8	26,1	59	54	25,7	360
17/7/2015	20:31-21:00	26	26	56	55	29	360
17/7/2015	21:01-21:30	26,2	27	52	46	12,9	360
17/7/2015	21:31-22:00	26,9	27,1	49	46	16,1	360
17/7/2015	22:01-22:30	26,5	26,6	51	50	12,9	292,5
17/7/2015	22:31-23:00	26,6	26,7	49	47	17,7	315
17/7/2015	23:01-23:30	26,6	26,7	49	48	19,3	337,5
17/7/2015	23:31-24:00	26,4	26,7	50	48	17,7	360

Τα παραπάνω μετεωρολογικά δεδομένα προέκυψαν ύστερα από ανάλυση και προέρχονται από τον μετεωρολογικό σταθμό του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών στο Κάβο Μαλέα Πελοποννήσου (LGB5) (LAT: 36° 28' 32" N, LONG: 23° 06' 05" E), ο οποίος είναι ο εγγύτερος σε συνάρτηση με το συμβάν της πυρκαγιάς. Ο σταθμός βρίσκεται σε υψόμετρο 161μ. Το ύψος των αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας, καθώς και του ανεμομέτρου βρίσκονται στα 2μ. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν την 17^η Ιουλίου 2015 κι έχουν αναλυθεί σε 30λεπτα (30mins) αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 4-41, περιλαμβάνεται ο ορισμός της χρονικής περιόδου που θα λειτουργήσει το μοντέλο για να προσομοιώσει την πυρκαγιά που θα του ορίσουμε. Σύμφωνα με στοιχεία του Ενιαίου Συντονιστικού Κέντρου Επιχειρήσεων του Πυροσβεστικού Σώματος, στη μελέτη περίπτωσης της πυρκαγιάς στη Νεάπολη Λακωνίας, η έναρξη της εντοπίζεται στις 3π.μ. στις 17/07/2015 και η καταστολή στις 11μ.μ. στις 17/07/2015. Επιλέχθηκε χρονικό βήμα ανάλυσης 30 λεπτών και βήμα οπτικοποίησης περιμέτρου ανά μία ώρα. Επίσης η ανάλυση περιμέτρου ορίστηκε στα 60μ και η ανάλυση απόστασης εξάπλωσης στα 40 μέτρα. Το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς προέκυψε επίσης από τα στοιχεία του Πυροσβεστικού Σώματος στο Παγκόσμιο Σύστημα Αναφοράς - WGS84 (36° 31' 33" Ν, 23° 05' 46" Ε) και ορίστηκε στο μοντέλο μέσω σημείου σε shapefile (.shp).

	Conditioning Period	for Fuel Moistures		Time Step
	Conditioning	Starting	Ending	◆ 30.00 min
Month	7	7	1	
Day	17	÷ 17	17	
Hour		300	2300	
Min	-			Frimary C Secondary 1.00 hrs
				Perimeter Resolution
	OK	Help	Cancel	• 60 m
				Distance Resolution
				• 40 m
				Units
				OK Help Cancel @ Metric

Σχήμα 4-41: Χρονική διάρκεια πυρκαγιάς και ρύθμιση παραμέτρων

4.4.2 Δεδομένα εξόδου – Νεάπολη Λακωνίας

Στο Σχήμα 4-42, απεικονίζεται η χωρική προσομοίωση της πυρκαγιάς στη Νεάπολη Λακωνίας. Η εξάπλωση της πυρκαγιάς εμφανίζεται με τη λευκή αραχνώδη υφή. Επίσης εμφανίζεται ένα σχετικό υπόμνημα για την εικόνα της προσομοίωσης, το οποίο περιλαμβάνει με χαρακτηριστικά χρώματα τα Μ.Κ.Υ. όπως έχουν οριστεί στον Πίνακα 4-16 και την περίμετρο της πραγματικής καμένης έκτασης με μαύρο χρώμα, καθώς και το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς με γαλάζιο χρώμα.

Το Σχήμα 4-43 περιλαμβάνει τη τρισδιάστατη (3D) απεικόνιση της χωρικής εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Στην εικόνα αυτή είναι εμφανείς οι αλλαγές του υψομέτρου και των κλίσεων της περιοχής μελέτης.



Σχήμα 4-42: Χωρική προσομοίωση πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος Farsite – Νεάπολη (από 17/07/2015 – 3π.μ. έως 17/07/2015 - 11 μ.μ.)



Σχήμα 4-43: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Νεάπολη

Το Σχήμα 4-44, περιλαμβάνει το διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min), της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m²), καθώς και τιμές μήκους φλόγας από 1m έως 5m. Σύμφωνα με τον Πίνακα 2-1, αντιστοίχησης των τιμών του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες καταστολής μιας πυρκαγιάς (Byram, 1959) και το Σχήμα 2-2, που περιλαμβάνει το διάγραμμα της μεταβολής της ταχύτητας εξάπλωσης ανάλογα με την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας και τις κατηγορίες ανάλογα με τις ενέργειες καταστολής (Rothermel and Andrews, 1982), γίνεται εμφανές, λόγω των κόκκινων κουκίδων του διαγράμματος, ότι η συγκεκριμένη πυρκαγιά ξεπέρασε στην αιχμή της, το 1,5μ μήκος φλόγας. Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη πυρκαγιά μαινόταν ανεξέλεγκτη και χρειάστηκαν πολλές προσπάθειες άμεσης αλλά και έμμεσης προσβολής για να τεθεί υπό έλεγχο και τελικά να κατασταλεί. Η αντιμετώπισή της πραγματοποιήθηκε με υδροφόρα οχήματα, πεζοπόρα τμήματα και εναέρια μέσα αεροπυρόσβεσης. Η μέγιστη ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς, Rate of Spread υπολογίζεται σε ROS=1km/h, μια πραγματικά μεγάλη ταχύτητα εξάπλωσης που μπορεί να προκαλέσει εκρηκτική συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Στην πραγματικότητα η μέση τιμή του ρυθμού εξάπλωσης έφτασε τα 1,3km/h (προσωπική επικοινωνία με Μιλτιάδη Αθανασίου), οπότε ήταν μια πυρκαγιά με εντονότερα χαρακτηριστικά από αυτά προσεγγίζονται μέσω της προσομοίωσης.





Το Σχήμα 4-45, απεικονίζει τη χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ θερμοκρασίας (°F) (μωβ χρώμα) και υγρασίας (%) (μαύρο χρώμα) ανά ώρα, κατά τη χρονική διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Από αυτό το διάγραμμα μπορούμε να αντλήσουμε αρκετά στοιχεία που σχετίζονται με την έναρξη, αλλά και εξέλιξη της πυρκαγιάς. Στο παρακάτω διάγραμμα διαπιστώνουμε πολύ υψηλές τιμές σχετικής υγρασίας σε σχέση με τη θερμοκρασία. Οι τιμές αυτές δεν καθορίζονται ως ιδανικές για το ξέσπασμα και την εξάπλωση μιας δασικής πυρκαγιάς και ενδέχεται να αποτελούν σφάλμα του μετεωρολογικού σταθμού ή εξαιρετικά σπάνια μετεωρολογική συμπεριφορά.



Σχήμα 4-45: Διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας ανά ώρα – Νεάπολη 2015

Στο Σχήμα 4-46, απεικονίζεται το διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Οι τιμές Flaming και Smoldering αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τη τέλεια και την ατελή καύση. Στα Σχήματα 4-47, 4-48 και 4-49 απεικονίζονται άλλα τρία διαγράμματα που εμφανίζουν τις εκπομπές (mg) μεθανίου (CH4), μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και διοξειδίου του άνθρακα (CO2). Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα, παρατηρώντας τα παρακάτω διαγράμματα, να αντληθούν πληροφορίες και τιμές για τη ρύπανση της ατμόσφαιρας από την προσομοίωση της πυρκαγιάς στη συγκεκριμένη περιοχή μελέτης της Νεάπολης Λακωνίας. Παρατηρούμε στα διαγράμματα του μεθανίου και του μονοξειδίου του άνθρακα, ότι οι τιμές της ατελούς καύσης είναι εκθετικά μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις τιμές της τέλειας καύσης.



Σχήμα 4-46: Διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Νεάπολη 2015



Σχήμα 4-47: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μεθανίου (CH4) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Νεάπολη 2015



Σχήμα 4-48: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Νεάπολη 2015



Σχήμα 4-49: Διάγραμμα εκπομπών (mg) διοξειδίου του άνθρακα (CO2) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Νεάπολη 2015

4.4.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων – Νεάπολη Λακωνίας

Στον Πίνακα 4-19, απεικονίζεται η εμβαδομέτρηση των περιοχών της πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοιωμένης έκτασης μετρημένη σε εκτάρια και στρέμματα. Η περιοχή της ταύτισης περιλαμβάνει την ένωση των περιοχών της καμένης έκτασης και της προσομοίωσης. Η υπερεκτίμηση περιλαμβάνει την περιοχή που προσομοιώθηκε από το πρόγραμμα Farsite ότι θα καεί, αλλά στην πραγματικότητα δεν κάηκε. Η υποεκτίμηση αντιστοιχεί στην περιοχή που πραγματικά κάηκε, αλλά δεν προβλέφθηκε ότι θα καεί από την προσομοίωση.

Περιοχή	Εκτάρια (ha)	Στρέμματα
Καμένη έκταση	4982	49820
Προσομοιωμένη έκταση	982	9820
Ταύτιση	969	9690
Υπερεκτίμηση	14	140
Υποεκτίμηση	4013	40130

Πίνακας 4-19: Εμβαδομέτρηση πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοιωμένης έκτασης

Στον Πίνακα 4-20, εμφανίζονται οι δυνάμεις που συνέβαλαν στην κατάσβεση της δασικής πυρκαγιάς στην Κερατέα. Περιληπτικά έλαβαν μέρος 204 άτομα, 96 οχήματα, 2 χωματουργικά μηχανήματα και 5 εναέρια μέσα (1 ελικόπτερο και 4 αεροσκάφη – Α/Φ).

Πίνακας 4-20: Συνολικές δυνάμεις καταστολής της πυρκαγιάς στη Νεάπολη Λακωνίας

ΠΥΡΟΣ.	ПЕΖОПОРА	ΕΘΕΛΟΝΤΕΣ	ΑΛΛΕΣ	ΠΥΡΟΣ.	ОХНМ.	ΒΥΤΙΟ-	MHXANH-	ΕΛΙΚΟ-	Α/Φ	Α/Φ
ΣΩΜΑ	ТМНМАТА		ΔΥΝΑΜΕΙΣ	ΟΧΗΜ.	ОТА	ΦΟΡΑ	MATA	ΠΤΕΡΑ	CL415	CL215
90	41	1	72	42	42	12	2	1	2	2

Στο Σχήμα 4-50, απεικονίζονται χωρικά και γεωγραφικά στην περιοχή μελέτης της Νεάπολης Λακωνίας οι εμβαδομετρημένες εκτάσεις της πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοίωσης. Στην εν λόγω προσομοίωση το ποσοστό ταύτισης της πραγματικής με την προσομοιωμένη καμένη έκταση ανέρχεται σε 19%. Η αδυναμία του μοντέλου Farsite να προβλέψει τη συμπεριφορά της εν λόγω πυρκαγιάς δεν οφείλεται τόσο στην αδυναμία του μοντέλου, καθότι η συγκεκριμένη πυρκαγιά ήταν πυρκαγιά επιφανείας και όχι κόμης, αλλά κυρίως στην εκρηκτική και απρόβλεπτη συμπεριφορά που παρουσίασε λόγω κυρίως των ισχυρότατων εντάσεων ανέμου που έπνεαν στην περιοχή.



Σχήμα 4-50: Αξιολόγηση προσομοίωσης πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος Farsite στην περιοχή Νεάπολη Λακωνίας

5 Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

5.1 Συζήτηση και Περιορισμοί

Το μοντέλο προσομοίωσης και εξάπλωσης πυρκαγιάς Farsite δημιουργήθηκε για να προσομοιώνει προδιαγεγραμμένες πυρκαγιές μεγάλων διαστάσεων. Βασίζεται στο ημιεμπειρικό μοντέλο πρόβλεψης πυρκαγιάς που αναπτύχθηκε από τον Rothermel και βασίζεται στην αρχή διατήρησης της ενέργειας (Rothermel, 1972). Το μοντέλο αυτό παρέχει μια καλή προσέγγιση της ταχύτητας της πυρκαγιάς, αλλά κυρίως μόνο για τις περιοχές που μετρήθηκε και βαθμονομήθηκε. Η διαμόρφωση του μοντέλου βασίστηκε σε πειράματα που έγιναν στο εργαστήριο και οι προσομοιώσεις πραγματεύονταν μικρές πυρκαγιές σε ομογενές πεδίο νεκρών καυσίμων (van Wagtendonk, 1996, Zhou et al, 2005a). Στην πραγματικότητα όμως η καύσιμη ύλη δεν είναι ομοιογενής ούτε περιέχει σταθερό ποσοστό υγρασίας. Το δεδομένο αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα μοντέλα πυρκαγιάς που βασίζονται στις εξισώσεις του Rothermel να αδυνατούν να προσομοιώσουν τη ταχύτητα της πυρκαγιάς με επιτυχία, ιδίως όταν πρόκειται για μεγάλης έκτασης και έντασης πυρκαγιές (Albini & Baughman, 1979, van Wagtendonk, 1996, Andrews & Queen, 2001, Fernandes, 2001, Zhou et al, 2005b). Ίσως για τον παραπάνω λόγο, η χωρική προσομοίωση της πυρκαγιάς στην περιοχή της Νεάπολης Λακωνίας, δεν ήταν επιτυχής. Λόγω της εκρηκτικής και απρόβλεπτης συμπεριφοράς που ανέπτυξε, ιδίως λόγω της ισχυρής έντασης των ανέμων.

Το FARSITE, αν και δεν είναι εφαρμογή ιστού, είναι από τα πιο ευρέως διαδεδομένα συστήματα χωρικής προσομοίωσης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών. Αρχικά αναπτύχθηκε για να υποστηρίξει τη διαχείριση φυσικών προδιαγεγραμμένων πυρκαγιών στις Η.Π.Α. και στη συνέχεια εφαρμόστηκε κατά τον προκατασταλτικό σχεδιασμό και κατά την καταστολή τους. Χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της εξάπλωσης παρελθοντικών πυρκαγιών, αλλά σε περιπτώσεις Μεσογειακών δασικών οικοσυστημάτων, έχει φανεί ότι παρουσιάζει πολλές αδυναμίες κατά την εφαρμογή του εξαιτίας των περιορισμών του (Αθανασίου, 2015).

Η χρήση του μοντέλου Farsite δεν ενδείκνυται σε πυρκαγιές με μεσογειακή βλάστηση λόγω της πολυπλοκότητας των καυσίμων και της κυριαρχίας ζωντανών καυσίμων, ακόμη και κατά τους θερινούς μήνες (Zhou et al, 2005b). Η ακρίβεια των προσομοιώσεων του Farsite στη μεσογειακή βλάστηση είναι μικρή και η βαθμονόμησή του καθίσταται δύσκολη. Ωστόσο, η ακρίβεια των προσομοιώσεων αυξάνεται με την επιλογή των κατάλληλων μοντέλων καύσιμης ύλη και την ακρίβεια των μετεωρολογικών στοιχείων. Επίσης, πολλές

112

φορές νεαρά δενδρύλλια πεύκης συχνά αποτυπώνονται ως θαμνώνες (WWF, 2009). Αυτό είναι σημαντικό γιατί τα νεαρά δενδρύλλια πεύκης έχουν διαφορετική συμπεριφορά στην πυρκαγιά απ' ότι οι θαμνώνες. Είναι γεγονός επίσης, ότι στης μεγάλης έντασης πυρκαγιές η αμιγής κατάσταση της βλάστησης δεν παίζει και το σπουδαιότερο ρόλο, δεδομένου ότι υπερισχύει το είδος της καύσιμης ύλης, η τοπογραφία της περιοχής και τα μετεωρολογικά δεδομένα (Acra et al, 2007).

Η μεταβολή στο πεδίο του ανέμου που προκαλείται από την ίδια τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, τους στροβιλισμούς και την πιθανή εκρηκτική της συμπεριφορά, δεν μπορεί να προβλεφθεί από τα ατμοσφαιρικά μοντέλα πρόβλεψης ανέμου (Albini & Baughman 1979). Επίσης, οι μετεωρολογικοί σταθμοί μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου σε ένα ύψος, το οποίο δεν είναι πάντα σταθερό και όχι στο ύψος της μέσης φλόγας, που είναι περίπου στα 1,7μ. (Ηλιόπουλος, 2013). Στην παρούσα εργασία δεν πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της έντασης του ανέμου στο ύψος της μέσης φλόγας.

Τα σχήματα της πυρκαγιάς δεν μπορούν να αποδοθούν, από το FARSITE, με μεγάλη ακρίβεια σε ασυνεχή καύσιμα (Finney, 1998) και η αξιοπιστία των παραγόμενων αποτελεσμάτων του, εξαρτάται άμεσα από την ακρίβεια της περιγραφής των δασικών καυσίμων (Finney and Ryan, 1995). Συχνά ο χρόνος άφιξης της πυρκαγιάς σε συγκεκριμένα σημεία, δεν μπορεί να προβλεφθεί με ικανοποιητική ακρίβεια από το FARSITE (Stratton, 2006), ενώ οι περιορισμοί που υπεισέρχονται στην πρόβλεψη της εξάπλωσης της πυρκαγιάς εξαιτίας των απλοποιήσεων των μετεωρολογικών δεδομένων, δεν είναι γνωστοί (Finney, 1998).

Το μοντέλο υπολογισμού του ρυθμού εξάπλωσης της ενεργών πυρκαγιών κόμης που δημιουργήθηκε από τον Rothermel (1991a), σύμφωνα με τον ίδιο (Rothermel, 1991b), δεν προσφέρεται για χρήση σε περιοχές διαφορετικές (ως προς τις συνθήκες και τα χαρακτηριστικά) από αυτές για τις οποίες δημιουργήθηκε (Αθανασίου, 2013a). Παρ' όλο που ο Rothermel (1991b) κατηγορηματικά ανέφερε τους περιορισμούς του μοντέλου (Αθανασίου, 2013b), αυτό ενσωματώθηκε στο FARSITE (Finney, 1998), καθώς και σε άλλα συστήματα πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται στις Η.Π.Α.

Όταν η εμπειρική εκτίμηση της συμπεριφοράς και εξέλιξης μιας δασικής πυρκαγιάς είναι αρκετά ακριβής, ώστε να είναι επιτυχής η αντιμετώπιση και καταστολή της, τότε οι προσομοιώσεις της χωρικής εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών δεν μπορούν να προσφέρουν κάτι παραπάνω (Αθανασίου, 2015).

113

Θα πρέπει απαραιτήτως να επισημανθεί ότι με εξαίρεση την προσομοίωση πυρκαγιάς στην περιοχή του Υμηττού, δεν έγινε εφαρμογή πυροσβεστικών εμποδίων, διότι δεν υπήρχαν δεδομένα γι' αυτά. Ωστόσο από τους πίνακες που περιλαμβάνουν τις συνολικές δυνάμεις καταστολής (έμψυχους και άψυχους πόρους), γίνεται εμφανές ότι μια πληθώρα ανθρώπινης δύναμης, οχημάτων και εναέριων μέσων, έλαβαν μέρος στην αντιμετώπιση και καταστολή των πυρκαγιών. Όλες αυτές οι δυνάμεις καταστολής αναντίρρητα επηρέασαν την εξέλιξη, τη συμπεριφορά και την έκταση των δασικών πυρκαγιών σε σχέση με το μοντέλο Farsite που προσομοίωσε τις δασικές πυρκαγιές ελλείψει των ανωτέρω παραγόντων. Συνάγεται λοιπόν ότι ένας ακόμη παράγοντας απόκλισης της ταύτισης της προσομοιωμένης περιοχής με την πραγματική καμένη έκταση οφείλεται στους παραπάνω λόγους.

Η χρήση του μοντέλου Farsite είναι ιδιαιτέρως πολύπλοκη, εργονομικά και λειτουργικά και αυτό καθιστά το μοντέλο αναποτελεσματικό επιχειρησιακά, αφού σε μια δασική πυρκαγιά ο χρόνος μετράει πάντα αντίστροφα. Η μεγάλη χρονοτριβή που χρειάζεται για τη συλλογή, επεξεργασία, ανάλυση, εισαγωγή των δεδομένων και εν τέλει χρήση του μοντέλου, δε συνάδει με τους ρυθμούς των πυροσβεστικών επιχειρήσεων. Επίσης, εκ των ανωτέρω συνάγεται ότι μόνο με μια λεπτομερή συλλογή και ανάλυση των δεδομένων εισόδου θα προκύψουν, υπό συνθήκες, αξιόπιστα αποτελέσματα. Εάν η προαναφερθείσα διαδικασία, λόγω χρονικού περιορισμού, πραγματοποιηθεί όχι με τη δέουσα προσοχή, υπάρχουν πολλές πιθανότητες εξαγωγής μη ασφαλών και παραπλανητικών συμπερασμάτων από το μοντέλο Farsite.

5.2 Χρήσεις – Προοπτικές

Παρ' όλους τους περιορισμούς στη χρήση του, το μοντέλο χωρικής προσομοίωσης πυρκαγιών Farsite έχει αρκετές δυνατότητες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένα και στοχευμένα για ιδιαίτερους σκοπούς. Για παράδειγμα, την εκτίμηση χωρικής εξάπλωσης εικονικών σημειακών πυρκαγιών σε επικίνδυνα σημεία με συγκεκριμένη καύσιμη ύλη και μετεωρολογικά δεδομένα που βασίζονται στους μέσους όρους των τελευταίων ετών για τους πιο επικίνδυνους μήνες (Ιούνιο – Σεπτέμβριο). Αυτές οι εκτιμήσεις θα μπορούσαν να γίνουν σε οποιαδήποτε περιοχή ευθύνης, ατόμων που σχετίζονται με το Πυροσβεστικό Έργο ή εν γένει με τη λειτουργία της Πολιτικής Προστασίας, ιδιαιτέρως κατά τους χειμερινούς μήνες και σε συνδυασμό με συλλογή άλλων πληροφοριών από τοπικούς και όχι μόνο παράγοντες, όπως τις ιδιαίτερες συνθήκες που παρουσιάζει μια περιοχή. Οι εκτιμήσεις αυτές θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν και να βοηθήσουν τον προληπτικό σχεδιασμό αντιμετώπισης των δασικών πυρκαγιών κατά την αντιπυρική περίοδο, όπως για παράδειγμα τη διασπορά των δασικών πυροσβεστικών περιπολικών οχημάτων.

Μια άλλη δυνατότητα που προσφέρει το μοντέλο Farsite, είναι η εκτίμηση της εκπομπής ρύπων (mg), όπως μεθανίου, μονοξειδίου του άνθρακα και διοξειδίου του άνθρακα, από την καύση συγκεκριμένης έκτασης με δεδομένη καύσιμη ύλη. Με αυτό τον τρόπο μπορεί να εκτιμηθεί η επιβάρυνση που συνεισέφερε ή θα συνεισφέρει η εξέλιξη μιας δασικής πυρκαγιάς στο περιβάλλον.

6 Κεφάλαιο 6: Βιβλιογραφικές αναφορές

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

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.

Albini, F.A. (1976a). Estimating wildfire behavior and effects. Gen. Tech. Rep. INT-30. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 92 p.

Alexander M. E. and M. G. Cruz. (2013). Limitations on the accuracy in model predictions of wildland fire behavior: A state-of-the-knowledge overview. The Forestry Chronicle Vol. 89, No 3 May/June 2013.

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

Anderson D.H., Catchpole, E.A., de Mestre N.J., and T. Parkes. (1982). Modelling the spread of grass fires. J. Aust. Math. Soc. B, 23, 451–466.

Anderson H.E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behaviour. USDA Forest Service General Technical Report. INT-122.

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.

Andrews P.L. (1986). BEHAVE. Fire behavior prediction and fuel modelling system. Burn subsystem, USDA Forest Service. Ogden, UT.

Andrews P.L. and C.H. Chase. (1989). BEHAVE: Fire behavior and prediction modeling System—Burn subsystem, Part II. General Technical Report INT-260. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Research Station. 93p.

Andrews P.L., Bevins C.D. and R.C. Seli. (2005). BehavePlus fire modeling system, Version 4.0: User's Guide. General Technical Report RMRS-GTR-106WWW revised. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 132 p.

Andrews P.L., Bevins C.D. and R.C. Seli. (2005). BehavePlus fire modeling system, Version 4.0: User's Guide. General Technical Report RMRS-GTR-106WWW revised. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 132 p. Andrews P.L., Bevins C.D. and R.C. Seli. (2008). BehavePlus fire modeling system, version 4.0: user's guide. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-106WWW Revised. (Fort Collins, CO).

Andrews, P.L. (2009). BehavePlus fire modeling system, version 5.0: Variables. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-213WWW Revised. Fort Collins, CO: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 111 p. http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_gtr213.pdf.

Athanasiou M. and G. Xanthopoulos. (2010). Fire behaviour of the large fires of 2007 in Greece. In proceedings of the 6th 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.

Biswell Z.Z. (1989). Prescribed burning in California wildlands vegetation management. University of California Press.

Brandis K., and Jacobson C. (2003). Estimation of vegetative fuel loads using Landsat TM imagery in New South Wales, Australia. International Journal of Wildland Fire 12 (2), pp1 185-194.

Buckley A.R., M.Gahegan and K.Clarke "GEOGRAPHIC VISUALIZATION", December 1, 2000 http://www.ucgis.org/priorities/research/research_white/ 2000%20Papers / emerging/Geographicvisualization-edit.pdf

Burgan, R.E. and R.C. Rothermel. (1984). BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modelling system—FUEL subsystem. Gen. Tech. Rep. INT-167. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 126 p.

Byram G.M. (1959). Combustion of forest fuels. Forest fire: control and use. McGraw-Hill, pp. 61-89.

Campbell J., Weinstein D., and Finney M. (1995). Forest fire behavior modeling intergrating GIS and BEHAVE Analysis in support of ecosystem management: Analysis Workshop III, Forest service, Ecosystem management Analysis Center, pp. 184.

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.

Cheney N,P, and J.S. Gould. (1997). Fire growth and acceleration. International Journal of Wildland Fire 7, 1-5.

Chuvieco E., Riano D., Aguado I., and Cocero D. (2002). Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: applications in fire danger assessment. International Journal of Remote Sensing 23(11), pp. 2145-2162.

Chuvieco E., Riano D., Van Wagtendok J., and Morsdof F. (2003). Fuel loads and fuel type mapping. Wildland fire danger estimation and mapping. The role of remote sensing dat. World Scientific, Singapore 4, pp. 119-142.

Darmawan M., Masamu A., and Satoshi T. (2001). Forest fire hazard model using remote sensing and geographic information systems: toward understanding of land and forest degradation in lowland areas of East Kalimantan, Indonesia "Paper presented at the 22nd asian Conference on remote Sensing", pp. 9.

Deeming J.E., Lancaster J.W. Fosberg M.A., Furman R.W. and M.J. Schroeder. (1972). The National Fire Danger Rating System, Report No. RM-84. USDA, Forest Service,, Ogden, UT.

Dimitrakopoulos A.P. (2002). "Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece", International Journal of Wildland Fire 11(2) 127 – 130.

European Environment Agency. (2007). *Environmental Statement*. Official Publications of the European Communities, Denmark.

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.A. (1998). FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation. Res. Pap. RMRS-RP-4, Ogden, UT: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.

Flores-Garnica J., and Omi P. (2003). Mapping forest fuels for spatial fire behavior simulations using geomatic strategies. AGROCIENCA 34 (1), pp. 66.

Hardwick P., lachowski H., Forbes J., Olson R., Roby K., and Fites J. (1998). Fuel loading and risk assessment for Lassen national Forest. Proceedings of the 7th Forest Service Remote sensing applications conference. Nassau Bay, Texas, pp. 6-10.

Hyyppa J., Hyyppa H., Inkinen M., Engdahl M., Linko S., and Zhu Y. (2000). Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. Forest Ecology Management 128 (1-2), pp. 109-120.

Jia G., Bruke I., Kaufman M., Goetz A., Kindel B., and Pu Y. (2006b). Estimates of forest canopy fuel attributes using hyperspectral data. Forest Ecology and management 229 (1-3), pp. 27-38.

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.

Kourtz P. (1977). An application of Landsat digital technology to forest fire fuel type mapping. 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment. pp. 1111-1115.

Koutsias K., and Karteris M. (2003). Classification analyses of vegetation for delineating forest fire fuel complexes in a Mediterranean test site using satellite

remote sensing and GIS. International Journal of Remote Sensing 24 (15), pp. 3093-3104.

Lasaponara R., and Lanorte A. (2006), Multispectral fuel type characterization based on remote sensing data and Prometheus model. Forest Ecology and Management 234, pp. 226.

McArthur, A.G. (1969). The Tasmanian bushfires of 7th February, 1967, and associated fire behaviour characteristics. In The Technical Co-operation Programme. Mass Fire Symposium (Canberra, Australia1969) v. I. 23 p. Maribyrnong, Victoria: Defence Standards Laboratories.

Moser, C. (1996). Confronting Crisis: A Comparative Study of Household Responses To Poverty And Vulnerability in Four Urban Communities. *ESD*, Washington.

Pyne S.J., Andrews P.L. and R.D. Laven. (1996). Introduction to Wildland Fire, 2nd edition. John Wiley & Sons, Inc., New York.

Riano D., Chuvieco E., Salas J., Palacios-Orueta A., and Bastarrika A. (2002). Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. Canadian Journal of forest Research 32 (8), pp. 1301-1315.

Roberts D., Dennison P., Gardner M., Hetzel Y., Ustin S., and Lee C. (2003). Evaluation of the potential of Hyperion for fire danger assessment by comparison to the airbone Visible/Infrared Imaging Spectrometer. IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing 41 (6), pp. 1297-1310.

Roberts D., Gardner M., Church R., Ustin S., Scheer G., and Green R. (1998). Mapping chaparral in the Santa monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models. Remote Sensing of Environment 65 (3), pp. 267-279.

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., and Andrews P.L., (1982). Charts for interpreting wildland fire behavior characteristics. USDA Forest Service, General Technical Report INT-131.

Rothermel, R.C. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires. Gen. Tech. Rep. INT-143. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 161 p.

Rothermel, R.C. (1991a). Predicting behaviour and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. Res. Pap. INT–438. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Research Station.

Rothermel, R.C. (1991b). Crown fire analysis and interpretation, pp.253-263. In: Andrews P.I., Potts D.F., (eds.), Proceedings of the 11th Conference on Fire and Forest Meteorology. Society of American Foresters, Missoula, Montana, USA. 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.

Salas J., and Chuvieco E. (1994). Geographic information systems for wildland fire risk mapping. Wildfire 3(2), pp. 7-13

Schroeder M.J. and C.C. Buck. (1970). Fire weather. A guide to application of meteorological information to forest fire control operations. Agric. Handb. 360. Washington, DC: USDA, Forest Service. 229 p.

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, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, pp. 72.

Stratton, R.D. (2006). Guidance on Spatial Wildland Fire Analysis: Models, Tools, and Techniques, General Technical Report. RMRS-GTR-183. Fort Collins, CO: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 15 p.

Sullivan, A.L. (2009d). Improving operational models of fire behavior. 18th World IMACS / MODSIM Congress, Cairns, Australia 13-17 July 2009. http://mssanz.org.au/modsim09

Toutin T., and Amaral S. (2000). Stereo RADARSAT data for canopy height in Brazilian forests. Canadian Journal of Remote Sensing 26 (3), pp. 189-199.

Turner, D. P., Koerper, G. J., Harmon, M. E. & Lee, J. J. (1995). A carbon budget for forests of the conterminous United States. *Ecol. Applications*, 5, pp 421–436.

Van Wagner, C. E. (1985). Fire behavior modelling - how to blend art and science. In proceedings of the 8th National Conference on Fire and Forest Meteorology, April 29-May 2, 1985, Detroit, Michigan, USA. Society of American Foresters, Washington, DC, USA. p. 3-5.

Van Wagtendonk J. (1997). Use of thematic mapper imagery to map fuel models. Proceedings of the 13th Conf. Fire and Forest Meteorology. International Association of Wildland Fire, Lorne, Australia.

Van Wagtendonk J., and Root R. (2003). The use of multi-temporal Landsat Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data for mapping fuel models in Yosemite National park, USA. International Journal of Remote Sensing 24 (8), pp. 1639-1651.

Van Wagtendonk J.W. (1996). Use of a Deterministic Fire Growth Model to Test Fuel Treatments. In "Sierra Nevada Ecosystem Project: Final Report to Congress". University of California – Davis, Wildland Resources Center Report 37, Vol. II, Ch. 43.

Velez, R. (2000). La defensa contra incendios forestales—Fundamentos y experiencias. McGraw Hill/Interamericana de España: Madrid, Spain, (In Spanish).

Viegas, D.X. (2006). Parametric study of an eruptive fire behaviour model. International Journal of Wildland Fire 15(2) 169-177.

Wimberly M., Ohman J., Pierce K., Gregory M., and Fried J. (2003). A multivariate approach to mapping forest vegetation and fuels using GIS databases, satellite imagery, and forest inventory plots. Proceedings of the Second International Wildland Fire Ecology and fire Management Congress.

WWF Ελλάς. (2009). Πυρκαγιά της Β.Α. Αττικής – Αύγουστος 2009: Αλλαγές στην κάλυψη γης του Νομού και οικολογικός απολογισμός της φωτιάς. WWF Ελλάς , Αθήνα, 48 σελ.

Yool S., Eckhardt D., Estes J., and Cosentino M. (1985). Describing the brushfire hazard in Southern California. Annals of the Association of American Geographers, 75 (3), pp. 417-430.

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, pp. 183–198.

Zhou X., Weise D., and Mahalingamn S. (2005*b*). Experimental measurements and numerical modelling of marginal burning in live chaparral fuel beds. Proceedings of the Combustion Institute 30, pp. 2287–2294.

Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

Αθανασίου Μ. (2013α). Μελέτη και επιχειρησιακό σχέδιο για την πρόληψη πυρκαγιών για την περιοχή GR2330005 του Ευρωπαϊκού οικολογικού δικτύου Natura 2000 στην Ηλεία, Έργο Interreg IV "NAT-PRO", Αναπτυξιακή Εταιρεία Περιφέρειας Δυτικής Ελλάδος Α.Ε. Ο.Τ.Α., Σελ. 175.

Αθανασίου Μ. (2013β). Μελέτη και επιχειρησιακό σχέδιο για τη διαχείριση των δασικών πυρκαϊών στη Ζάκυνθο, Έργο Interreg IV "NAT-PRO", Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων, Σελ. 153.

Αθανασίου Μ. και Ξανθόπουλος Γ. (2009). Η συμπεριφορά των μεγάλων δασικών πυρκαγιών του 2007 στην Ελλάδα. Σελ. 591-602. Στα πρακτικά του 14ου Πανελλήνιου Δασολογικού Συνεδρίου, 1-4 Νοεμβρίου 2009, Πάτρα. Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, Θεσσαλονίκη. 1101 σελ.

Αθανασίου Μ. (2015). Συμβολή στην επιλογή της καλύτερης μεθόδου πρόβλεψης της συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών για την Ελλάδα. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και καποδιστριακό πανεπιστήμιο Αθηνών.

Αργιαλάς Δ. και Τζώτσος Α. (2007). Αντικειμενοστραφής Ανάλυση Εικόνας στην Τηλεπισκόπηση. Θεωρία και Εφαρμογές, ΤΕΕ: Τηλεπισκόπηση Εξελίξεις και Εφαρμογές. Αργιαλάς Δ. (1999). Φωτοερμηνεία-Τηλεπισκόπηση, Διδακτικές Σημειώσεις ΣΑΤΜ, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα 1999.

Ηλιόπουλος Ν. (2013). Πυρο-μετεωρολογία, πυρκαγιές και κλιματική αλλαγή. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Μετσόβιο Κέντρο Διεπιστημονικής Έρευνας (ΜΕ.Κ.Δ.Ε.) του Ε.Μ.Π. για την προστασία και ανάπτυξη του ορεινού περιβάλλοντος και των τοπικών Ευρωπαϊκών πολιτισμών. Ανακτήθηκε στις 22 Φεβρουαρίου 2017 από <u>http://www.ntua.gr/MIRC/</u>

Μιχελάκης Δ., Viergener K., Stuart N., (2008). Χρήση δορυφορικών εικόνων υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας ΙΚΟΝΟS και αντικειμενοστρεφών μεθόδων για την αυτοματοποίηση ταξινόμησης δασών χαμηλής πυκνότητας.

Ξανθόπουλος, Γ. (1990). Δυνατότητες πρόβλεψης συμπεριφοράς της πυρκαγιάς στα δάση της Ελλάδας. Σελ. 199-203. Στα πρακτικά του Πανελληνίου Συνεδρίου της Ελληνικής Δασολογικής Εταιρείας, με θέμα "Δασοπονία και Περιφερειακή Ανάπτυξη", 7-9 Νοεμβρίου 1990, Καρπενήσι. 417 σελ.

Παρουσίαση της αποστολής, του έργου και των δραστηριοτήτων του ΜΕ.Κ.Δ.Ε. του Ε.Μ.Π. Ανακτήθηκε στις 22 Φεβρουαρίου 2017 από http://www.ntua.gr/MIRC/mekde/mekde.pps

Πουλάκη Π., (2016). Χαρτογράφηση καύσιμης ύλης με Αντικειμενοστρεφή Ανάλυση Εικόνας για χρήση στο μοντέλο δασικής πυρκαγιάς Farsite. Μελέτη Περίπτωσης: Πυρκαγιά Πλωμαρίου, Λέσβου 1994. Μεταπτυχιακή διπλωματική Εργασία, Δ.Π.Μ.Σ. Περιβάλλον και Ανάπτυξη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Ρούσσου Ν., (2009). Χαρτογράφηση και Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση Καύσιμης Ύλης για Διαχείριση Πυρκαγιών με Χρήση Δορυφορικών Εικόνων Υψηλής Ανάλυσης και Εργαλείων Γεωπληροφορικής.

Στεργιόπουλος Ι. (2010). Χαρτογράφηση της δασικής καύσιμης ύλης με μεθόδους Τηλεπισκόπησης και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Ανακτήθηκε	στις	22	Φεβρουαρίου	2017	από
http://www.pancro	ma.com/Lar	ndsat%208	%20Multispectral%20/	Analysis.html	
Ανακτήθηκε	στις	22	Φεβρουαρίου	2017	από
https://directory.eo	portal.org/v	veb/eopor	tal/satellite-missions/	l/landsat-8-ld	<u>cm</u>
Ανακτήθηκε	στις	22	Φεβρουαρίου	2017	από
https://www.resear	chgate.net/	figure/285	590797_fig8_Fig-8-Gra	aphical-histor	<u>y-of-</u>
the-past-and-planne	ed-Landsat-s	series-of-sa	itellites-Source		

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Η ανατομία μιας δασικής πυρκαγιάς (Πηγή: Alexander, 2000)5
Σχήμα 2-2: Διάγραμμα της μεταβολής της ταχύτητας εξάπλωσης ανάλογα με την
εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας και τις κατηγορίες ανάλογα με τις
ενέργειες καταστολής (Rothermel & Andrews, 1982)7
Σχήμα 2-3: Διαχρονική και μελλοντική εξέλιξη των δορυφόρων Landsat (Πηγή:
https://www.researchgate.net/, 2017) 14
Σχήμα 2-4: Δορυφόρος Landsat 8 (Πηγή: https://directory.eoportal.org/, 2017) 16
Σχήμα 3-1: Μ.Κ.Υ. GR4 – Χορτολίβαδα25
Σχήμα 3-2: Μ.Κ.Υ. SH2 – Χαμηλοί θάμνοι
Σχήμα 3-3: Μ.Κ.Υ. SH7 – Υψηλοί θάμνοι
Σχήμα 3-4: Μ.Κ.Υ. ΤU4 – Αραιά κωνοφόρα
Σχήμα 3-5: Μ.Κ.Υ. ΤU5 – Πυκνά κωνοφόρα
Σχήμα 3-6: Μ.Κ.Υ. ΤU1 – Ελαιώνες
Σχήμα 3-7: Εικόνα Landsat 8 OLI – 06/07/2014 – Κερατέα Αττικής
Σχήμα 3-8: Εικόνα Landsat 8 OLI – 01/04/2014 – Μαλεσίνα Αταλάντης
Σχήμα 3-9: Εικόνα Landsat 8 OLI – 09/07/2015 – Υμηττός Αττικής
Σχήμα 3-10: Εικόνα Landsat 8 OLI – 09/07/2015 – Νεάπολη Λακωνίας 30
Σχήμα 3-11: Εισαγωγή των κατάλληλων επιπέδων για τη δημιουργία του
έγχρωμου σύνθετου και επιλογή περιοχής ενδιαφέροντος
Σχήμα 3-12: Εικόνα της περιοχής μελέτης – Νεάπολη Λακωνίας
Σχήμα 3-13: Απεικόνιση με το συνδυασμό: Εγγύς υπέρυθρο – Μέσο υπέρυθρο -
Ερυθρό
Σχήμα 3-14: Κατάτμηση εικόνας με Scale parameter: 75, Shape: 0.1 και
Compactness: 0.1
Σχήμα 3-15: Επιλογή περιοχών εκπαίδευσης

Σχήμα 3-16: Ταξινόμηση περιοχής μελέτης	36
Σχήμα 3-17: Αξιολόγηση ταξινόμησης με τη διαδικασία Error Matrix base	ed on
Samples	37
Σχήμα 3-18: Δημιουργία μεταβλητής Min_NDVI_platyfylla	40
Σχήμα 3-19: Τρόπος δημιουργίας κανονικοποιημένων δεικτών NDVI σε διάσ	τημα
0-100	41
Σχήμα 3-20: Εφαρμογής κανόνα μητρικής κατηγορίας (0,5-0,7)	42
Σχήμα 3-21: Εφαρμογή κανόνα διαστημάτων βαθμού συγκόμωσης	43
Σχήμα 3-22: Βαθμός συγκόμωσης – Πλατύφυλλα	43
Σχήμα 3-23: Βαθμός συγκόμωσης – Αραιά κωνοφόρα	44
Σχήμα 3-24: Βαθμός συγκόμωσης – Πυκνά κωνοφόρα	44
Σχήμα 3-25: Συνολικά επίπεδα ταξινομήσεων (1°, 2°, 3°)	45
Σχήμα 3-26: Εφαρμογή κανόνα κατηγορίας (0,5-0,7)	46
Σχήμα 3-27: Τελική απεικόνιση συνολικού βαθμού συγκόμωσης της δενδρώ	δους
καύσιμης ύλης	47
Σχήμα 3-28: Καμένη έκταση – Κερατέα (SWIR2-NIR-RED)	48
Σχήμα 3-29: Καμένη έκταση – Μαλεσίνα Αταλάντης (SWIR2-NIR-RED)	48
Σχήμα 3-30: Καμένη έκταση – Υμηττός (SWIR2-NIR-RED)	49
Σχήμα 3-31: Καμένη έκταση – Νεάπολη Λακωνίας (SWIR2-NIR-RED)	49
Σχήμα 3-32: Εικόνα υψομέτρου – Νεάπολη Λακωνίας	50
Σχήμα 3-33: Εικόνα κλίσεων γης – Νεάπολη Λακωνίας	51
Σχήμα 3-34: Εικόνα προσαντολισμού πρανών – Νεάπολη Λακωνίας	51
Σχήμα 3-35: Διάγραμμα ροής της άντλησης, επεξεργασίας, εισαγωγήα	ς και
εξαγωγής των δεδομένων από το πρόγραμμα Farsite	53
Σχήμα 4-1: Εισαγωγή χαρακτηριστικών τοπίου – Κερατέα	55

Σχήμα 4-2: Επιμέρους εισαγωγή χαρακτηριστικών της προσομοίωσης – Κερατέα
Σχήμα 4-3: Χρονική διάρκεια πυρκαγιάς και ρύθμιση παραμέτρων58
Σχήμα 4-4: Χωρική προσομοίωση πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος Farsite
στην περιοχή της Κερατέας (από 12/07/2014 - 3μ.μ. έως 14/07/2014 - 12 μ.μ.) 59
Σχήμα 4-5: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Κερατέα 2014 60
Σχήμα 4-6: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/ m²) – Κερατέα 201461
Σχήμα 4-7: Διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας ανά ώρα – Κερατέα 2014 62
Σχήμα 4-8: Διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Κερατέα 201463
Σχήμα 4-9: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μεθανίου (CH4) ανάλογα με το χρονικό
βήμα της προσομοίωσης – Κερατέα 201463
Σχήμα 4-10: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ανάλογα
με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Κερατέα 201464
Σχήμα 4-11: Διάγραμμα εκπομπών (mg) διοξειδίου του άνθρακα (CO2) ανάλογα
με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Κερατέα 201464
Σχήμα 4-12: Δυναμική λειτουργία του προγράμματος Farsite στην Κερατέα
Αττικής 2014
Σχήμα 4-13: Αξιολόγηση προσομοίωσης πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος
Farsite στην περιοχή της Κερατέας67
Σχήμα 4-14: Εισαγωγή χαρακτηριστικών τοπίου – Μαλεσίνα Αταλάντης 69
Σχήμα 4-15: Επιμέρους εισαγωγή χαρακτηριστικών της προσομοίωσης —
Μαλεσίνα Αταλάντης
Σχήμα 4-16: Χρονική διάρκεια πυρκαγιάς και ρύθμιση παραμέτρων

Σχήμα 4-17: Χωρική προσομοίωση πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος
Farsite στην περιοχή της Μαλεσίνα Αταλάντης (από 26/06/2014 - 1μ.μ. έως
29/06/2014 - 4 μ.μ.)
Σχήμα 4-18: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Αταλάντη 2014 75
Σχήμα 4-19: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της
εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/ m²) – Αταλάντη 2014
Σχήμα 4-20: Διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας ανά ώρα – Αταλάντη 2014. 77
Σχήμα 4-21: Διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό
βήμα της προσομοίωσης – Αταλάντη 201478
Σχήμα 4-22: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μεθανίου (CH4) ανάλογα με το χρονικό
βήμα της προσομοίωσης – Αταλάντη 201478
Σχήμα 4-23: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ανάλογα
με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Αταλάντη 2014
Σνόμα 4.24: Διάνοαμμα ακπομπένι (ma) διοξοιδίου του άνθοακα (CO2) ανάλουα
με το χρονικό βήμα της προσομοιώσης – Αταλάντη 2014
Σχήμα 4-25: Αξιολόγηση προσομοίωσης πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος
Farsite στην περιοχή της Μαλεσίνας Αταλάντης81
Σχήμα 4-26: Εισαγωγή χαρακτηριστικών τοπίου – Υμηττός
Σχήμα 4-27: Επιμέρους εισαγωγή χαρακτηριστικών της προσομοίωσης – Υμηττός
Σχήμα 4-28: Χρονική διάρκεια πυρκαγιάς και ρύθμιση παραμέτρων
Σχήμα 4-29: Χωρική προσομοίωση πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος
Farsite – Υμηττός (από 17/07/2015 - 12μ.μ. έως 17/07/2015 - 11 μ.μ.) – χωρίς
πυροσβεστικό εμπόδιο
Σχήμα 4-30: Χωρική προσομοίωση πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος
Farsite – Υμηττός (από 17/07/2015 - 12μ.μ. έως 17/07/2015 - 11 μ.μ.) – με

Σχήμα 4-31: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Υμηττός 2015 90

Σχήμα 4-32: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της
εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/ m²) – Υμηττός 2015
Σχήμα 4-33: Διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας ανά ώρα – Υμηττός 2015 92
Σχήμα 4-34: Διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό
βήμα της προσομοίωσης – Υμηττός 201593
Σχήμα 4-35: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μεθανίου (CH4) ανάλογα με το χρονικό
βήμα της προσομοίωσης – Υμηττός 201593
Σχήμα 4-36: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ανάλογα
με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Υμηττός 201594
Σχήμα 4-37: Διάγραμμα εκπομπών (mg) διοξειδίου του άνθρακα (CO2) ανάλογα
με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Υμηττός 201594
Σχήμα 4-38: Αξιολόγηση προσομοίωσης πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος
Farsite στην περιοχή του όρους Υμηττός96
Σχήμα 4-39: Εισαγωγή χαρακτηριστικών τοπίου – Νεάπολη
Σχήμα 4-40: Επιμέρους εισαγωγή χαρακτηριστικών της προσομοίωσης —
Νεάπολη
Σχήμα 4-41: Χρονική διάρκεια πυρκαγιάς και ρύθμιση παραμέτρων103
Σχήμα 4-42: Χωρική προσομοίωση πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος
Farsite – Νεάπολη (από 17/07/2015 – 3π.μ. έως 17/07/2015 - 11 μ.μ.)104
Σχήμα 4-43: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Νεάπολη105
Σχήμα 4-43: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Νεάπολη105 Σχήμα 4-44: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της
Σχήμα 4-43: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Νεάπολη105 Σχήμα 4-44: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/ m²) – Νεάπολη 2015106
Σχήμα 4-43: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Νεάπολη105 Σχήμα 4-44: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m ²) – Νεάπολη 2015106 Σχήμα 4-45: Διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας ανά ώρα – Νεάπολη 2015.107
Σχήμα 4-43: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Νεάπολη105 Σχήμα 4-44: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/m ²) – Νεάπολη 2015106 Σχήμα 4-45: Διάγραμμα θερμοκρασίας – υγρασίας ανά ώρα – Νεάπολη 2015.107 Σχήμα 4-46: Διάγραμμα εκλυόμενης θερμότητας (GJ) ανάλογα με το χρονικό
Σχήμα 4-43: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Νεάπολη
Σχήμα 4-43: Τρισδιάστατη χωρική απεικόνιση πυρκαγιάς – Νεάπολη105 Σχήμα 4-44: Διάγραμμα ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (m/min) και της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (kJ/ m ²) – Νεάπολη 2015

Σχήμα 4-48: Διάγραμμα εκπομπών (mg) μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ανάλογα
με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Νεάπολη 2015109
Σχήμα 4-49: Διάγραμμα εκπομπών (mg) διοξειδίου του άνθρακα (CO2) ανάλογα
με το χρονικό βήμα της προσομοίωσης – Νεάπολη 2015109
Σχήμα 4-50: Αξιολόγηση προσομοίωσης πυρκαγιάς με χρήση του προγράμματος
Farsite στην περιοχή Νεάπολη Λακωνίας111

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2-1: Αντιστοίχηση των τιμών του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες καταστολής μιας πυρκαγιάς (Byram, 1959) 6
Πίνακας 2-2: Τa 13 Μ.Κ.Υ. από τους Andrews (1986) και Kalabokidis (2004) 10
Πίνακας 2-3: Τa 7 Μ.Κ.Υ. από τον Dimitrakopoulos (2002)
Πίνακας 2-4: Τα 40 Μ.Κ. Υ. των Scott & Burgan (2005)
Πίνακας 2-5: Ιστορικά και τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφόρων Landsat (Πηγή: Φράγκου, 2016)14
Πίνακας 2-6: Κανάλια του δορυφόρου Landsat 8 και τα χαρακτηριστικά τους 15
Πίνακας 3-1: Μοντέλα Καύσιμης Ύλης
Πίνακας 4-1: Μοντέλα καύσιμης ύλης και αντιστοίχησή τους με το Farsite, για την περιοχή της Κερατέας
Πίνακας 4-2: Χρονική υστέρηση Μ.Κ.Υ. – Κερατέα
Πίνακας 4-3: Μετεωρολογικά δεδομένα – Κερατέα
Πίνακας 4-4: Εμβαδομέτρηση πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοιωμένης έκτασης
Πίνακας 4-5: Συνολικές δυνάμεις καταστολής της πυρκαγιάς στην Κερατέα Αττικής
Πίνακας 4-6: Μοντέλα καύσιμης ύλης και αντιστοίχησή τους με το Farsite, για την περιοχή της Μαλεσίνας Αταλάντης
Πίνακας 4-7: Χρονική υστέρηση Μ.Κ.Υ. – Αταλάντη
Πίνακας 4-8: Μετεωρολογικά δεδομένα – Αταλάντη
Πίνακας 4-9: Εμβαδομέτρηση πραγματικής καμένης έκτασης και της προσομοιωμένης έκτασης
Πίνακας 4-10: Συνολικές δυνάμεις καταστολής της πυρκαγιάς στη Μαλεσίνα Αταλάντης
Πίνακας 4-11: Μοντέλα καύσιμης ύλης και αντιστοίχησή τους με το Farsite, για την περιοχή του Υμμητού
Πίνακας 4-12: Χρονική υστέρηση Μ.Κ.Υ. – Υμηττός

Πίνακας 4-13: Μετεωρολογικά δεδομένα – Υμηττός
Πίνακας 4-14: Εμβαδομέτρηση πραγματικής καμένης έκτασης και τη προσομοιωμένης έκτασης
Πίνακας 4-15: Συνολικές δυνάμεις καταστολής της πυρκαγιάς στον Υμηττό 9!
Πίνακας 4-16: Μοντέλα καύσιμης ύλης και αντιστοίχησή τους με το Farsite, για την περιοχή της Νεάπολης
Πίνακας 4-17: Χρονική υστέρηση Μ.Κ.Υ. – Νεάπολη
Πίνακας 4-18: Μετεωρολογικά δεδομένα – Νεάπολη
Πίνακας 4-19: Εμβαδομέτρηση πραγματικής καμένης έκτασης και τη προσομοιωμένης έκτασης110
Πίνακας 4-20: Συνολικές δυνάμεις καταστολής της πυρκαγιάς στη Νεάπολη Λακωνίας