



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
*Πολυτεχνική Σχολή*

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΜΕ  
ΤΟ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ WRF-FIRE

ΓΚΟΓΚΙΑΣΒΙΛΙ ΤΕΑ

ΑΕΜ 1623

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΡΑΦΑΕΛΛΑ - ΕΛΕΝΗ  
ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΚΟΖΑΝΗ 2019



**Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
*Πολυτεχνική Σχολή*

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΕΞΑΠΛΩΣΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ ΜΕ  
ΤΟ ΠΡΟΓΝΩΣΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ WRF-FIRE

ΓΚΟΓΚΙΣΒΙΛΙ ΤΕΑ

ΑΕΜ 1623

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ: ΡΑΦΑΕΛΛΑ – ΕΛΕΝΗ  
ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ

## **A. Περίληψη**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας με τίτλο ‘Πρόβλεψη επικινδυνότητας και εξάπλωσης πυρκαγιάς με το προγνωστικό σύστημα WRF-FIRE.’, είναι η προσομοίωση μιας πραγματικής πυρκαγιάς που έλαβε χώρα στην Καλιφόρνια το 2018.

Αρχικά, έγινε συλλογή των όλων απαραίτητων δεδομένων ώστε να καταστεί δυνατόν να τρέξουν όλα τα προγράμματα του WPS, που αποτελεί το σύστημα προεπεξεργασίας του WRF-FIRE. Στη συνέχεια, έγινε η επεξεργασία τους και η κατάλληλη τροποποίηση τους, με τη μεθοδολογία που θα περιγραφεί στη συνέχεια. Τέλος έγινε εκτέλεση του WRF-FIRE.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το σύστημα δόθηκαν σε ένα αρχείο με δεδομένα της μορφής netCDF. Η επεξεργασία και οπτικοποίηση των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση των προγραμμάτων Matlab και IDV.

## **B. Abstract**

The purpose of the following thesis, 'Forecast of fire hazard and spread with the forecasting system WRF-Fire.', is the simulation of an actual fire that took place in California during 2018.

First step of the simulation is to obtain the necessary data in order to run all the programs of WPS, which consist the WRF Preprocessing System. Subsequently, the data were processed and modified, according to the methodology which will be described flowingly. Ultimately,

The results which emerged by the system, were included in a data file with netCDF format. The procession and visualization of the results was accomplished by utilizing Matlab and IDV programs.

## **C. Ευχαριστίες**

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους στάθηκαν δίπλα μου στη διάρκεια της φοιτητικής μου πορείας. Αρχικά ευχαριστώ την οικογένειά μου, που μου παρείχε στήριξη και συμπαράσταση όποτε το είχα ανάγκη. Επίσης τους καθηγητές του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας για την πληθώρα των γνώσεων που μου πρόσφεραν. Τέλος ευχαριστώ τη διδάσκουσα και επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας κυρία Ραφαέλλα Σωτηροπούλου, καθώς και τον κύριο Ιωάννη Στεργίου για τις συμβουλές και την καθοδήγησή τους.

## Περιεχόμενα

A.	Περίληψη.....	3
B.	Abstract .....	4
C.	Ευχαριστίες.....	5
1.	Εισαγωγή .....	8
2.	Πυρκαγιά .....	9
I.	Εξάπλωση .....	10
II.	Φυσικές Ιδιότητες .....	11
III.	Επιπτώσεις.....	12
IV.	Μοντελοποίηση πυρκαγιάς .....	13
V.	Κατηγορίες μοντέλων.....	14
3.	Περιγραφή του μοντέλου.....	15
VI.	Μοντέλο WRF.....	15
VII.	WRF-FIRE .....	16
VIII.	WPS.....	17
IX.	Geogrid .....	19
X.	Ungrib .....	19
XI.	Metgrid.....	20
4.	Μεθοδολογία .....	21
XII.	Διαμόρφωση της περιοχής.....	21
XIII.	Λήψη δεδομένων για το Geogrid.....	22
XIV.	Κατηγορίες καυσίμων Anderson.....	23
XV.	Μετατροπή αρχείων Geotiff .....	26
XVI.	Εκτέλεση του Geogrid .....	26
XVII.	Λήψη ατμοσφαιρικών δεδομένων[17] .....	26
XVIII.	Εκτέλεση του Ungrib .....	27
XIX.	Vtables.....	27

XX.	Εκτέλεση του Metgrid .....	28
XXI.	Εκτέλεση του WRF.....	28
XXII.	Έναρξη προσομοίωσης από περίμετρο.....	29
5.	Πραγματική πυρκαγιά.....	30
XXIII.	Holy Fire.....	30
XXIV.	Προσομοίωση.....	32
6.	Αποτελέσματα .....	36
XXV.	Ιδιότητες του εδάφους.....	36
XXVI.	Αποτελέσματα της πυρκαγιάς.....	39
7.	Σχολιασμός .....	47
XXVII.	Βιβλιογραφία.....	49

## 1. Εισαγωγή

Μια πυρκαγιά αποτελεί μια πολύπλοκη διεργασία, η οποία επηρεάζεται από μη-γραμμικές, πολλαπλής κλίμακας αλληλεπιδράσεις με άλλες διεργασίες της γης. Ενώ η κλίμακα στις ατμοσφαιρικές διεργασίες ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος του υπό μελέτη συστήματος, οι χημικές αντιδράσεις που σχετίζονται με τη θερμική διάσπαση και ανάφλεξη του καυσίμου λαμβάνουν χώρα σε επίπεδο εκατοστών και σε χρονικό διάστημα δευτερολέπτων. Ταυτόχρονα, μια πυρκαγιά μπορεί να προκαλέσει ακραία καιρικά φαινόμενα. Ο καιρός είναι ο κύριος εξωτερικός παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς και υπάρχει μεταξύ τους αμφίδρομη ελληλεπίδραση, λόγω της οποίας είναι γνωστό πως οι πυρκαγιές επηρεάζουν τις καιρικές συνθήκες στο κοντινό τους περιβάλλον. Μια πυρκαγιά αλληλεπιδρά με τη δυναμική της ατμόσφαιρας μέσω υδρατμών και θερμότητας, αλλά και με το έδαφος μέσω της υγρασίας και διατήρησης θερμότητας.

Η διαδικασία της προσομοίωσης πυρκαγιάς στοχεύει στην αναπαράσταση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς και τα αποτελέσματά της. Ως συμπεριφορά, θεωρούνται ο ρυθμός εξάπλωσής της, ο ρυθμός παραγωγής θερμότητας (που σχετίζεται με την ένταση της καύσης) και άλλα φαινόμενα, όπως η μετάβαση της πυρκαγιάς από το έδαφος στις κορυφές των δέντρων (crown fire) και οι στρόβιλοι φωτιάς. Στα αποτελέσματα συγκαταλέγονται οι οικολογικές και υδρολογικές επιδράσεις στο τοπίο, όπως το ποσοστό της ύλης που καταναλώθηκε από φωτιές, η εξάλειψη των δέντρων και η παραγόμενη ποσότητα καπνού.

Σκοπός των συστημάτων πρόγνωσης είναι η εκτίμηση της κατάστασης μιας πυρκαγιάς με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, ώστε να υπάρξει μία βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη. Με αυτό τον τρόπο είναι εφικτή η κατάλληλη οργάνωση ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι καταστροφές και οι συνέπειες της πυρκαγιάς.



## 2. Πυρκαγιά

Πυρκαγιά είναι μια μη προγραμματισμένη, ανεπιθύμητη και ανεξέλεγκτη φωτιά σε περιβάλλον με βλάστηση που μπορεί να αναφλεγεί. Μπορεί να προκληθεί από ανθρώπινες ενέργειες ή φυσικά φαινόμενα, όπως κεραυνοί, ξηρό κλίμα, έκρηξη ηφαιστείου.

Οι πυρκαγιές χαρακτηρίζονται με βάση τα αίτια της ανάφλεξης, τα φυσικά χαρακτηριστικά τους, το υπάρχον εύφλεκτο υλικό και την επίδραση των καιρικών φαινομένων στη φωτιά. Πυρκαγιές που ξεκινούν από φυσικά αίτια είναι πιθανό να έχουν ευεργετική επίδραση στην τοπική βλάστηση, στην πανίδα και στα οικοσυστήματα που έχουν εξελιχθεί με τη φωτιά.

Με τον όρο καύσιμο εννοούμε οτιδήποτε καίγεται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, παρόλο που στην πραγματικότητα είναι πιθανό να καίγεται μόνο ένα μέρος του διαθέσιμου υλικού και εξαρτάται από τις ιδιότητες της φωτιάς τη δεδομένη χρονική στιγμή, οι οποίες επηρεάζονται από το χρόνο, την ανάφλεξη, τις καιρικές συνθήκες, το υψόμετρο και την κατεύθυνση της διάδοσης. Κάτω από ήπιες καιρικές συνθήκες σε επίπεδο έδαφος, οι πυρκαγιές σε δάση έχουν χαμηλή ένταση. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια ημερών με ισχυρούς ανέμους, υψηλές θερμοκρασίες και χαμηλή υγρασία οι φλόγες είναι πιθανό να φτάσουν στην κομοστέγη των δέντρων, με αποτέλεσμα να καίγεται ολόκληρο το δάσος.

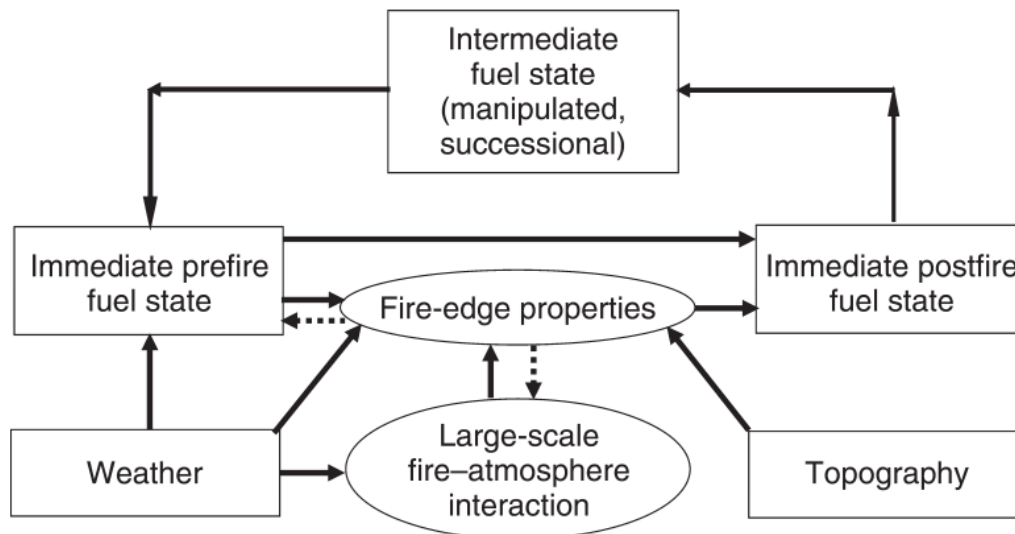
Οι πυρκαγιές είναι γεγονόταν που μπορεί να διαρκέσουν λεπτά, ώρες ή και μήνες.

Κάποιες από τις σημαντικές ιδιότητες μια πυρκαγιάς είναι:

- **ο ρυθμός εξάπλωσης:** επηρεάζει τη δυνατότητα καταστολής της φωτιάς και εκκένωσης ενός χώρου με ασφάλεια.
- **η ένταση:** ο ρυθμός εξάπλωσης πολλαπλασιασμένος με την ποσότητα του καυσίμου που έχει καταναλωθεί και σχετίζεται με τις διαστάσεις της φλόγας.
- **μήκος και γωνία της φλόγας:** επηρεάζουν την ικανότητα της φωτιάς να περάσει εμπόδια, να εξαπλωθεί κατά μήκος μη συνεχούς καυσίμου[2] και να μεταφερθεί στις κορυφές των δέντρων.

- **δημιουργία δαυλών:** αποτελούν αιτία ανάφλεξης κτηρίων και τρόπο μεταφοράς της φωτιάς πέρα από κενά έως και δεκάδες χιλιόμετρα σε μήκος[3].

Μεταξύ την πυρκαγιάς και του καυσίμου υπάρχει σχέση αλληλεπίδρασης και ανατροφοδότησης. Στο παρακάτω διάγραμμα[1] απεικονίζονται οι αλλαγές στη φάση του καυσίμου που προκύπτουν κατά την πυρκαγιά.



**Εικόνα 1:** Εξάρτηση του καυσίμου από τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς που κυριαρχούν.[1]

## I. Εξάπλωση

Η εξάπλωση της πυρκαγιάς ποικίλει με βάση το διαθέσιμο εύφλεκτο υλικό, τη σύνθεσή του και την περιεκτικότητά του σε υγρασία και τις καιρικές συνθήκες. Η σύνθεση και η πυκνότητα του καυσίμου ανήκουν στο κομμάτι της τοπογραφίας, καθώς η μορφή του εδάφους ορίζει παράγοντες όπως η ηλιοφάνεια και το διαθέσιμο νερό για την ανάπτυξη τη βλάστησης. Οι τύποι πυρκαγιάς με βάση το καύσιμο κατηγοριοποιούνται ως εξής:

**Πυρκαγιές εδάφους ή υπόγειες:** Τροφοδοτούνται κυρίως από υπόγειες ρίζες, χώμα και άλλα οργανικά υλικά. Αυτό το είδος καυσίμου είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε ανάφλεξη. Οι πυρκαγιές εδάφους κατά κανόνα καίνε αργά και από χρονικό διάστημα ημερών έως και μηνών.

**Πυρκαγιές επιφανείας ή έρπουσες:** Τροφοδοτούνται από βλάστηση, είτε νεκρή (βελόνες, φύλλα, κλαδάκια κλπ) που βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος, είτε ζωντανή (χόρτα, πόες, θάμνοι, νεαρά δέντρα) που αναπτύσσεται πάνω στο έδαφος. Καίνε σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και διαδίδονται με αργό ρυθμό, όμως απότομες κλίσεις και δυνατοί άνεμοι μπορούν να επιταχύνουν την εξάπλωσή τους.

**Πυρκαγιές κόμης ή επικόρυφες:** Συμβαίνουν σε υψηλά δάση όπου γίνεται ανάφλεξη και καύση της κόμης των δέντρων[4],[5]. Η ανάφλεξη εξαρτάται από την πυκνότητα της κομοστέγης, το ύψος της, τις υπάρχουσες επιφανειακές πυρκαγιές, την υγρασία και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Κατά κανόνα η εξάπλωσή τους είναι γρήγορη.

## II. Φυσικές Ιδιότητες

Πυρκαγιές συμβαίνουν όταν μια πηγή ανάφλεξης έρχεται σε επαφή με εύφλεκτο υλικό, όπως η βλάστηση. Η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία συνήθως αποτρέπει την ανάφλεξη και επιβραδύνει την εξάπλωση, διότι απαιτούνται υψηλότερες θερμοκρασίες για την εξάτμιση του νερού που περιέχεται στο υλικό και τη θέρμανσή του ως το σημείο ανάφλεξης. Υλικό με μικρότερη πυκνότητα όπως το γρασίδι και τα φύλλα αναφλέγεται πιο εύκολα γιατί περιέχουν λιγότερη υγρασία από τα υλικά με μεγαλύτερη πυκνότητα όπως τα κλαδιά και οι κορμοί. Τα φυτά χάνουν συνεχώς υγρασία λόγω της εξάτμισης, όμως την απορροφούν ξανά μέσω του εδάφους, της υγρασίας του περιβάλλοντος και των βροχών. Όταν η ισορροπία αυτή διαταράσσεται τα φυτά ξεραίνονται με αποτέλεσμα να γίνονται πιο εύφλεκτα.

Το μέτωπο της πυρκαγιάς είναι το σημείο στο οποίο υλικό που δεν έχει καεί ακόμα συναντά τις φλόγες. Καθώς το μέτωπο πλησιάζει, η φωτιά θερμαίνει το περιβάλλον και το ξυλώδες υλικό μέσω ακτινοβολίας και συναγωγής. Αρχικά ξεραίνεται καθώς το νερό εξατμίζεται στη θερμοκρασία των 100°C. Στη συνέχεια η πυρόλυση του ξύλου απελευθερώνει εύφλεκτα αέρια. Τελικά το ξύλο αρχίζει να καίγεται και αναφλέγεται στους. Ακόμα και πριν οι φλόγες φτάσουν σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία η θερμότητα που απελευθερώνεται από την πυρκαγιά θερμαίνει τον αέρα, με αποτέλεσμα το υλικό να αναφλέγεται νωρίτερα και η πυρκαγιά να εξαπλώνεται γρηγορότερα.

Οι πυρκαγιές έχουν ταχύ ρυθμό διάδοσης όταν υπάρχει συνεχές καύσιμο. Μπορούν να φτάσουν την ταχύτητα των 10 χιλιομέτρων την ώρα σε δάση και 22

χιλιομέτρων την ώρα σε λιβάδια. Οι πυρκαγιές μπορούν να κινηθούν είτε άσχετα με το κυρίως μέτωπο, σχηματίζοντας το πλαϊνό μέτωπο, είτε αντίθετα. Υπάρχει επίσης η πιθανότητα να εξαπλωθούν λόγω του αέρα καθώς μεταφέρει υλικό που καίγεται πάνω από δρόμους ή ποτάμια, τα οποία υπό κανονικές συνθήκες θα εμπόδιζαν την εξάπλωση.

Επίσης, η θερμότητα που απελευθερώνεται από μια πυρκαγιά προκαλεί διάβρωση των βραχών, λόγω της απότομης διαστολής τους.

### **III. Επιπτώσεις**

Το ζήτημα της πυρκαγιάς[1] είναι σύνθετο σε παγόσμιο επίπεδο εξαιτίας της πολυπλοκότητας των στοιχείων που εμπλέκονται. Υπάρχει πληθώρα κοινωνικοοικονομικών, πολιτικών και γεωγραφικών πλαισίων, δυσκολία στην πρόβλεψη της επίδρασης της πυρκαγιάς στα διάφορα είδη χλωρίδας και πανίδας σε χρονικό και χωρικό επίπεδο, μεγάλο κόστος μετριασμού της ιδιαίτερα σε ακραίες συνθήκες και πολλαπλές μέθοδοι περιορισμού της στο έδαφος.

Για να βρεθεί λύση στο πρόβλημα της πυρκαγιάς θα πρέπει πρώτα να οριστεί σε ποιον τομέα ανήκει. Αποτελεί θεσμικό πρόβλημα το οποίο απαιτεί πιο αποτελεσματική ηγεσία, συντονισμό και διαχείριση από την κυβέρνηση; Είναι καθαρά επιστημονικό πρόβλημα που απαιτεί καλύτερη κατανόηση της πιθανότητας έναρξης πυρκαγιάς, της συμπεριφοράς της, της επίδρασής της στα οικοσυστήματα και της ανθεκτικότητας των υποδομών των αστικών περιοχών; Ή αποτελεί κοινωνικό ζήτημα που απαιτεί την προσοχή του καθένα ατομικά ώστε να λαμβάνει τα κατάλληλα μέτρα καθημερινά;

Οι συνέπειες μια πυρκαγιάς φαίνονται σε διάφορους τομείς, όπως το περιβάλλον, η βιοποικιλότητα, η οικονομία, η κοινωνία[1]. Τα αγαθά που σχετίζονται με την πυρκαγιά και κατατάσσονται στα κοινωνικά αγαθά είναι ανθρώπινες ζωές και κατοικίες. Οικονομικά αγαθά αποτελούν τα κτήρια (σπίτια, επιχειρήσεις, σχολεία), οι φάρμες (εκτρεφόμενα ζώα, τροφή, εξοπλισμός) και οι δημόσιες υποδομές. Περιβαλλοντικά αγαθά θεωρούνται η βιοποικιλότητα, η χλωρίδα, η πανίδα, το καθαρό νερό και ο καθαρός αέρας.

Πολλές πτυχές της ποιότητας του αέρα επηρεάζονται από τις πυρκαγιές λόγω των αέριων και σωματιδιακών εκπομπών τους[6]. Ο καπνός έχει επίδραση στην ανθρώπινη υγεία, τις μεταφορές, τη γεωργία, δηλαδή σε διάφορα τμήματα της καθημερινότητας,

ακόμα και σε σημεία απομακρυσμένα από τις φλόγες. Επηρεάζεται επίσης η σύνθεση της ατμόσφαιρας σε παγκόσμιο επίπεδο. Η αύξηση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα επηρεάζει την ανάπτυξη των φυτών και τη θερμοκρασία του πλανήτη.

Η χερσαία βιοποικιλότητα αποτελεί πηγή καυσίμου ζωντανού ή νεκρού. Με τη σειρά τους, οι πυρκαγιές που καταναλώνουν το συγκεκριμένο καύσιμο επηρεάζουν τη βιοποικιλότητα. Ζώα και φυτά θανατώνονται κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς αν η φωτιά είναι αρκετά έντονη, υπάρχουν, όμως, είδη που καταφέρνουν να προσαρμοστούν σε συγκεκριμένες συνθήκες φωτιάς όταν ζουν σε οικοσυστήματα επιρρεπή στη φωτιά. Η πιο σοβαρή αρνητική επίδραση σε σχέση με τα φυτά είναι η εξαφάνιση κάποιου είδους, ενώ για τα ζωικά είδη η πρόβλεψη αλλά ακόμα και ο εντοπισμός των επιδράσεων της πυρκαγιάς εμπεριέχουν μεγάλη δυσκολία. Εκτός από τα χερσαία οικοσυστήματα επηρεάζονται και τα υδάτινα, καθώς υπάρχει πληθώρα έμμεσων επιπτώσεων στα ρεύματα λόγω αλλαγών στη ροή του νερού, τη θερμοκρασία και το pH.

Η πυρκαγιά ενδέχεται να έχει αρνητικές επιπτώσεις σε κάποια οικοσυστήματα, είναι όμως επίσης πιθανό να έχει και θετική επίδραση σε κάποια άλλα. Υπάρχουν αρκετά είδη φυτών και ζώων σε πολλά δάση κυρίως της Βόρειας Αμερικής, τα οποία έχουν εξελιχθεί λόγω της φωτιάς και πολλά από αυτά εξαρτώνται από τις πυρκαγιές για να αναπαραχθούν και να αναπτυχθούν.

#### **IV. Μοντελοποίηση πυρκαγιάς**

Στην υπολογιστική μηχανική, η μοντελοποίηση πυρκαγιάς σχετίζεται με αριθμητική προσομοίωση πυρκαγιάς με σκοπό την κατανόηση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Πρακτικός στόχος είναι η καταστολή της πυρκαγιάς, η μεγιστοποίηση της ασφάλειας των πυροσβεστών και του κοινού και η ελαχιστοποίηση των καταστροφών.

Όπως όλα τα υπολογιστικά μοντέλα, τα μοντέλα πυρκαγιάς απαιτείται να βρίσκουν την ισορροπία μεταξύ εγκυρότητας, διαθεσιμότητας δεδομένων και γρήγορης εκτέλεσης. Τα μοντέλα πυρκαγιάς εκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα πολυπλοκότητας, από απλές έως τις πιο σύνθετες αρχές, δημιουργώντας πρόκληση στην επίλυσή τους πριν τον πραγματικό χρόνο.

## V. Κατηγορίες μοντέλων

Μοντέλα πυρκαγιάς αναπτύσσονται από το 1940 μέχρι σήμερα, όμως υπάρχουν ακόμα ερωτήματα σχετικά με τη χημεία και τη θερμοδυναμική που αφορούν μια πυρκαγιά. Τα μοντέλα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: εμπειρικά μοντέλα, ημι-εμπειρικά μοντέλα και τα βασισμένα στη φυσική.

**Εμπειρικά μοντέλα:** Μοντέλα από εμπειρία και διαίσθηση από πυρκαγιές που έχουν προηγηθεί χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες ημι-εμπειρικές εξισώσεις [7] για τη διάδοση της πυρκαγιάς με σκοπό τη γρήγορη εκτίμηση θεμελιωδών παραμέτρων της όπως ο ρυθμός εξάπλωσης, το μήκος της φλόγας, η ένταση επιφανειακής πυρκαγιάς.

Τα δισδιάστατα μοντέλα FARSITE[8] και Prometheus[9], τα οποία εφαρμόζουν τέτοιες ημι-εμπειρικές εξισώσεις, έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό παραμέτρων της πυρκαγιάς στο έδαφος.

**Μοντέλα βασισμένα στη φυσική:** Απλοποιημένα δισδιάστατα μοντέλα πυρκαγιάς βασισμένα σε αρχές διατήρησης που χρησιμοποιούν την ακτινοβολία ως κυρίαρχο μηχανισμό μετάδοσης της θερμότητας και τη συναγωγή, η οποία αντιπροσωπεύει την επίδραση του ανέμου και της κλίσης του εδάφους, οδηγούν σε συστήματα μερικών διαφορικών εξισώσεων. Πιο πολύπλοκα μοντέλα συνδυάζουν υπολογιστικά μοντέλα δυναμικής των ρευστών με ένα τμήμα πυρκαγιάς και επιτρέπουν στη φωτιά να αλληλεπιδράσει με το περιβάλλον. Τέτοια μοντέλα είναι: CAWFE (Coupled Atmosphere-Wildland Fire-Environment) της NCAR, WRF της NCAR, FIRETEC του Los Alamos National Laboratory, Wildland Urban Interface (WUI) Fire Dynamics Simulator (WFDS), FIRESTAR, Coupled Atmosphere-Wildland Fire Large Eddy Simulation του Πανεπιστημίου της Γιούτα.

Το κόστος της μεγαλύτερης πολυπλοκότητας σχετίζεται με το υπολογιστικό κόστος, σε τέτοιο βαθμό ώστε να μην μπορεί να υπάρξει μια ακριβής τρισδιάστατη ανάφλεξη καυσίμου με αριθμητική προσομοίωση, καθώς είναι πέρα από τις σύγχρονες υπολογιστικές δυνατότητες και δε θα είχε ουσιαστική σημασία λόγω της χαμηλής χωρικής ανάλυσης των ατμοσφαιρικών μοντέλων.

### 3. Περιγραφή του μοντέλου

#### VI. Μοντέλο WRF

Το WRF (Weather Research and Forecasting)[10],[11] είναι ένα μέσης κλίμακας αριθμητικό μοντέλο πρόγνωσης, σχεδιασμένο για την πραγματοποίηση ατμοσφαιρικής έρευνας και εφαρμογές πρόγνωσης. Αποτελείται από δύο δυναμικούς πυρήνες, ένα σύστημα προσομοίωσης δεδομένων και ένα λογισμικό ικανό να υποστηρίξει τον παράλληλο προγραμματισμό και την επεκτασιμότητα του συστήματος. Το μοντέλο εξυπηρετεί ένα ευρύ φάσμα μετεωρολογικών εφαρμογών σε κλίμακες από δεκάδες μέτρα έως χιλιάδες χιλιόμετρα. Η προσπάθεια ανάπτυξης του μοντέλου ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1990 και ήταν προϊόν συνεργασίας του Εθνικού Κέντρου Ατμοσφαιρικών Ερευνών NCAR ( National Center of Atmospheric Research) και της Εθνικής Υπηρεσίας Ωκεανών και Ατμόσφαιρας (National Oceanic and Atmospheric Administration), που εκπροσωπείται από τα Εθνικά Κέντρα Περιβαλλοντικής Πρόγνωσης NCEP (National Centers of Environmental Prediction), το Εργαστήριο Πρόβλεψης Συστημάτων FSL (Forecast Systems Laboratory), του Οργανισμού Καιρού Πολεμικής Αεροπορίας AFWA (Air Force Weather Agency), το Ερευνητικό Εργαστήριο Ναυτικού, το Πανεπιστήμιο της Οκλαχόμα και την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας FAA (Federal Aviation Administration).

Το WRF μπορεί να πραγματοποιήσει προσομοιώσεις οι οποίες βασίζονται είτε σε πραγματικές ατμοσφαιρικές συνθήκες (δεδομένα από παρατηρήσεις, αναλύσεις), είτε σε εξιδανικευμένες συνθήκες. Επίσης, προσφέρει στις προβλέψεις μια ευέλικτη και προγραμματιστικά αποδοτική πλατφόρμα. Το WRF επί του παρόντος χρησιμοποιείται από την NCEP και άλλα εθνικά μετεωρολογικά κέντρα, καθώς και εργαστήρια, πανεπιστήμια και ιδιωτικές εταιρείες.

Το WRF έχει μια πολύ μεγάλη παγκόσμια κοινότητα εγγεγραμμένων χρηστών (ένα σύνολο 39,000 σε πάνω από 160 χώρες) και προσφέρονται εργαστήρια και σεμινάρια κάθε χρόνο στην NCAR. Το σύστημα αποτελείται από δύο δυναμικούς πυρήνες, τον ARW (Advanced Research WRF) και τον NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model). Ο ARW έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό και διατηρείται από το NMM (Mesoscale and Microscale Meteorology Laboratory) της NCAR, ενώ ο NMM αναπτύσσεται από το NCEP.

## VII. WRF-FIRE

Το προγνωστικό σύστημα WRF-FIRE[12] αποτελεί μια ενότητα φυσικής εντός του WRF ARW, που επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώσουν την εξέλιξη μιας δασικής πυρκαγιάς σε σχέση με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, τη μορφολογία του εδάφους, την καύσιμη ύλη και την αλληλεπίδραση της πυρκαγιάς με την ατμόσφαιρα. Εφαρμόζεται ως ένα πακέτο φυσικής με αμφίδρομη αλληλεπίδραση μεταξύ της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς και της ατμόσφαιρας, επιτρέποντας στην αισθητή και λανθάνουσα θερμότητα που απελευθερώνονται κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς να επηρεάσουν και να αλλάξουν τις ατμοσφαιρικές συνθήκες στο κοντινό της περιβάλλον.

Το WRF-FIRE συνδυάζει το μοντέλο WRF με ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς. Επιτρέπει στους χρήστες να προσομοιώσουν την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς λαμβάνοντας υπόψιν τρεις βασικές εξωτερικές παραμέτρους: τη μορφολογία του εδάφους, τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Το μοντέλο δεν περιέχει ακόμα τους απαραίτητους αλγορίθμους για την απεικόνιση φωτιάς που εξαπλώνεται από τις κορυφές των δέντρων (crown fire). Ο χρήστης ορίζει την ώρα, την τοποθεσία και τη μορφή της έναυσης. Ο ρυθμός με τον οποίο εξαπλώνεται η επιφάνεια της πυρκαγιάς, υπολογίζεται σε κάθε σημείο με ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο.

Η μοντελοποίηση πυρκαγιάς μπορεί να προσομοιώσει την ανάπτυξη, εξάπλωση και καταστολή μιας πυρκαγιάς καθώς και να περιγράψει το ρυθμό της εξάπλωσης και τη θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την καύση σε δύο διαστάσεις. Η μοντελοποίηση αντιμετωπίζει τρεις φυσικές διεργασίες: το ρυθμό επέκτασης της περιμέτρου, την απελευθέρωση θερμότητας στην περιοχή της πυρκαγιάς και την επέκταση της κλίμακας ώστε να ενσωματωθεί η απελευθερωμένη θερμότητα στο ατμοσφαιρικό μοντέλο. Επειδή οι φυσικές διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε πολύ μικρότερη κλίμακα από αυτή που αποτυπώνεται στο πλέγμα και το βήμα του ατμοσφαιρικού μοντέλου, χρησιμοποιούνται ημι-εμπειρικές σχέσεις για την παραμετροποίηση.

Το μοντέλο αφορά τη συμπεριφορά επιφανειακής πυρκαγιάς και υπάρχει αμφίδρομη αλληλεπίδραση με το ατμοσφαιρικό μοντέλο. Οι άνεμοι κοντά στο έδαφος από το ατμοσφαιρικό μοντέλο παρεμβάλλονται σε ένα υψηλότερης ακρίβειας πλέγμα και χρησιμοποιούνται μαζί με τις ιδιότητες του καυσίμου και την κλίση του εδάφους



για να καθοριστούν ο ρυθμός εξάπλωσης της πυρκαγιάς και η κατεύθυνσή της. Όταν η φωτιά περάσει από ένα σημείο, το φλεγόμενο καύσιμο συνεχίζει να καίγεται, η μάζα του θεωρείται ότι φθίνει εκθετικά στο χρόνο μετά την έναυση και ο ρυθμός εξαρτάται από το μέγεθος των μορίων του καυσίμου. Μικρά σωματίδια καυσίμου, όπως το γρασίδι καταναλώνονται με γρήγορο ρυθμό, σε αντίθεση με τα μεγαλύτερα, όπως κλαδιά και κορμοί. Η κατανάλωση του καυσίμου προκαλεί ροή αισθητής και λανθάνουσας θερμότητας στα χαμηλότερα στρώματα του ατμοσφαιρικού μοντέλου, δημιουργώντας κυκλοφορία στο οριακό στρώμα. Επίσης, το ατμοσφαιρικό μοντέλο χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση της ευαισθησίας των χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς, όπως η περίμετρος, η ένταση και ο ρυθμός εξάπλωσης, στους εξωτερικούς παράγοντες που είναι γνωστό πως την επηρεάζουν, όπως η καύσιμη ύλη και η ταχύτητα του ανέμου.

Τα δεδομένα που αφορούν τη μορφολογία, περιλαμβάνουν κυρίως την κλίση του εδάφους, καθώς επίσης τον προσανατολισμό προς τον ήλιο και τυχόν εμπόδια που μπορούν να επηρεάσουν την εξάπλωση της πυρκαγιάς, όπως ποτάμια, δρόμοι και μη εύφλεκτη ύλη. Τα υψηλής ανάλυσης μορφολογικά χαρακτηριστικά παίζουν ρόλο στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, καθώς η εξάπλωση είναι ταχύτερη σε επιφάνειες με κλίση απ' ότι σε επίπεδο έδαφος.

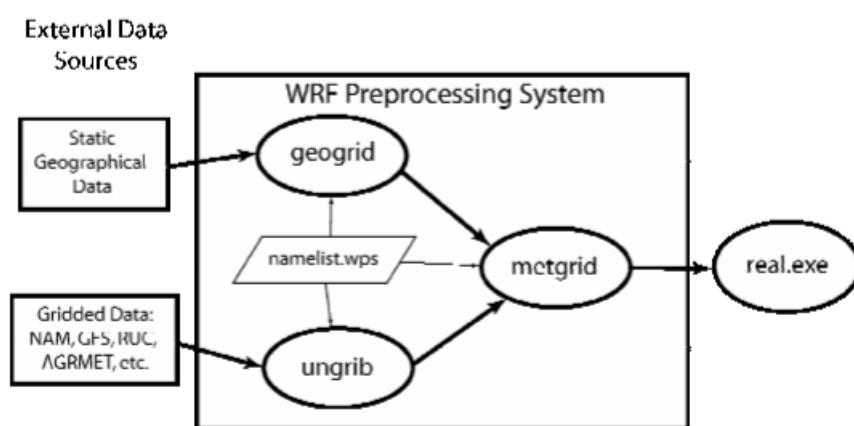
Η καύσιμη ύλη σχετίζεται, αλλά δεν ταυτίζεται, με τη βλάστηση στην περιοχή της πυρκαγιάς. Αυτό συμβαίνει γιατί μέρος της βλάστησης αναφλέγεται, αλλά υπάρχει και το νεκρό καύσιμο, το οποίο δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης αποδίδονται σε κάθε στοιχείο καυσίμου. Κάθε κατηγορία καυσίμου περιλαμβάνει τιμές για το φορτίο καυσίμου (fuel load, μάζα ανά μονάδα επιφάνειας), βάθος, λόγο επιφάνειας προς όγκο, ενθαλπία και υγρασία.

Από τις εξωτερικές παραμέτρους, τις περισσότερες μεταβολές παρουσιάζουν οι ατμοσφαιρικές συνθήκες και κυρίως παράγοντες όπως ο άνεμος, η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία. Οι αλλαγές του ανέμου είναι ιδιαίτερα σημαντικές γιατί μπορούν να αλλάξουν ξαφνικά την κατεύθυνση και τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς.

## VIII. WPS

Το σύστημα προεπεξεργασίας του WRF (WRF Preprocessing System) WPS, είναι ένα σύνολο τριών προγραμμάτων, των οποίων συλλογικός σκοπός είναι η

προετοιμασία των δεδομένων, ώστε να εισαχθούν στο πρόγραμμα πρόγνωσης με πραγματικά δεδομένα (real.exe). Κάθε ένα από τα τρία προγράμματα (geogrid, ungrib, metgrid) πραγματοποιεί ένα στάδιο της προετοιμασίας. Το geogrid χρησιμοποιείται για τον ορισμό της υπο μελέτη περιοχής και παρεμβάλλει τα γεωγραφικά δεδομένα στο πλέγμα. Το ungrib εξάγει μετεωρολογικά πεδία από αρχεία μορφής GRIB. Τέλος, το metgrid παρεμβάλλει οριζοντίως τα μετεωρολογικά δεδομένα που προέκυψαν από το ungrib στο πλέγμα που ορίζεται από το geogrid. Η κάθετη παρεμβολή των μετεωρολογικών δεδομένων εκτελείται από το πρόγραμμα real.exe.



**Εικόνα 2:** Η ροή δεδομένων μεταξύ των προγραμμάτων του WPS

Κάθε ένα από τα προγράμματα του WPS διαβάζει κάποιες παραμέτρους από ένα κοινό αρχείο (namelist). Το αρχείο αυτό αποτελείται από δεδομένα για κάθε πρόγραμμα και μία κοινή ενότητα για παραμέτρους που χρησιμοποιούνται από περισσότερα από ένα προγράμματα. Υπάρχουν, επίσης, επιπρόσθετα αρχεία που χρησιμοποιούνται μεμονωμένα από κάποιο από τα προγράμματα, τα οποία συνήθως δε χρειάζονται περεταίρω τροποποίηση, όμως στα πλαίσια του WRF-FIRE απαιτούνται επιπλέον δεδομένα.

Ο βασικός μηχανισμός για το WPS, που είναι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται από το μοντέλο WRF, παρέχει επιλογές για τη μεταγλώττιση του WPS σε μια ποικιλία από πλατφόρμες. Όταν είναι διαθέσιμες οι κατάλληλες βιβλιοθήκες και μεταγλωττιστές, τα προγράμματα metgrid και geogrid μπορούν να εκτελεστούν με κατανομημένη χρήση μνήμης, που επιτρέπει την επεξεργασία μεγαλύτερων περιοχών μοντελοποίησης σε μικρότερο χρόνο. Η εργασία που πραγματοποιείται από το ungrib

δεν είναι δεκτική σε παράλληλο προγραμματισμό, με αποτέλεσμα το ungrib να τρέχει μόνο σε έναν επεξεργαστή.

## **IX. Geogrid**

Σκοπός του geogrid είναι ο καθορισμός της περιοχής που πρόκειται να προσομοιωθεί και η παρεμβολή γεωγραφικών δεδομένων στο πλέγμα του μοντέλου. Η περιοχή καθορίζεται από πληροφορίες που προσδιορίζονται από το χρήστη στο αρχείο namelist.wps στην ενότητα που αφορά το geogrid. Εκτός από τον υπολογισμό του γεωγραφικού πλάτους και του γεωγραφικού μήκους για κάθε σημείο του πλέγματος, το geogrid παρεμβάλλει δεδομένα όπως οι κατηγορίες εδάφους, οι κατηγορίες χρήσης γης, το υψόμετρο, η μέση ετήσια θερμοκρασία εδάφους, ο μηνιαίος λόγος βλάστησης, η μηνιαία ανακλαστικότητα, η μέγιστη ανακλαστικότητα του χιονιού και η κλίση του εδάφους. Παγκόσμια δεδομένα για τα πεδία αυτά παρέχονται μέσω της ιστοσελίδας του WRF και η λήψη τους γίνεται μόνο μία φορά, καθώς είναι αμετάβλητα στο χρόνο. Πολλά από τα δεδομένα είναι διαθέσιμα μόνο σε μία ανάλυση και άλλα σε περισσότερες. Ο χρήστης πρέπει να επιλέξει τα δεδομένα με ανάλυση κοντά σε εκείνη της προσομοίωσης, ώστε η παρεμβολή των πεδίων να είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική.

Εκτός από τα γεωγραφικά δεδομένα, το geogrid είναι αρκετά γενικό ώστε να μπορεί να παρεμβάλλει και πιο συνεχή πεδία στην περιοχή της προσομοίωσης. Τα νέα πεδία μπορούν να εισαχθούν στην προσομοίωση με την κατάλληλη τροποποίηση του αρχείου GEOGRID.TBL. Το GEOGRID.TBL ορίζει ποια πεδία θα παραχθούν από το geogrid, περιγράφει με ποια μέθοδο θα γίνει η παρεμβολή των δεδομένων καθώς και ποια είναι η τοποθεσία στο σύστημα των απαραίτητων αρχείων.

Τα αποτελέσματα του geogrid είναι σε μορφή WRF I/O API. Επιλέγοντας τη μορφή NetCDF I/O το geogrid μπορεί να δώσει τα αποτελέσματα σε NetCDF, με σκοπό την εύκολη απεικόνισή τους χρησιμοποιώντας εξωτερικά πακέτα λογισμικού, όπως τα ncview, NCL και RIP4.

## **X. Ungrib**

Το πρόγραμμα ungrib διαβάζει τα αρχεία μορφής GRIB και γράφει τα δεδομένα σε μια απλή ενδιάμεση μορφή. Τα αρχεία GRIB περιέχουν χρονικά μεταβαλλόμενα μετεωρολογικά πεδία και είναι συνήθως από άλλα τοπικά ή παγκόσμια μοντέλα, όπως

τα μοντέλα GFS ή NCEP NAM. Το ungrib μπορεί να διαβάσει GRIB Edition 1 και με την επιλογή GRIB 2, GRIB Edition 2 αρχεία.

Τα GRIB αρχεία περιέχουν συνήθως περισσότερα πεδία από όσα χρειάζονται για την προσομοίωση του WRF. Και οι δύο εκδοχές της μορφής GRIB χρησιμοποιούν διάφορους κώδικες, ώστε να αναγνωρίσουν τις μεταβλητές και τα επίπεδα στο αρχείο GRIB. Το πρόγραμμα ungrib χρησιμοποιεί πίνακες από αυτούς τους κώδικες, που ονομάζονται Vtables (variable tables), για να καθορίσει ποια πεδία πρέπει να εξαχθούν από τα αρχεία GRIB, ώστε να γραφούν στην ενδιάμεση μορφή. Τα Vtables για κοινά αρχεία GRIB παρέχονται με το λογισμικό ungrib.

## **XI. Metgrid**

Το πρόγραμμα metgrid παρεμβάλλει οριζοντίως τα μετεωρολογικά αρχεία σε ενδιάμεση μορφή, που προέκυψαν από το πρόγραμμα ungrib, στις περιοχές της προσομοίωσης που ορίζονται από το πρόγραμμα geogrid. Τα αρχεία εξόδου του metgrid μπορούν να αφομοιωθούν από το πρόγραμμα real του WRF. Το εύρος των ημερομηνιών που θα παρεμβάλλει το metgrid μπορεί να προσδιοριστεί στην ενότητα “share” του namelist.wps. Καθώς το έργο του metgrid, όπως και αυτό του ungrib, είναι εξαρτώμενο από το χρόνο, πρέπει να εκτελείται σε κάθε νέα προσομοίωση.

Ο έλεγχος για το ποια μετεωρολογικά πεδία παρεμβάλλονται προέρχεται από το αρχείο METGRID.TBL. Το METGRID.TBL παρέχει ένα τμήμα για κάθε πεδίο, μέσα στο οποίο είναι δυνατό να οριστούν επιλογές, όπως η μέθοδος παρεμβολής που θα χρησιμοποιηθεί για το πεδίο, το πλέγμα στο οποίο παρεμβάλλεται ένα πεδίο.

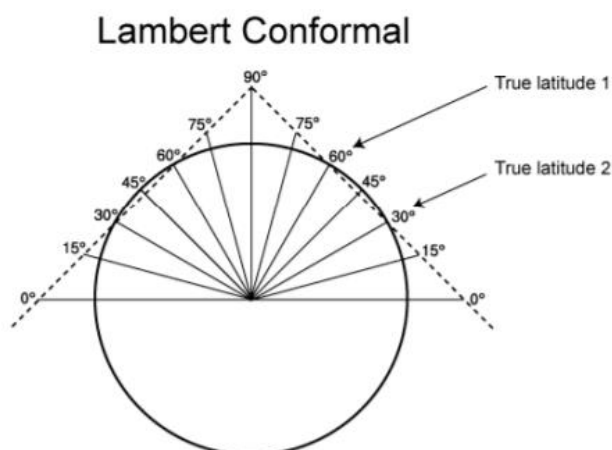
Τα αποτελέσματα του metgrid είναι σε μορφή WRF I/O API. Επιλέγοντας τη μορφή NetCDF I/O το metgrid μπορεί να δώσει τα αποτελέσματα σε NetCDF, με σκοπό την εύκολη απεικόνισή τους χρησιμοποιώντας εξωτερικά πακέτα λογισμικού.

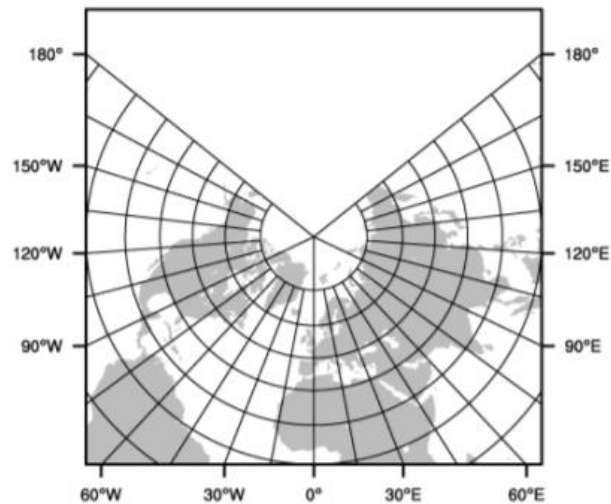
## 4. Μεθοδολογία

### ΧΠ. Διαμόρφωση της περιοχής

Η περιοχή της προσομοίωσης προσδιορίζεται μέσω του `namelist.wps` στις ενότητες `geogrid` και `share`. Στην ενότητα `geogrid` ο χρήστης πρέπει να ορίσει το κέντρο της υπό μελέτη περιοχής με τις μεταβλητές `ref_lat`, `ref_lon` (γεωγραφικό πλάκος και γεωγραφικό μήκος), τη χαρτογραφική προβολή της περιοχής με τη μεταβλητή `map_proj`, τον αριθμό των σημείων του πλέγματος με τις μεταβλητές `e_we`, `e_sn` και την ανάλυση του πλέγματος σε μέτρα με τις μεταβλητές `dx`, `dy`. Πρέπει, επίσης, να καθοριστεί η τοποθεσία των γεωγραφικών δεδομένων, που πρόκειται να διαβάσει το `geogrid`, με τη μεταβλητή `geog_data_path`.

Υπάρχουν τέσσερις διαθέσιμες χαρτογραφικές προβολές: η σύμμορφη τύπου Lambert ('lambert'), η μερκατορική ('mercator'), η αζιμουθιακή στερεογραφική προβολή ('polar') και η κυλινδρική ισαπέχουσα ('lat-lon'). Στα πλαίσια της παρούσας προσομοίωσης επιλέχθηκε η προβολή Lambert, που περιγράφεται από τις μεταβλητές `truelat1`, `truelat2` και `stand_lon`, καθώς ενδείκνυται για περιοχές μεσσαίων γεωγραφικών πλατών.



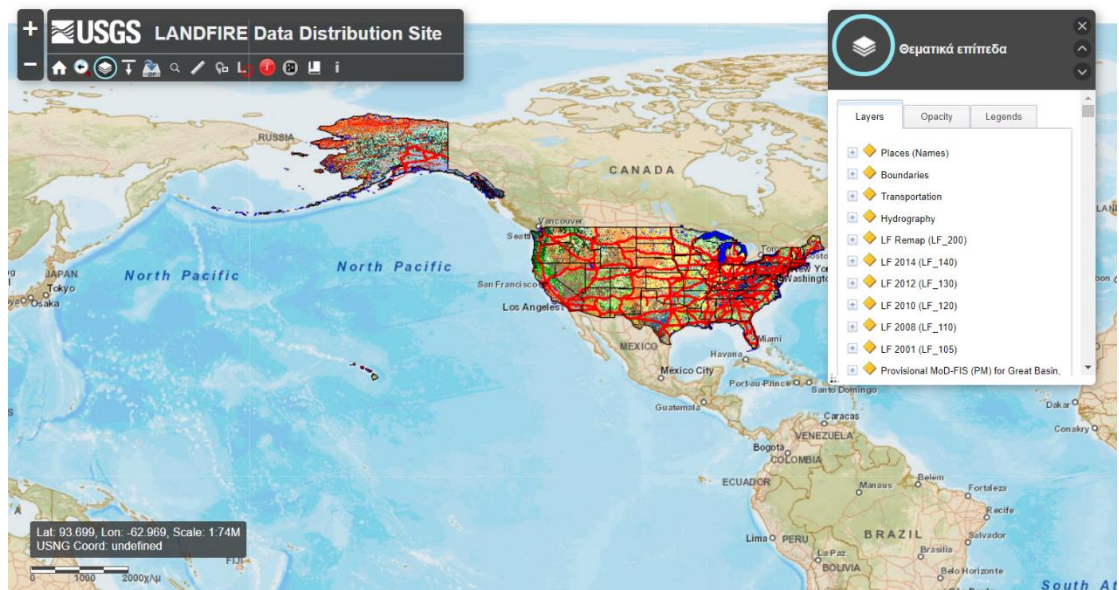


**Εικόνα 3:** Χαρτογραφική προβολή τύπου Lambert

Στην ενότητα share ορίζεται το μέγεθος του υποπλέγματος με τις μεταβλητές `subgrid_ratio_x`, `subgrid_ratio_y`, με βάση το οποίο προκύπτει το μέγεθος του πλέγματος της φωτιάς. Υπάρχουν, επίσης, οι μεταβλητές `start_date`, `end_date`, με τις οποίες ο χρήστης καθορίζει τα χρονικά περιθώρια της προσομοίωσης. Για το διάστημα της προσομοίωσης πρέπει να είναι διαθέσιμα τα αντίστοιχα ατμοσφαιρικά δεδομένα. Τα δεδομένα αυτά παρέχονται με συγκεκριμένο χρονικό βήμα, που πρέπει να καθοριστεί με τη μεταβλητή `interval_seconds`.

### **XIII. Λήψη δεδομένων για το Geogrid**

Εκτός από τα βασικά πεδία που είναι απαραίτητα για το geogrid, το WRF-FIRE απαιτεί δύο επιπλέον πεδία: τις κατηγορίες καυσίμων και το υψόμετρο. Τα δεδομένα αυτά, για περιοχές των Ηνωμένων Πολιτειών, είναι διαθέσιμα στην ιστοσελίδα `landfire`[13]. Για τη λήψη των δεδομένων πρέπει πρώτα να καθοριστεί μια περιοχή παρόμοια και λίγο μεγαλύτερη από την περιοχή της προσομοίωσης. Στη συνέχεια, για την περιοχή αυτή, επιλέγονται τα πεδία `us_140 13 Fire Behavior Fuel Models – Anderson` και `us_Elevation`[14], τα οποία πρέπει να ληφθούν σε μορφή Geotiff.



**Εικόνα 4:** Ιστοσελίδα LANDFIRE[13]

#### **XIV. Κατηγορίες καυσίμων Anderson**

Το σύστημα κατάταξης Anderson[15] χρησιμοποιείται για την κατηγοριοποίηση του επιφανειακού καυσίμου που είναι διαθέσιμο σε κάθε σημείο. Καθεμία από τις κατηγορίες καυσίμων χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο βασικών ιδιοτήτων, που αποτελούνται από το φορτίο καυσίμου, φυσικές ιδιότητες που αφορούν τη γεωμετρία, διάταξη και σύνθεση του καυσίμου.

Τα μοντέλα καυσίμων κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες: γρασίδι, θάμνοι, ξυλεία και υπολείμματα δέντρων. Οι διαφορές στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς ανάλογα με την κατηγορία του καυσίμου, σχετίζονται κυρίως με το φορτίο καυσίμου και την κατανομή του στις τάξεις μεγέθους των στοιχείων καυσίμου.

Συγκεκριμένα τα δεκατρία μοντέλα καυσίμων (Fuel Models) όπως περιγράφονται από τον Anderson, είναι τα εξής:

- **Γρασίδι**

- i) FM1: η εξάπλωση της φωτιάς ρυθμίζεται από μικρά, πορώδη και συνεχή ποώδη ώριμα καύσιμα, είναι επιφανειακή και εξαπλώνεται γρήγορα. Υπάρχουν ελάχιστοι θάμνοι ή ξυλεία, γενικά λιγότερα από το ένα τρίτο της περιοχής. Η κατηγορία αυτή αναπαριστά επίσης λιβάδια και σαβάνια.

- ii) FM2: η φωτιά είναι επιφανειακή και εξαπλώνεται κυρίως μέσω ποώδους καυσίμου, ώριμου ή νεκρού σε συνδυασμό με υπολείμματα και νεκρά μέρη θάμνων ή ξυλείας, τα οποία συμβάλλουν στην έντασή της. Ανοιχτοί θαμνότοποι, πεύκα και βελανιδιές νάνοι, που καλύπτουν ένα με δύο τρίτα της περιοχής, μπορούν να ενταχθούν σε αυτή την κατηγορία. Τα φυτά αυτά, μπορεί να περιέχουν μεγάλο όγκο καυσίμων, που προκαλεί υψηλότερη ένταση φωτιάς.
- iii) FM3: σε αυτή την κατηγορία η φωτιά είναι πιο έντονη στις κατηγορίες γραδισιού και παρουσιάζει υψηλό ρυθμό εξάπλωσης με την ύπαρξη ανέμων. Ο άνεμος μπορεί να ωθήσει τη φωτιά σε μεγαλύτερο ύψος των φυτών και κατά μήκος στάσιμων υδάτων. Τα φυτά είναι ψηλά, κατά μέσο όρο κοντά στο ένα μέτρο. Περίπου το ένα τρίτο των φυτών θεωρείται νεκρό και διατηρεί τη φωτιά. Τέλος, άγρια ή καλλιεργημένα σιτηρά που δεν έχουν θεριστεί, μπορούν να θεωρηθούν παρόμοια με ψηλά λιβάδια και ελώδη εδάφη.

- **Θάμνοι**

- i) FM4: η ένταση και η γρήγορη εξάπλωση της φωτιάς περιλαμβάνουν το φύλλωμα και ζωντανό ή νεκρό ξυλώδες υλικό στο πάνω μέρος των φυτών. Συνήθως αφορά ώριμους θάμνους ύψους 1,8 ή περισσότερων μέτρων. Εκτός από το εύφλεκτο φύλλωμα, νεκρό ξυλώδες υλικό συνεισφέρει σημαντικά στην ένταση της φωτιάς.
- ii) FM5: η φωτιά αφορά επιφανειακό καύσιμο, που αποτελείται από υπολείμματα θάμνων και γρασίδι ή πόα που αναπτύσσονται στη σκιά του θόλου ενός δάσους. Η φωτιά γενικά δεν έχει μεγάλη ένταση, γιατί το φορτίο επιφανειακού καυσίμου είναι μικρό, οι θάμνοι είναι νέοι με ελάχιστο νεκρό υλικό και το φύλλωμα περιέχει ελάχιστο εύφλεκτο υλικό. Συνήθως, οι θάμνοι είναι χαμηλού ύψους και καλύπτουν όλη την περιοχή.
- iii) FM6: η φωτιά εξαπλώνεται στο επίπεδο των θάμνων που το φύλλωμα είναι πιο εύφλεκτο από την κατηγορία 5, αλλά απαιτούνται μέτριοι άνεμοι (μεγαλύτεροι από 13 km/h). Οι θάμνοι είναι παλαιότεροι αλλά όχι όσο ψηλοί στην κατηγορία 4, ούτε έχουν αντίστοιχα μεγάλη περιεκτικότητα σε καύσιμο. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται και υπολείμματα ξύλων.
- iv) FM7: η φωτιά εξαπλώνεται στην επιφάνεια και στο επίπεδο των θάμων με την ίδια ευκολία και μπορεί να προκύψει σε συνθήκες υψηλότερης



εσωτερικής υγρασίας των φυτών εξαιτίας της ευφλεκτότητας του ζωντανού φυλλώματος. Τα φυτά έχουν γενικά ύψος μεταξύ 0,6 – 1,8 μέτρων.

- **Ξυλεία**

- i) FM8: αφορά φωτιές εδάφους βραδείας καύσης με φλόγες μικρού μήκους, παρόλου που η φωτιά ενδέχεται κατά καιρούς να συναντήσει μεγάλη συγκέντρωση καυσίμου που μπορεί να την αναζωπυρώσει. Μόνο κάτω από ακραίες συνθήκες, που περιλαμβάνουν υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή υγρασία και δυνατούς ανέμους, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί κίνδυνος πυρκαγιάς. Η φωτιά στο συμπαγές στρώμα των φυτικών υπολειμμάτων υποστηρίζεται από βελόνες, φύλλα και κλαδιά.
- ii) FM9: η φωτιά εκτείνεται μέσω των υπολειμμάτων στην επιφάνεια πιο γρήγορα από ότι στην κατηγορία 8 και έχει μεγαλύτερο ύψος φλόγας. Η κατηγορία αυτή, αφορά κυρίως κωνοφόρα με μακριές βελόνες και δέντρα με σκληρό ξύλο. Οι πυρκαγιές από σκληρό ξύλο είναι προβλέψιμες, αλλά οι δυνατοί άνεμοι προκαλούν μεγαλύτερους ρυθμούς εξάπλωσης από τους προβλεπόμενους.
- iii) FM10: η φωτιά στα επιφανειακά καύσιμα και τα καύσιμα εδάφους έχει μεγαλύτερη ένταση από τις άλλες κατηγορίες ξυλείας. Τα καύσιμα περιλαμβάνουν μεγάλες ποσότητες από μέρη ξύλων (μεγάθους 7,6 εκατοστών ή μεγαλύτερα), τα οποία είναι αποτέλεσμα υπερωρίμανσης ή φυσικών γεγονότων, που δημιουργούν μεγάλο όγκο νεκρού υλικού στο έδαφος. Η ανάφλεξη μεμονωμένων δέντρων είναι πιο συχνή σε αυτή την κατηγορία, οδηγώντας σε πιθανές δυσκολίες ελέγχου της φωτιάς. Η κατηγορία αυτή, αφορά οποιοδήποτε είδους δάσους με την προϋπόθεση να υπάρχει μεγάλος όγκος νεκρού υλικού στο έδαφος.

- **Υπολείμματα δέντρων**

- i) FM11: η φωτιά είναι αρκετά ενεργή στα φυτικά υπολείμματα και το ποώδες υλικό που αναμειγνύεται με αυτά. Η απόσταση του αρκετά ελαφρού καυσίμου, η σκίαση που προκαλείται από το ανώτερο μέρος των φυτών, η γήρανση του καυσίμου, μπορούν να συμβάλλουν στον περιορισμό της πυρκαγιάς. Στη κατηγορία αυτή, περιλαμβάνονται μικρές κοπές.
- ii) FM12: φωτιά που εξαπλώνεται ραγδαία με μεγάλη ένταση και πιθανότητα δημιουργίας αναζωπυρώσεων. Όταν η φωτιά ξεκινά, γενικά διατηρείται

μέχρι να υπάρξει αλλαγή καυσίμου. Στην κατηγορία αυτή, περιλαμβάνονται η αποψιλωτική υλοτομία και μεσσαίες ή μεγάλες τομές.

- iii) FM13: η φωτιά γενικά διαδίδεται στην περιοχή μέσω ενός συνεχούς στρώματος υπολειμμάτων. Παρουσιάζονται μεγάλες ποσότητες υλικού μεγαλύτερου των 7,6 εκατοστών. Η φωτιά εξαπλώνεται γρήγορα μέσω των μικρών σωματιδίων καυσίμου και η έντασή της αυξάνεται με αργό ρυθμό καθώς αρχίζουν να καίγονται τα μεγάλα καύσιμα. Η ενεργή φλόγα διατηρείται για μεγάλο χρονικό διάστημα και συνήθως παράγονται πολλές αναζωπυρώσεις.

## **XV. Μετατροπή αρχείων Geotiff**

Η μορφή Geotiff είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για δεδομένα που σχετίζονται με πυρκαγιά[16], καθώς επιτρέπουν μια συμπαγή αναπαράσταση δεδομένων σε μεγάλα πλέγματα με χιλιάδες κελιά σε κάθε διεύθυνση. Για να μπορεί το geogrid να τα διαβάσει πρέπει να γίνει μετατροπή των αρχείων geotiff σε ενδιάμεση μορφή με τη χρήση ενός βοηθητικού προγράμματος. Για τη μετατροπή αρχικά πρέπει να δημιουργηθούν δύο νέοι φάκελοι μέσα στο WPS, ένας για κάθε πεδίο. Στη συνέχεια, με την εντολή `convert_geotiff` τα Geotiff μετατρέπονται σε δυαδικά αρχεία, τα οποία πρέπει να αποθηκευτούν στον αντίστοιχο φάκελο για τις κατηγορίες καυσίμων και το υψόμετρο.

## **XVI. Εκτέλεση του Geogrid**

Πρίν την εκτέλεση του geogrid, είναι απαραίτητο ο χρήστης να ορίσει τι πρέπει να υπάρχει μέσα στα νέα αρχεία, που βρίσκονται αυτά και τι είδους προεπεξεργασία χρειάζονται. Οι πληροφορίες αυτές εισάγονται μέσω του αρχείου GEOGRID.TBL, όπου πρέπει να προστεθούν δύο ενότητες, για τις κατηγορίες καυσίμων και το υψόμετρο. Οι υπόλοιπες απαραίτητες πληροφορίες υπάρχουν ήδη στο αρχείο.

Τέλος, το πρόγραμμα geogrid εκτελείται με την εντολή `./geogrid.exe`.

## **XVII. Λήψη ατμοσφαιρικών δεδομένων[17]**

## **XVIII. Εκτέλεση του Ungrib**

Πρίν την εκτέλεση του `ungrib`, πρέπει αρχικά να τροποποιηθούν οι αντίστοιχες ενότητες στο `namelist.wps`. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στην ενότητα `share` ορίζονται οι ημερομηνίες έναρξης και λήξης της προσομοίωσης, καθώς και το χρονικό βήμα. Στην ενότητα `ungrib` ορίζονται οι μεταβλητές `out_format` και `prefix`, που έχουν προκαθορισμένες τιμές. Η μεταβλητή `out_format`, αφορά τη μορφή των ενδιάμεσων αρχείων που δημιουργεί το `ungrib`, ενώ με την `prefix` ο χρήστης μπορεί να ορίσει ένα πρόθεμα για τα ενδιάμεσα αρχεία.

Στη συνέχεια, αφού έχει γίνει λήψη των αρχείων GRIB, πρέπει να συνδεθούν με το WPS. Αυτό συμβαίνει με την εντολή `link_grib.csh`, η οποία λαμβάνει ως παραμέτρους τα GRIB αρχεία που είναι απαραίτητα για την προσομοίωση και δημιουργεί μια σειρά συνδέσμων με προκαθορισμένη μορφή ονομασίας (`GRIBFILE.AAA`, `GRIBFILE.AAB`).

Πρέπει, επίσης, τα GRIB αρχεία να συνδεθούν με τα ονόματα αρχείων που απαιτεί το `ungrib`, με τη χρήση ενός `Vtable`. Το WPS διαθέτει αρχεία `Vtable` για πολλές μορφές μετεωρολογικών δεδομένων. Για αρχεία GFS, η συγκεκριμένη διαδικασία γίνεται με την εκτέλεση της εντολής `ln -s ungrid/Variable_Tables/Vtables.GFS Vtable`.

Τέλος, το πρόγραμμα `ungrib` εκτελείται με την εντολή `./ungrib.exe`.

## **XIX. Vtables**

Παρόλο που τα `Vtables` παρέχονται για πολλές βάσεις μετεωρολογικών δεδομένων, θα ήταν αδύνατο για το `ungrib` να προβλέψει όλες τις πηγές δεδομένων σε μορφή GRIB. Επομένως, όταν απαιτείται να γίνει επεξεργασία νέων πηγών, είναι δυνατό ο χρήστης να δημιουργήσει καινούριο `Vtable`.

Κάθε `Vtable` περιέχει εφτά ή έντεκα πεδία, ανάλογα με το αν το `Vtable` αφορά αρχεία GRIB Edition 1 ή GRIB Edition 2 αντίστοιχα. Τα πεδία των `Vtable` αντιστοιχούν σε μία από τρεις κατηγορίες: πεδία που περιγράφουν πώς τα δεδομένα αναγνωρίζονται μέσα στο GRIB αρχείο, πεδία που περιγράφουν πώς τα πεδία αναγνωρίζονται από τα προγράμματα `ungrib` και `metgrid` και εξειδικευμένα πεδία για αρχεία GRIB Edition 2.

## **XX. Εκτέλεση του Metgrid**

Το πρόγραμμα metgrid λαμβάνει τα αρχεία που έχουν δημιουργηθεί από το ungrib και το geogrid και τα συνδυάζει σε ένα σύνολο αρχείων.

Το metgrid εκτελείται με την εντολή ./metgrid.exe.

## **XXI. Εκτέλεση του WRF**

Μόλις ολοκληρωθούν τα βήματα που αφορούν το WPS, θα πρέπει να μεταφερθούν τα αρχεία που εξήγαγε το πρόγραμμα metgrid στο φάκελο em\_real του WRF, όπου θα τρέξει το μοντέλο. Θα πρέπει, επιπλέον να τροποποιηθεί το αρχείο namelist.input, που βρίσκεται στον ίδιο φάκελο, ώστε οι πληροφορίες που περιλαμβάνει να αντιστοιχούν σε αυτές του αρχείου namelist.wps, στο οποίο έχουν βασιστεί τα προγράμματα του WPS.

Αφού τροποποιηθεί κατάλληλα το namelist.input, με τα πραγματικά δεδομένα της πυρκαγιάς, είναι δυνατό να εκτελεστεί ο προεπεξεργαστής του WRF, με την εντολή ./real.exe.

Με την εκτέλεση του real.exe, δημιουργούνται τα απαραίτητα αρχεία για την εκτέλεση της πρόγνωσης, με την εντολή ./wrf.exe.

## **XXII. Έναρξη προσομοίωσης από περίμετρο**

Ένα συμβατικό μοντέλο ξεκινάει την προσομοίωση της πυρκαγιάς από ένα γνωστό σημείο έναυσης και σε γνωστό χρονικό σημείο. Έχει όμως ενδιαφέρον να ξεκινήσει η προσομοίωση από ήδη υπάρχουσα πυρκαγιά, η οποία έχει μόλις εντοπιστεί. Υπό αυτές τις συνθήκες το σημείο και ο χρόνος έναυσης δεν είναι γνωστά, ώστε να ξεκινήσει προσομοίωση και πρόβλεψη σε πραγματικό χρόνο. Επομένως, είναι επιθυμητή η έναρξη της προσομοίωσης με βάση την περίμετρο της πυρκαγιάς σε κάποια χρονική στιγμή[16]. Πρόβλημα αποτελεί το γεγονός ότι το ιστορικό της πυρκαγιάς, το οποίο δεν είναι γνωστό, επηρεάζει διάφορες παραμέτρους, όπως οι ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Η λύση είναι να δημιουργηθεί ένα τεχνητό ιστορικό της πυρκαγιάς βασισμένο στη δεδομένη περίμετρο, το διαθέσιμο καύσιμο και την κατάσταση της ατμόσφαιρας πριν τη συγκεκριμένη περίμετρο[18]. Το ιστορικό περιγράφεται ως η χρονική στιγμή κατά την οποία η φωτιά έφτασε σε κάθε κόμβο του πλέγματος του μοντέλου. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο τεχνητός χρόνος άφιξης αντί για το μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς ώστε να γίνει έναυση του καυσίμου και να παραχθεί η θερμότητα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Το τεχνητό ιστορικό της πυρκαγιάς επιτρέπει την σταδιακή καύση στη δεδομένη περίμετρο, αντί για την ταυτόχρονη έναυση όλων των σημείων μέσα σε αυτήν, επομένως επιτρέπει την ανάπτυξη της κυκλοφορίας στην ατμόσφαιρα.

Ο χρόνος άφιξης της φωτιάς στα σημεία μέσα στην περίμετρο υπολογίζεται με διάφορες μεθόδους. Αυτή που παρουσιάζεται στο [19] συνιστά την αντιστροφή της κατεύθυνσης του χρόνου, συνεπώς τον περιορισμό της φωτιάς σε ένα ή δύο σημεία έναυσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος καθορίζει τον χρόνο έναυσης ενός κόμβου, ως τον ενωρίτερο χρόνο κατά τον οποίο η φωτιά φτάνει στο συγκεκριμένο κόμβο από τους κόμβους οι οποίοι ήδη καίγονται. Για να δημιουργηθεί το τεχνητό ιστορικό, αντιστρέφεται η κατεύθυνση του χρόνου, γίνεται αντικατάσταση του ενωρίτερου χρόνου με τον μέγιστο και πραγματοποιείται μετάβαση από την περίμετρο της περιοχής προς το εσωτερικό της.

Αποδεικνύεται πως η συμβαστική προσομοίωση και η προσομοίωση από περίμετρο δίνουν παρόμοια αποτελέσματα[16]. Το σφάλμα που προκύπτει κατά την

προσομοίωση από περίμετρο οφείλεται κυρίως στις μεταβολές του ανέμου που προκύπτουν λόγω του τεχνητού ιστορικού.

## **5. Πραγματική πυρκαγιά**

Οι πυρκαγιές του 2018 αποτέλεσαν για την Καλιφόρνια τις πιο θανατηφόρες και καταστροφικές στην ιστορία. Με 103 επιβεβαιωμένους θανάτους, 24,226 κατεστραμένα κτήρια και 8,527 πυρκαγιές να καίνε 7,992 τετραγωνικά χιλιόμετρα, δηλαδή περίπου το 2% της επιφάνειας του εδάφους της Καλιφόρνια. Ήταν η μεγαλύτερη επιφάνεια καμμένης γης που είχε καταγραφεί μέχρι το 2018. Μέχρι το τέλος Αυγούστου του 2018, η CAL Fire (California Department of Forestry and Fire Protection) είχε δαπανήσει 432 εκατομμύρια δολάρια μόνο για τις επιχειρήσεις καταστολής. Συνολικά το κόστος που επέφεραν οι πυρκαγιές του 2018 ανέρχεται στα 26 δισεκατομμύρια δολάρια.

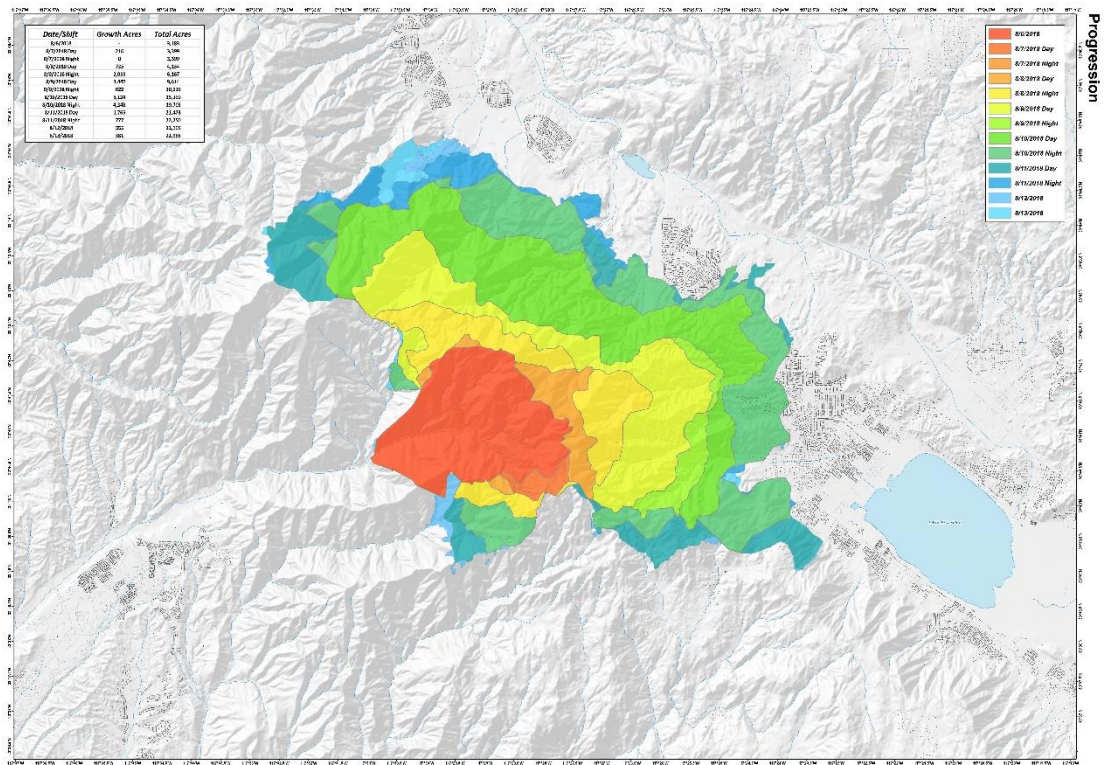
Με σκοπό τη μελέτη του προγνωστικού συστήματος WRF-FIRE, επιλέχθηκε μια πραγματική πυρκαγιά, με τα δεδομένα της οποίας θα πραγματοποιηθεί η πρόγνωση. Στη συνέχεια θα είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα εξάγει το σύστημα με την πραγματική πυρκαγιά.

### **XXIII. Holy Fire**

Η πυρκαγιά που επιλέχθηκε για την προσομοίωση (Holy Fire), έλαβε χώρα σε κομητεία της Καλιφόρνια[20] και συγκεκριμένα στο Εθνικό Δάσος Κλίβελαντ. Η πυρκαγιά ξεκίνησε στις 6 Αυγούστου 2018 και ήταν αποτέλεσμα εμπρησμού. Μέχρι να τεθεί υπό έλεγχο στις 13 Σεπτεμβρίου 2018, η καμένη περιοχή έφτασε τα ενενήντα τέσσερα τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Μέχρι τις 13 Αυγούστου η πυρκαγιά είχε καταστρέψει 18 κτήρια, τα οποία είναι συνολικά οι υλικές καταστροφές και μέχρι το τέλος τραυματίστηκαν συνολικά 3 πυροσβέστες.

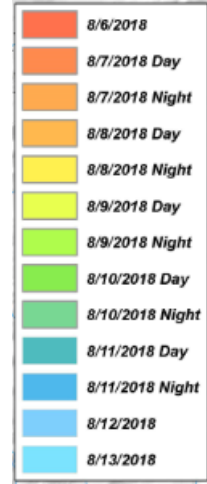
Η πυρκαγιά ξεκίνησε, κατά προσέγγιση, στις 13:30 στο σημείο με γεωγραφικό πλάτος 33,691 και γεωγραφικό μήκος -117,521.



**Holy Fire**  
CA-CNF-002664  
Progression



<b>Date/Shift</b>	<b>Growth Acres</b>	<b>Total Acres</b>
8/6/2018	-	3,183
8/7/2018 Day	216	3,399
8/7/2018 Night	0	3,399
8/8/2018 Day	735	4,134
8/8/2018 Night	2,033	6,167
8/9/2018 Day	3,447	9,614
8/9/2018 Night	622	10,236
8/10/2018 Day	5,124	15,360
8/10/2018 Night	4,348	19,708
8/11/2018 Day	1,765	21,473
8/11/2018 Night	777	22,250
8/12/2018	355	22,605
8/13/2018	381	22,986



**Εικόνα 5:** Απεικόνιση της εξέλιξης της πυρκαγιάς χρονικά και χωρικά

Στην παραπάνω εικόνα, φαίνεται η εξέλιξη της πυρκαγιάς από τη στιγμή της έναυσης έως τη στιγμή που τέθηκε υπο έλεγχο. Παρόλα αυτά, για πρακτικούς λόγους στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα προσομοιωθούν οι τρεις πρώτες ημέρες της πυρκαγιάς.

## XXIV. Προσομοίωση

Αρχικά έγινε λήψη των απαραίτητων δεδομένων (κατηγορίες καυσίμων και υψόμετρο) για την περιοχή που θα προσομοιωθεί, καθώς και τα απαραίτητα ατμοσφαιρικά δεδομένα κατά τη χρονική περίοδο της πυρκαγιάς.

Για τη διαμόρφωση της περιοχής τροποποιήθηκε το αρχείο namelist.wps ως εξής:

```
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 1,
start_date = '2018-08-06_12:00:00',
end_date   = '2018-08-09_12:00:00',
interval_seconds = 21600
io_form_geogrid = 2,
subgrid_ratio_x = 10,
subgrid_ratio_y = 10,
/

&geogrid
parent_id      = 1,
parent_grid_ratio = 1,
i_parent_start = 1,
j_parent_start = 1,
e_we          = 123,
e_sn          = 150,
geog_data_res = '30s',
dx = 60,
dy = 60,
map_proj = 'lambert',
ref_lat  = 33.71,
ref_lon  = -117.485,
truelat1 = 39.338,
truelat2 = 39.338,
stand_lon = -106.807,
geog_data_path = '/home/rsot/Build_WRF/WPS_GEOG'
/

&ungrib
out_format = 'WPS',
prefix = 'FILE',
/

&metgrid
fg_name = 'FILE'
io_form_metgrid = 2,
/
```

**Εικόνα 6:** Αρχείο namelist.wps

Στην ενότητα share ορίστηκαν ως έναρξη και λήξη της προσομοίωσης τα πρώτα τρία εικοσιτεράωρα, καθώς και το χρονικό διάστημα μεταξύ των πραγματικών μετεωρολογικών δεδομένων σε δευτερόλεπτα (interval\_seconds). Οι μεταβλητές



subgrid\_ratio\_x και subgrid\_ratio\_y δηλώνουν τη σμίκρυνση του πλέγματος της πυρκαγιάς σε σχέση με το ατμοσφαιρικό.

Στην ενότητα geogrid αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν οι συντεταγμένες του κέντρου του χάρτη που θα δημιουργηθεί (ref\_lat, ref\_lon), το μέγεθος του πλέγματος στους άξονες x και y (e\_we, e\_sn) και η ανάλυσή του (dx, dy). Η τοποθεσία των δεδομένων ορίζεται με τη μεταβλητή geog\_data\_path.

Από τα υπάρχοντα δεδομένα το geogrid εξάγει εκείνα που χρειάζεται για τη συγκεκριμένη περιοχή. Επιπλέον, τα δεδομένα που αφορούν τις κατηγορίες καυσίμων και το υψόμετρο, πρέπει να προστεθούν στο αρχείο GEOGRID.TBL, το οποίο βρίσκεται στο WPS και εξ ορισμού περιλαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες για το ατμοσφαιρικό μοντέλο.

Στη συνέχεια είναι δυνατή η εκτέλεση των geogrid, ungrib και metgrid όπως έχει περιγραφεί.

Για την εκτέλεση του WRF, πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα το αρχείο namelist.input που βρίσκεται στο φάκελο em\_real.

Τα πρώτα πεδία του namelist.input, τα οποία απαιτούν τροποποίηση, αφορούν τη χρονική στιγμή της έναρξης της πυρκαγιάς (time\_control) και τη διαμόρφωση της περιοχής (domains). Οι πληροφορίες αυτές θα πρέπει να ταυτίζονται με τις αντίστοιχες στο namelist.wps.

```

&time_control
run_days           = 0,
run_hours          = 0,
run_minutes        = 0,
run_seconds        = 0,
start_year         = 2018,
start_month        = 08,
start_day          = 06,
start_hour         = 12,
start_minute       = 00,
start_second       = 00,
end_year           = 2018,
end_month          = 08,
end_day            = 08,
end_hour           = 14,
end_minute         = 00,
end_second         = 00,
interval_seconds   = 21600
input_from_file    = .true.,
history_interval_s = 60,
frames_per_outfile = 10000,
restart            = .false.,
restart_interval   = 60,
io_form_history    = 2
io_form_restart    = 2
io_form_input      = 2
io_form_boundary   = 2
debug_level        = 1
/

&domains
time_step          = 0,
time_step_fract_num = 5,
time_step_fract_den = 20,
max_dom            = 1,
s_we               = 1,
e_we               = 123,
s_sn               = 1,
e_sn               = 150,
s_vert             = 1,
e_vert             = 30,
num_metgrid_levels = 32
dx                 = 60,

```

**Εικόνα 7:** Αρχείο namelist.input

```

&fire ! be sure to set sr_x,sr_y in domains-
namelist (to set refinement in x,y)
  ifire          = 2,      ! integer, = 0: no
fire, = 2: SFIRE
!
  fire_fuel_read    = -1,    ! integer, 0= use
fire_fuel_cat, 1= by altitude 2= read from file
  fire_fuel_cat     = 3,    ! integer, if
specified which fuel category?

! ignition
  fire_num_ignitions = 1,      ! integer, only
the first fire_num_ignition used, up to 5 allowed
  fire_ignition_start_lon1=-117.516667, ! start
points of ignition lines, longitude
  fire_ignition_start_lat1 = 33.678889, ! start
points of ignition lines,latitude
  fire_ignition_end_lon1 = -117.516667, ! end
points of ignition lines
  fire_ignition_end_lat1 = 33.678889, ! end
points of ignition lines

```

### **Εικόνα 8:** Αρχείο namelist.input

Όπως φαίνεται παραπάνω (Εικόνα 7), στο αρχείο namelist.input πρέπει να προσδιορίζονται ο αριθμός των σημείων έναυσης που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση, καθώς και το γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος των σημείων αυτών.

Πολύ σημαντική παράμετρο της προσομοίωσης, αποτελεί το χρονικό βήμα (time\_step)[21], που βρίσκεται και ως μεταβλητή στο αρχείο namelist.input. Όσο μεγαλύτερη η χωρική ανάλυση της υπο μελέτη περιοχής, δηλαδή όσο μικρότερο το πλέγμα, τόσο μικρότερο θα πρέπει να είναι και το χρονικό βήμα, το οποίο επίσης διαφέρει σημαντικά από το ατμοσφαιρικό μοντέλο. Επιπλέον, η προσομοίωση σε WRF-FIRE με υψηλής ανάλυσης τοπογραφικά δεδομένα, οδηγεί στις περισσότερες περιπτώσεις σε περιορισμό του μέγιστου χρονικού βήματος που προσφέρει αριθμητική σταθερότητα.

## 6. Αποτελέσματα

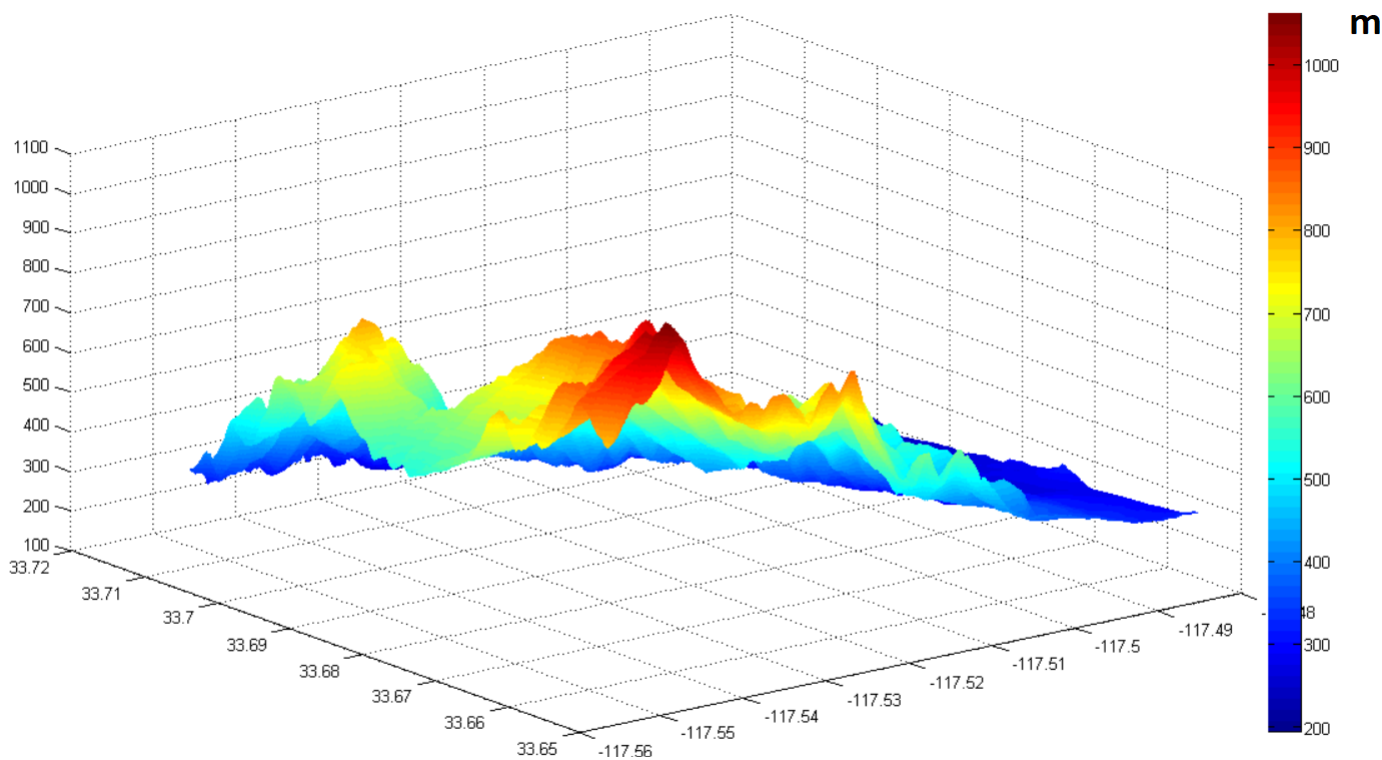
Τα αποτελέσματα της εκτέλεσης του WRF-FIRE εξάγονται σε ένα αρχείο με δεδομένα της μορφής netCDF. Το συγκεκριμένο αρχείο περιλαμβάνει μεταβλητές που απεικονίζουν τις ιδιότητες του εδάφους της υπο μελέτη περιοχής, καθώς και άλλες που περιγράφουν τις ιδιότητες της πυρκαγιάς, την περίμετρό της σε κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή την εξέλιξή της, τη θερμοκρασία του εδάφους, τους ανέμους, τη ροή θερμότητας. Υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων μεταβλητών προς απεικόνιση, όμως στα πλαίσια της παρούσας εργασίας θα παρουσιαστούν μερικές από αυτές.

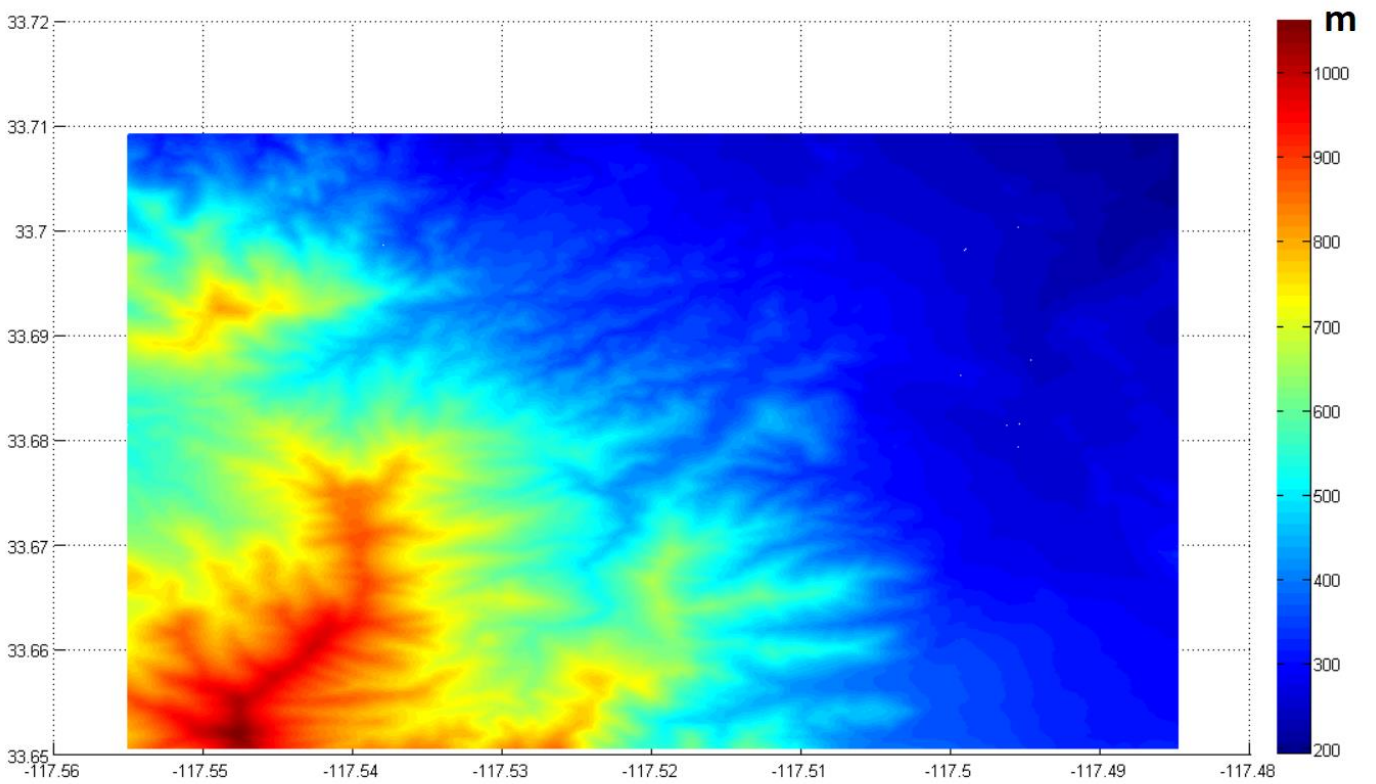
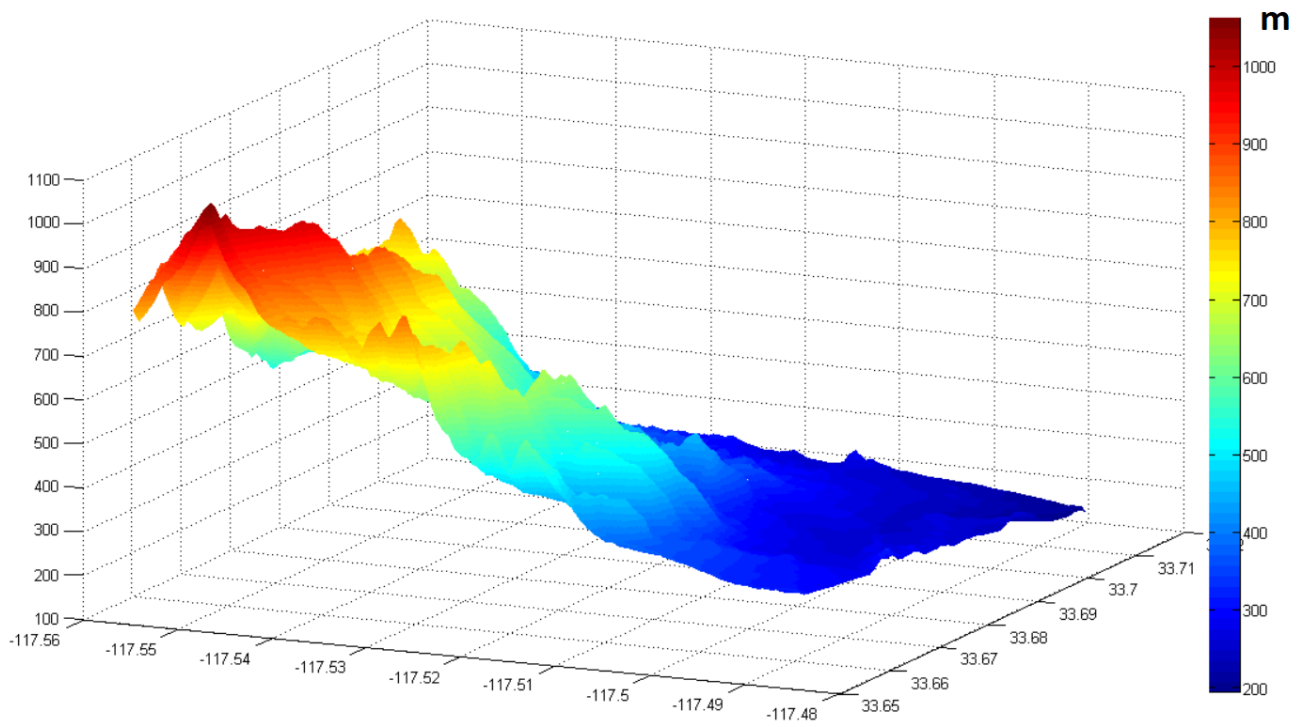
Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του Matlab και του IDV (Integrated Data Viewer).

### XXV. Ιδιότητες του εδάφους

Αρχικά, είναι σκόπιμο να παρουσιαστεί το έδαφος της περιοχής.

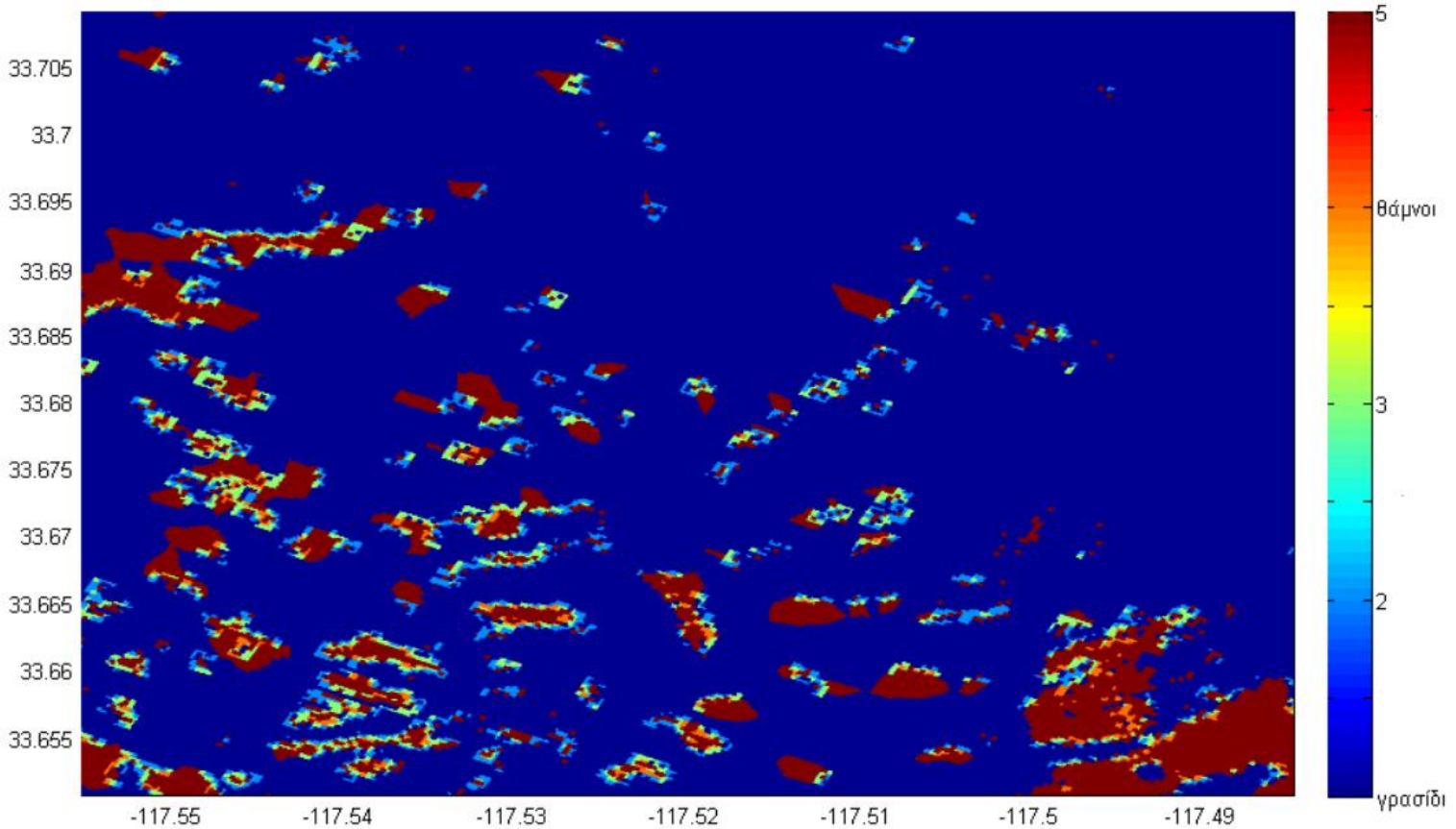
- Με τη μεταβλητή ZSF απεικονίζεται το υψόμετρο σε μέτρα, το οποίο όπως φαίνεται φτάνει μέχρι και τα 1100 μέτρα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας.





Εικόνα 9: Υψόμετρο της περιοχής

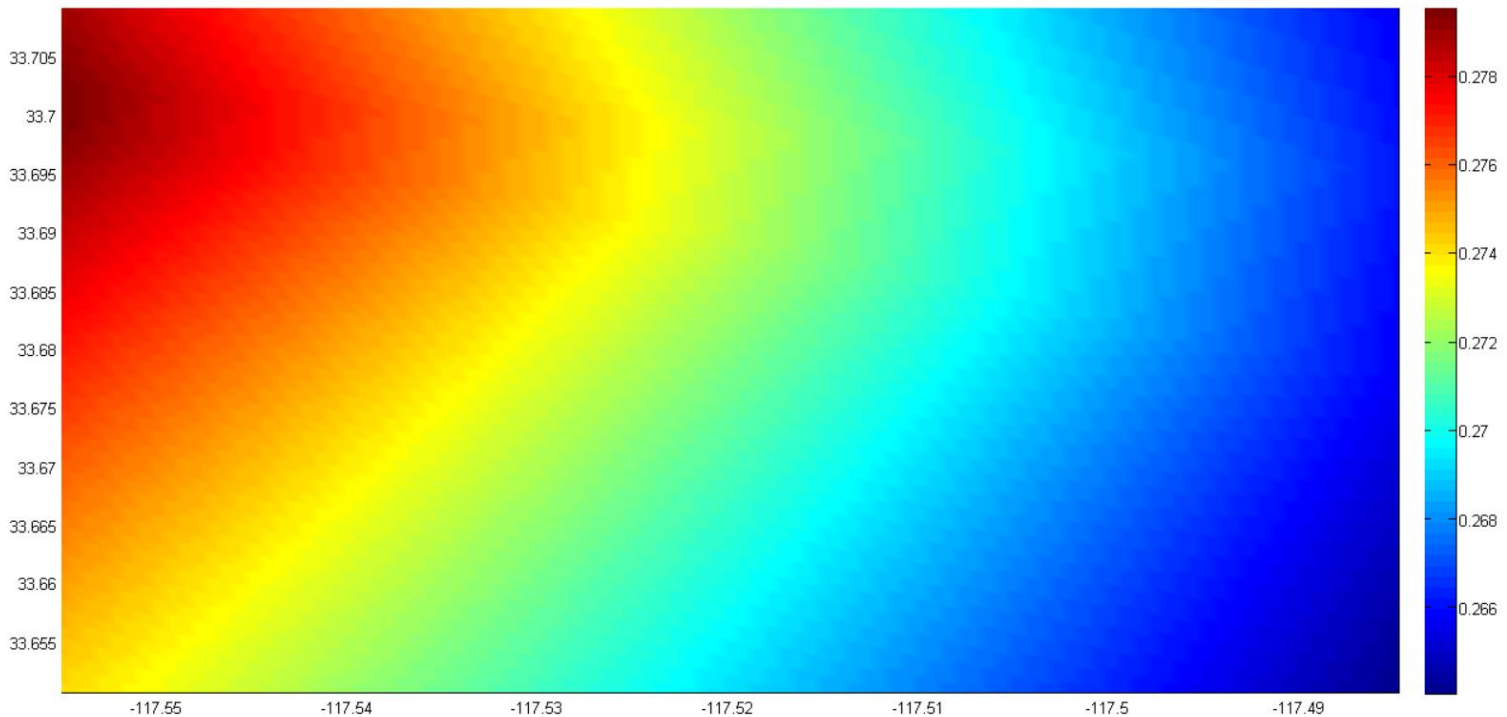
- Η μεταβλητή NFUEL\_CAT απεικονίζει τις κατηγορίες καυσίμων όπως έχουν προαναφερθεί.



**Εικόνα 10:** Κατηγορίες καυσίμων

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, η υπό μελέτη περιοχή αποτελείται από πέντε από τις 13 κατηγορίες καυσίμων Anderson, στις οποίες περιλαμβάνονται το γρασίδι και οι θάμνοι. Επομένως, είναι δυνατόν, γνωρίζοντας το διαθέσιμο καύσιμο, να γίνουν υποθέσεις για τη μορφή της πυρκαγιάς. Σύμφωνα, λοιπόν, με τις κατηγορίες καυσίμων, η πυρκαγιά θα είναι επιφανειακή και με σχετικά γρήγορη εξάπλωση λόγω του γρασιδιού και του ποώδους καυσίμου.

- Με τη μεταβλητή SMOIS παρουσιάζεται η υγρασία του εδάφους.

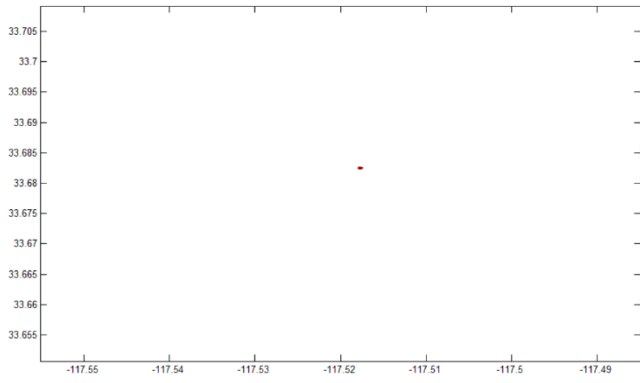


**Εικόνα 11:** Υγρασία του εδάφους

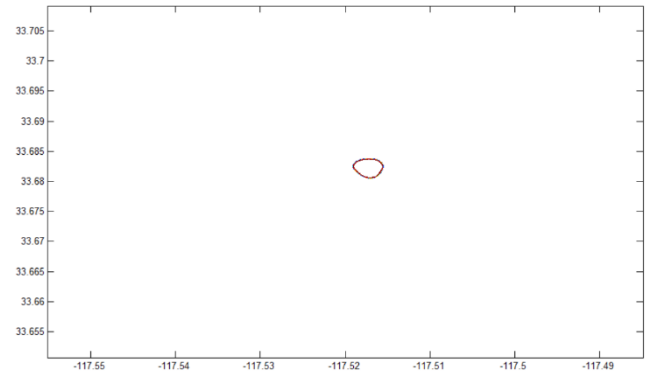
## **XXVI. Αποτελέσματα της πυρκαγιάς**

Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο αποτελεί η περίμετρος της πυρκαγιάς σε κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή η εξέλιξή της. Το προγνωστικό σύστημα χρησιμοποιείται με σκοπό την ελαχιστοποίηση των καταστροφών και την όσο το δυνατόν συντομότερη καταστολή της πυρκαγιάς, επομένως η πρόβλεψη της χωρικής εξέλιξής της είναι πρακτικά το βασικότερο ζητούμενο.

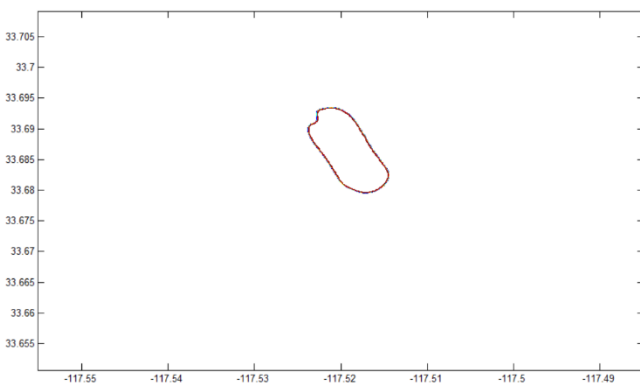
- Η μεταβλητή FIRE\_AREA απεικονίζει την περίμετρο της πυρκαγιάς σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η περίμετρος στα 100, 200, 300, 400, 500, 600 και 700 πρώτα λεπτά της προσομοίωσης. Ο χρόνος έναρξης της προσομοίωσης είναι 12:00 μ.μ. και δεν ταυτίζεται με το χρόνο έναρξης της πυρκαγιάς (13:30 μ.μ.).



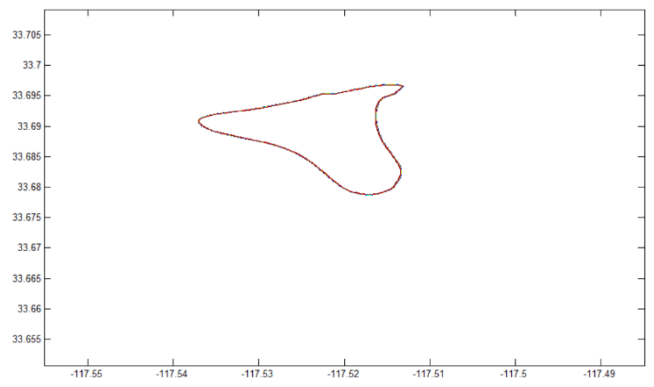
**Εικόνα 12:** Περίμετρος της φωτιάς στα 100 λεπτά



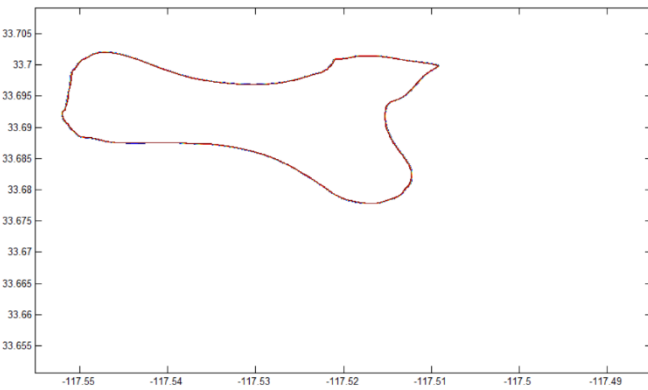
**Εικόνα 13:** Περίμετρος της φωτιάς στα 200 λεπτά



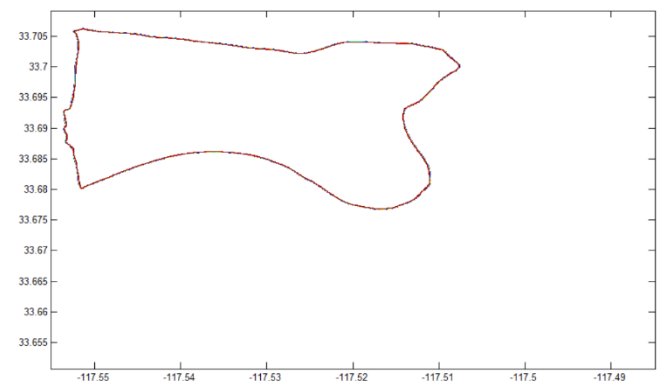
**Εικόνα 14:** Περίμετρος της φωτιάς στα 300 λεπτά



**Εικόνα 15:** Περίμετρος της φωτιάς στα 400 λεπτά

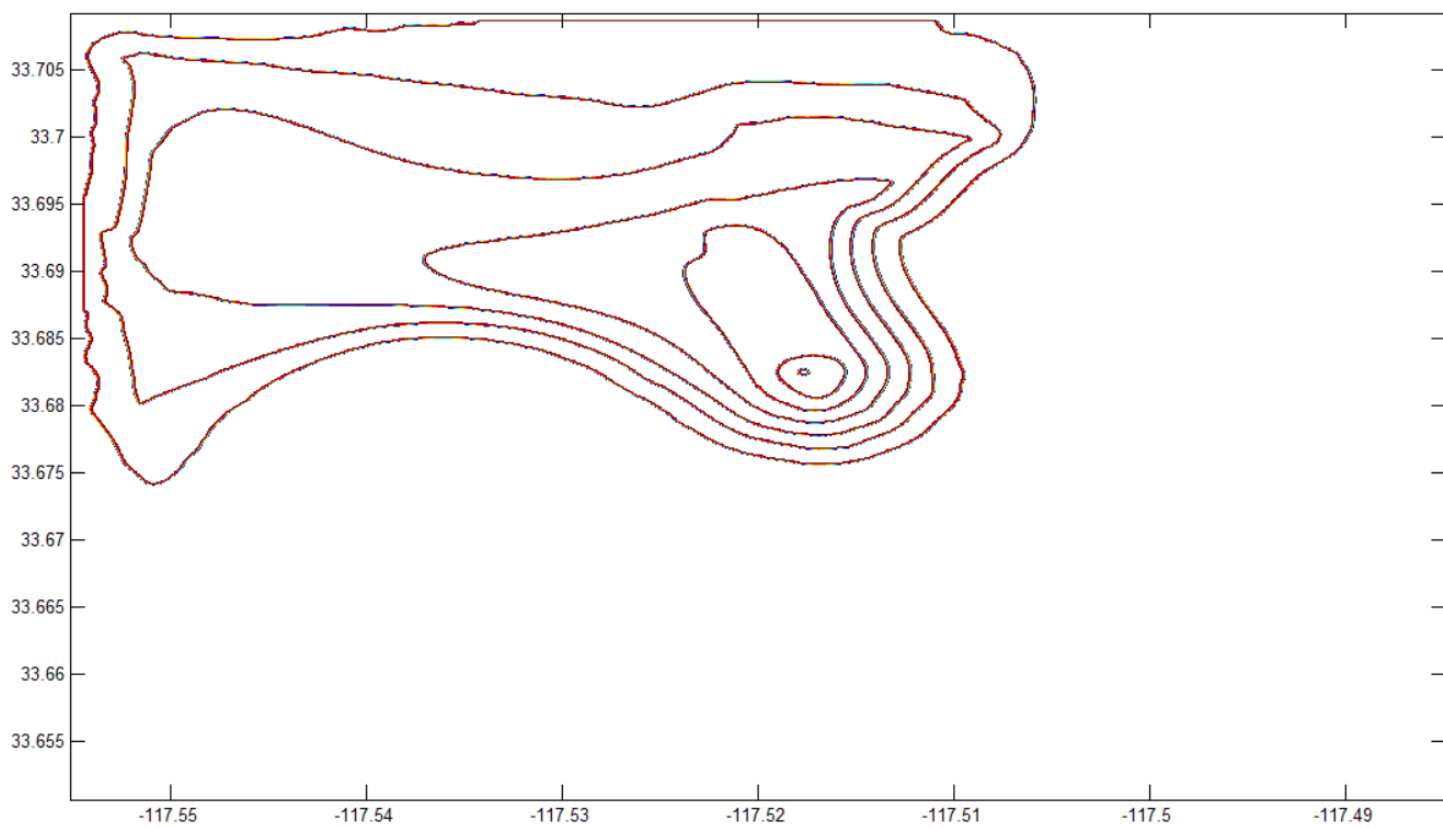


**Εικόνα 16:** Περίμετρος της φωτιάς στα 500 λεπτά



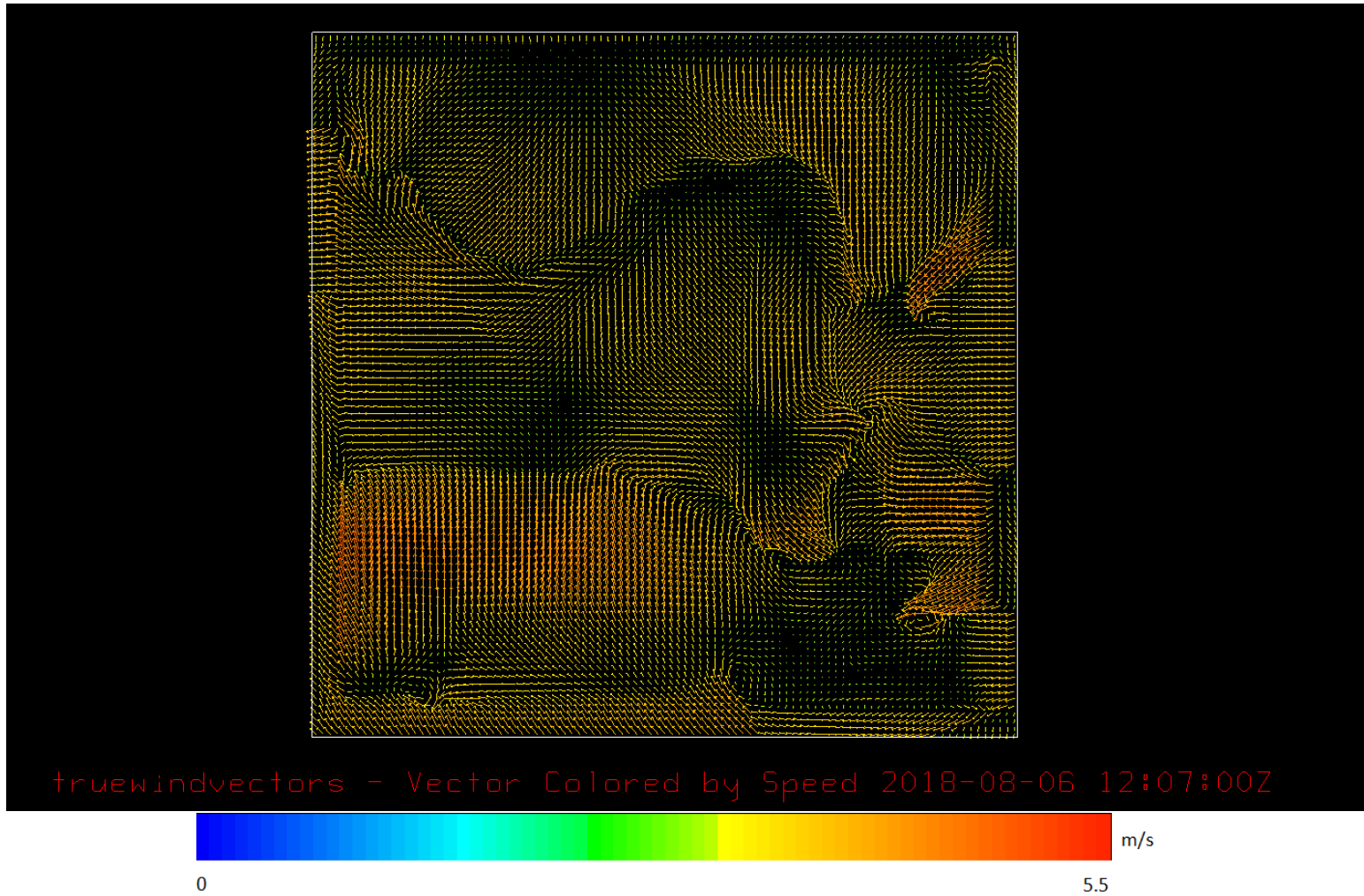
**Εικόνα 17:** Περίμετρος της φωτιάς στα 600 λεπτά



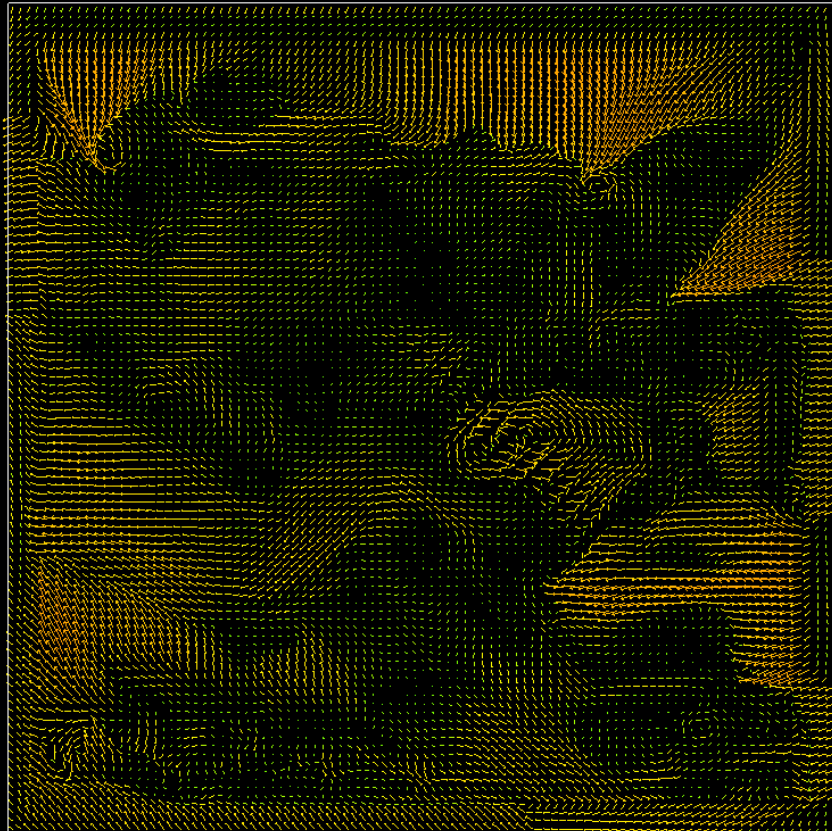


**Εικόνα 18:** Συνολική περίμετρος πυρκαγιάς μέχρι και τα 700 λεπτά

- Μία ακόμα πολύ σημαντική παράμετρος για την εξέλιξη της πυρκαγιάς είναι ο άνεμος.



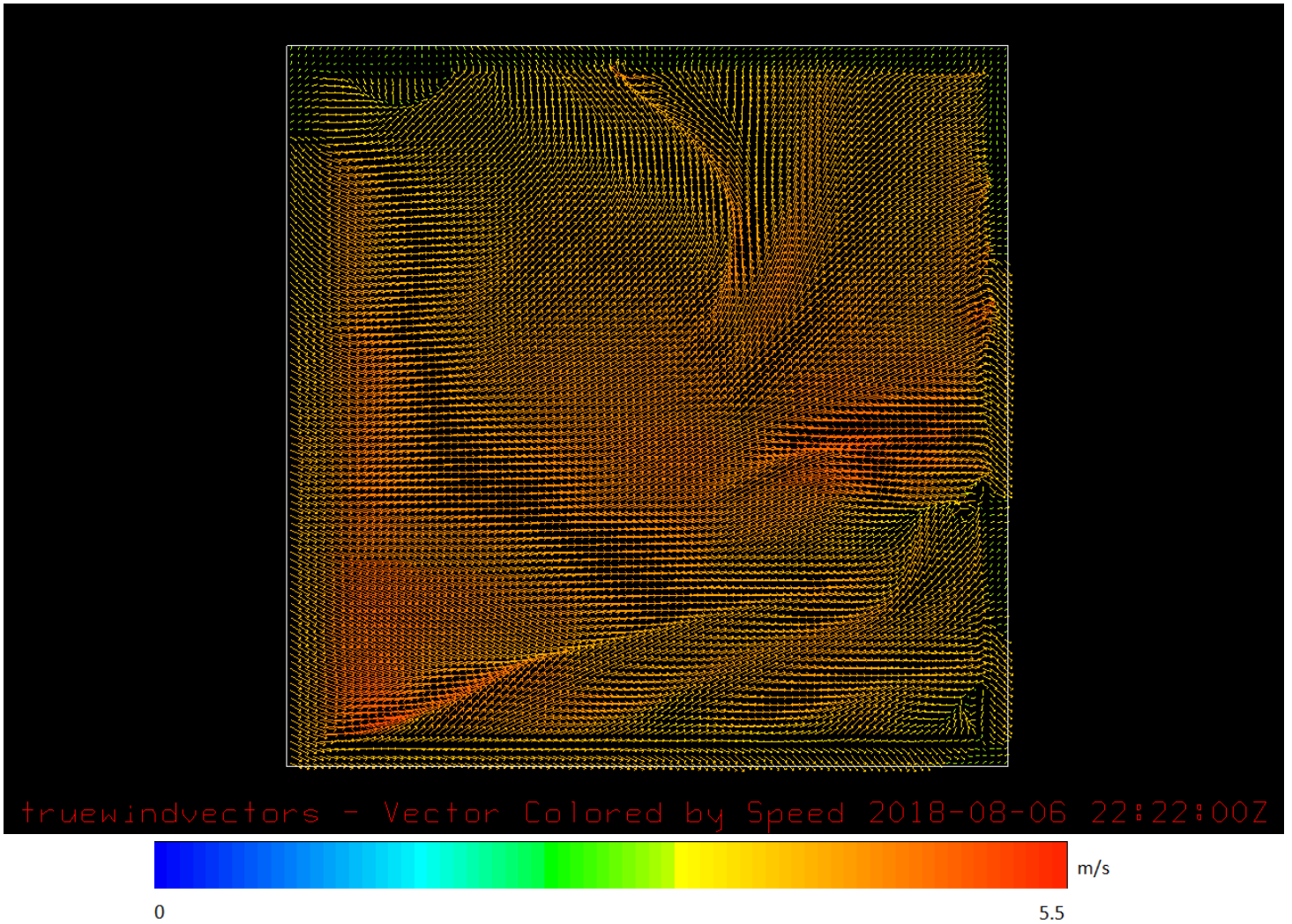
**Εικόνα 19:** Άνεμος πριν την πυρκαγιά



truwindvectors - Vector Colored by Speed 2018-08-06 13:37:00Z



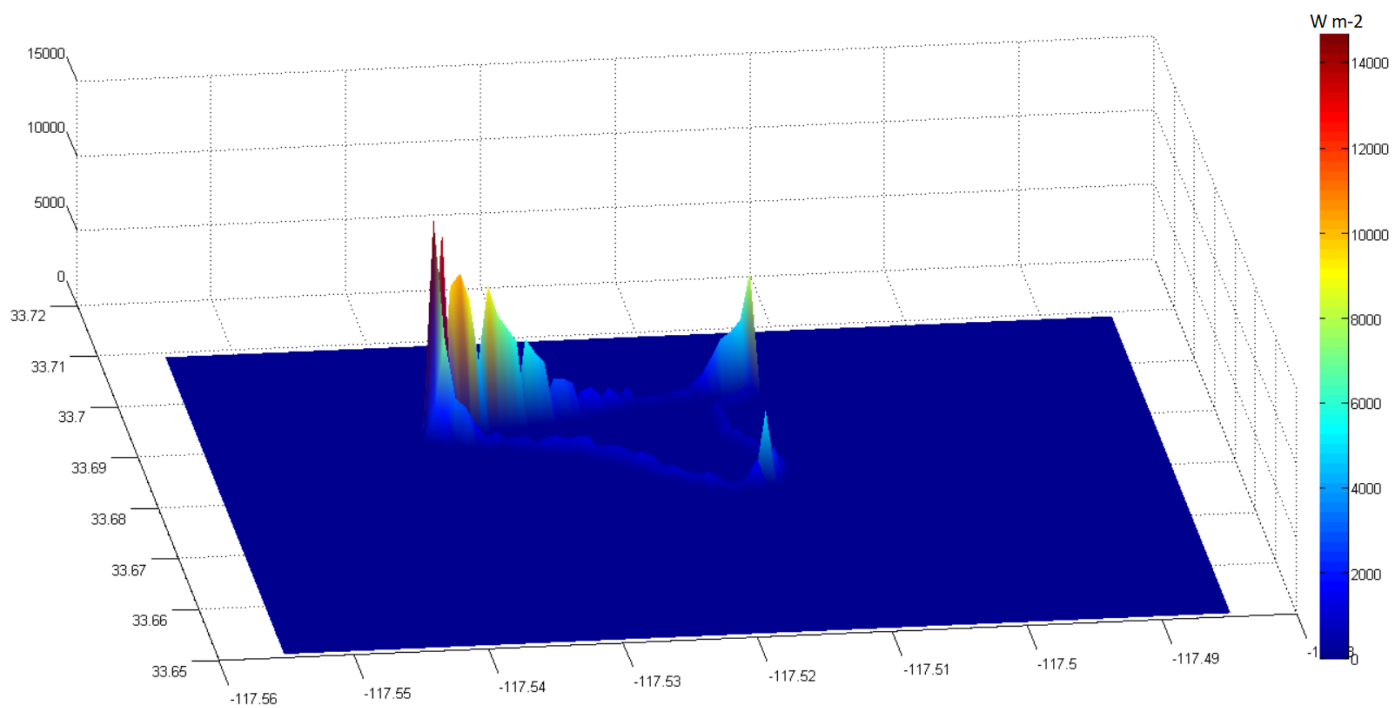
**Εικόνα 20:** Άνεμος αμέσως μετά την έναρξη της πυρκαγιάς



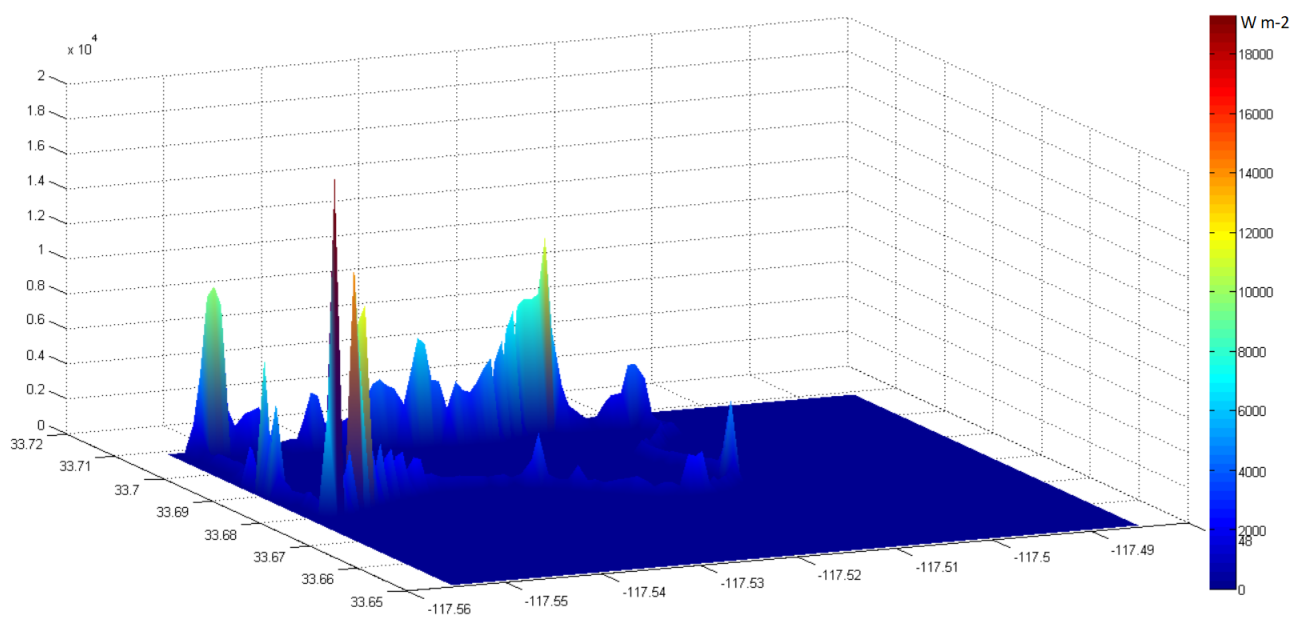
**Εικόνα 21:** Άνεμος κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς

Παρόλο που οι άνεμοι δεν είναι αρκετά ισχυροί, είναι εμφανές πως μετά την έναυση της πυρκαγιάς οι τιμές αρχίζουν να αυξάνονται. Ο άνεμος είναι καθοριστικός παράγοντας και δεν επηρεάζει με τον ίδιο τρόπο όλα τα είδη της καύσιμης ύλης. Με βάση το υπάρχον καύσιμο στη συγκεκριμένη περιοχή, εξάγεται το συμπέρασμα πως η μετάδοση της πυρκαγιάς θα είναι αρκετά γρήγορη.

- Παρακάτω παρουσιάζεται η ροή θερμότητα από την επιφανειακή φωτιά σε διάφορες χρονικές στιγμές.

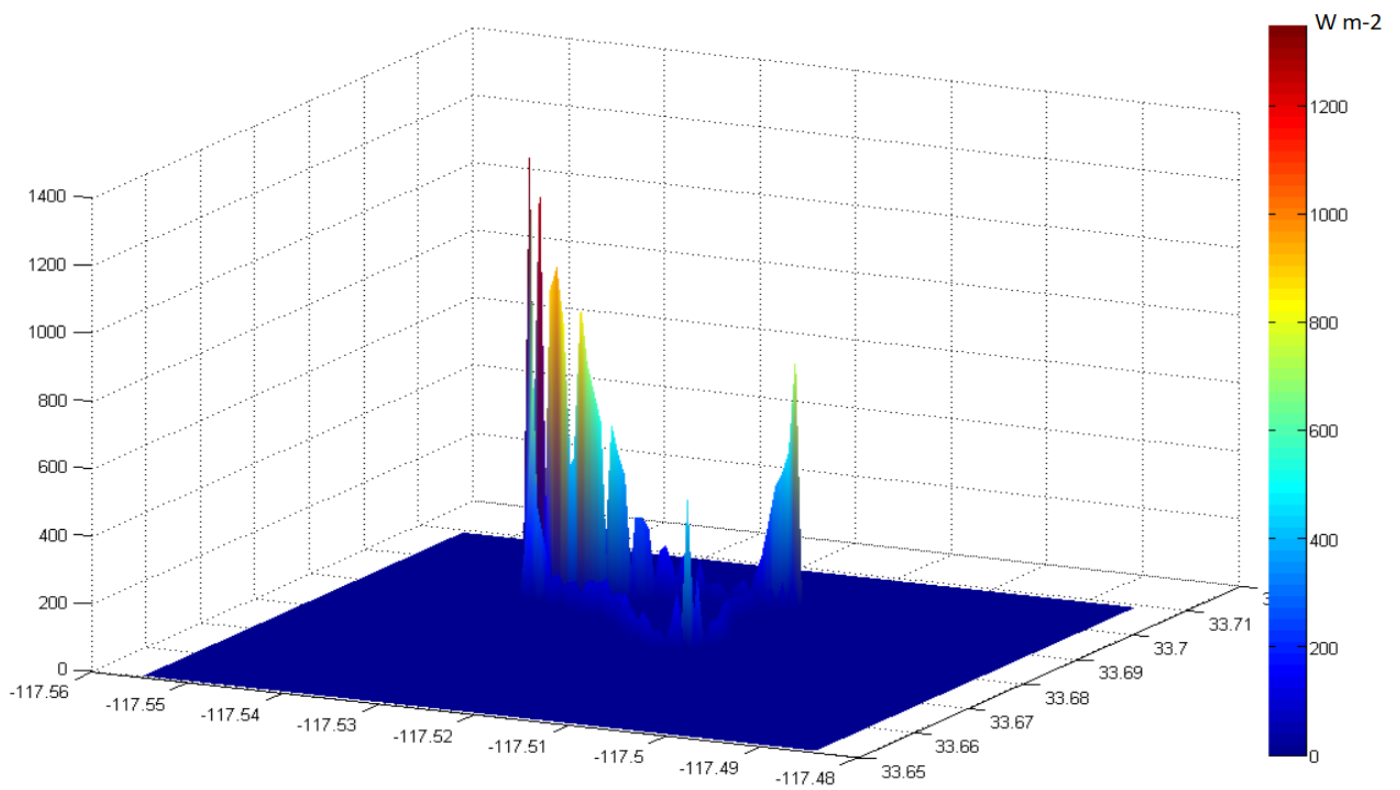


**Εικόνα 22:** Ροή θερμότητας στα 400 λεπτά

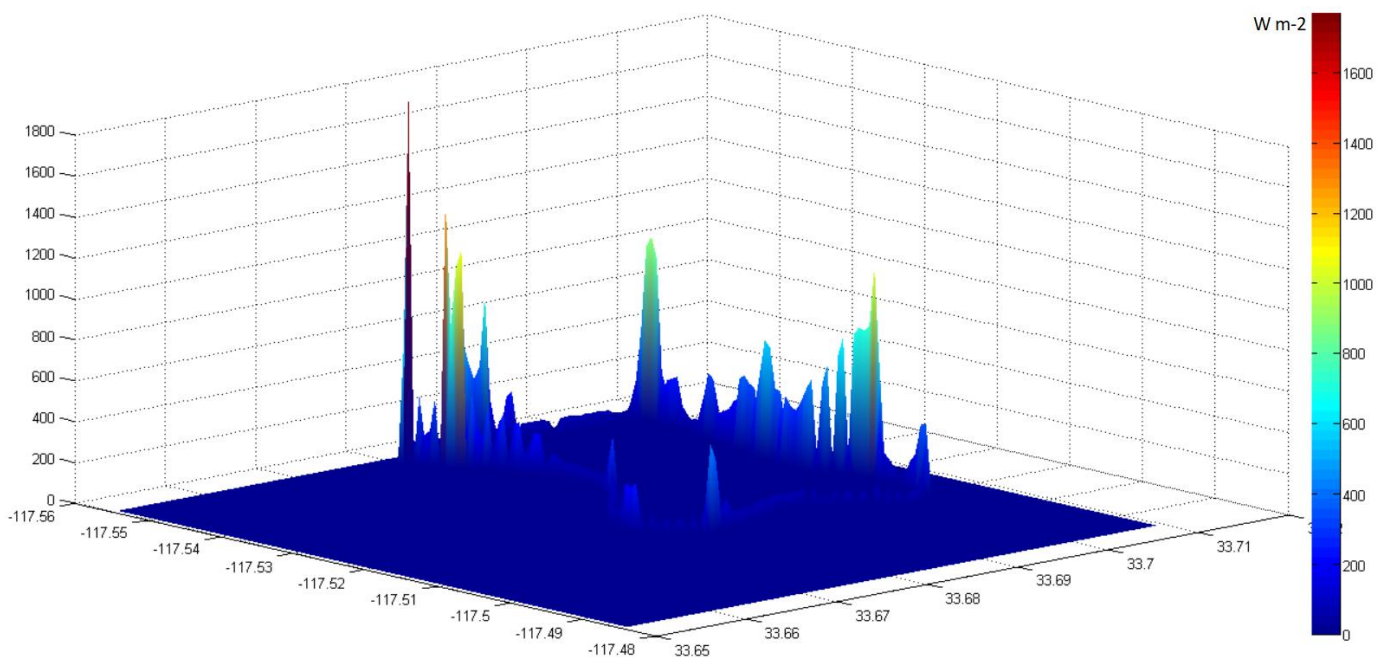


**Εικόνα 23:** Ροή θερμότητας στα 600 λεπτά

- Τέλος παρουσιάζεται η ροή λανθάνουσας θερμότητας για τις ίδιες χρονικές στιγμές.



**Εικόνα 24:** Ροή λανθάνουσας θερμότητας στα 400 λεπτά



**Εικόνα 25:** Ροή λανθάνουσας θερμότητας στα 600 λεπτά

## 7. Σχολιασμός

Η πυρκαγιά αποτελεί ένα φαινόμενο, το οποίο είναι δύσκολο να προβλεφθεί και να αντιμετωπιστεί. Όπως προαναφέρθηκε, η έναρξη μιας πυρκαγιάς μπορεί να είναι αποτέλεσμα φυσικών αιτιών αλλά και ανθρώπινων ενεργειών. Άσχετα, όμως, από τον τρόπο που θα προκληθεί, παρατηρείται ότι είναι ένα πρόβλημα που συνεχώς αυξάνεται και το οποίο έχει συνέπειες άμεσα ή έμμεσα στο περιβάλλον αλλά και την ανθρώπινη κοινωνία και οικονομία. Επομένως, είναι απαραίτητο να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης, ώστε να μετριάζονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι καταστροφές. Η πρόγνωση της εξέλιξης μιας πυρκαγιάς μπορεί να βοηθήσει στην αποτελεσματικότερη οργάνωση και έγκαιρη καταστολή της, πρωτού ξεφύγει από κάθε έλεγχο.

Η παρούσα προσομοίωση είχε πολλές απαιτήσεις και δυσκολίες στην υλοποίησή της. Τα δεδομένα που απαιτούνται για να τρέξει το μοντέλο WRF-FIRE είναι πολυπληθή και με μεγάλη ακρίβεια. Πιο συγκεκριμένα, για τα δεδομένα του εδάφους χρειάστηκαν χάρτες υψηλής ακρίβειας, οι οποίοι ήταν αδύνατο να βρεθούν για το γεωγραφική περιοχή της Ελλάδας. Για το λόγο αυτό, στραφήκαμε στα ελεύθερα και λεπτομερή δεδομένα που διατίθενται για την περιοχή των Ηνωμένων Πολιτειών.

Αφού πραγματοποιήθηκε η λήψη των δεδομένων για την κατάλληλη υποπεριοχή, ήταν απαραίτητη η μετατροπή τους σε διαφορετική μορφή, η οποία επιτρέπει την κατάλληλη αναπαράστασή τους στο πλέγμα με τα χιλιάδες κελιά. Επιπλέον, εξαιτίας του γεγονότος πως το ατμοσφαιρικό μοντέλο δεν περιλαμβάνει τις πληροφορίες αυτές, έπρεπε να τροποποιηθεί κατάλληλα το σύστημα ώστε τελικά να συμπεριληφθούν.

Επειδή η πυρκαγιά είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο και οι διεργασίες της λαμβάνουν χώρα σε επίπεδο εκατοστών και δευτερολέπτων, είναι απαραίτητο το λεπτό πλέγμα με πολλούς κόμβους και ανάλυση ανά δευτερόλεπτο. Δηλαδή, το μοντέλο τρέχει για κάθε δευτερόλεπτο πραγματικού χρόνου. Αυτό έχει ως συνέπεια μεγάλους χρόνους επεξεργασίας λόγω της έλλειψης της απαραίτητης υπολογιστικής ισχύος. Επιπλέον το αρχείο που τελικά εξάγεται από το WRF-FIRE έχει τεράστιο όγκο και είναι δύσκολα διαχειρίσιμο.

Αρχικά προσομοιώθηκαν τρεις ημέρες της πραγματικής πυρκαγιάς με αποτέλεσμα το εξαγόμενο αρχείο να έχει όγκο 1 Terabyte. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε να πραγματοποιηθεί μια δεύτερη προσομοίωση μικρότερης περιοχής και διάρκειας δώδεκα ωρών, ώστε να καταστεί δυνατό να γίνει η επεξεργασία των αποτελεσμάτων, τα οποία τελικά παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης προσομοίωσης μας δίνουν εικόνα της εξέλιξης της πυρκαγιάς, γεγονός πρακτικά χρήσιμο, καθώς αποτελεί βασική πληροφορία για την καταστολή της. Προφανώς, τα αποτελέσματα δεν είναι απόλυτα ακριβή, πράγμα που ήταν αναμενόμενο. Εάν υπήρχε η δυνατότητα να προσομοιωθούν περισσότερες ημέρες της πυρκαγιάς, είναι πιθανό τα αποτελέσματα που θα εξάγονταν να ήταν περισσότερο αντιπροσωπευτικά. Παρόλα αυτά, με βάση τα δεδομένα που διαθέτουμε για τη πραγματική πυρκαγιά, καταφέραμε να εξάγουμε μια ικανοποιητική αναπαράσταση του μεγέθους της επιφάνειας που κάηκε στο χρονικό διάστημα της προσομοίωσης καθώς και του ρυθμού εξέλιξης της πυρκαγιάς.

Παρά το γεγονός πως τα αποτελέσματα επιδέχονται βελτίωση, ο σκοπός της πρόγνωσης είναι εφικτός. Το πρόβλημα της πυρκαγιάς είναι πρακτικό και η μελέτη του συμβαίνει για να βοηθήσει στην αντιμετώπισή του. Εφόσον έχουμε μια καλή επεικόνιση των παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω, θα είναι εφικτό να δοθεί κάποια κατεύθυνση στις επιχειρήσεις καταστολής ώστε να γίνουν όσο το δυνατόν πιο αποτελεσματικές.

Μελλοντικά θα μπορούσε να γίνει κάποια βελτίωση των παραμέτρων την προσομοίωσης, ώστε παρά την έλλειψη υπολογιστικής ισχύος να καταστεί δυνατή η επέκταση του χρόνου της προσομοίωσης και η βελτίωση των αποτελεσμάτων.



## XXVII. Βιβλιογραφία

1. Gill, A.M., S.L. Stephens, and G.J. Cary, *The worldwide "wildfire" problem*. Ecological Applications, 2013. **23**(2): p. 438-454.
2. Finney, M.A., et al., *An examination of fire spread thresholds in discontinuous fuel beds*. International Journal of Wildland Fire, 2010. **19**(163-170).
3. Gill, A.M. and S.L. Stephens, *Scientific and social challenges for the management of fire-prone wildland–urban interfaces*. Environmental Research Letters, 2009. **4**(3): p. 034014.
4. Cruz, M.G., B.W. Butler, and M.E. Alexander, *Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part II: model evaluation*. International Journal of Wildland Fire, 2006. **15**(1): p. 61-72.
5. Rothmel, R.C., *Predicting behavior and size of crown fires in the northern Rocky Mountains*. 1991. p. 46.
6. David R. Weise, C.S.W., *Wildland fire emissions, carbon and climate: Characterizing wildland fuels*. Forest Ecology and Management, 2014. **317**: p. 26-40.
7. Rothmel, R.C., *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. 1972.
8. Finney, M.A., *FARSITE: Fire Area Simulator - Model Development and Evaluation*. 1998: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 47.
9. Tymstra, C. and N.F. Centre, *Development and Structure of Prometheus: The Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model*. 2010: Northern Forestry Centre.
10. Skamarock C. William, K.B.J., Dudhia Jimy, Gill O. David, Barker M. Dale, Wang Wei, Powers G. Jordan, *A Description of the Advanced Research WRF Version 2*. NCAR Tech. Note TN-468+STR. 2005. p. 88.
11. Powers, J.G., et al., *The Weather Research and Forecasting Model: Overview, System Efforts, and Future Directions*. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017. **98**(8): p. 1717-1737.
12. Coen, J.L., et al., *WRF-Fire: Coupled Weather–Wildland Fire Modeling with the Weather Research and Forecasting Model*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013. **52**(1): p. 16-38.
13. LANDFIRE. *Existing Vegetation Type*. [cited 2015 13 July]; Available from: <https://www.landfire.gov/>.
14. LANDFIRE. *Existing Vegetation Type Layer*. 2008 [cited 2010 28 October]; LANDFIRE 1.1.0:[Available from: <https://landfire.cr.usgs.gov/viewer/>].
15. Anderson, H.E., I. Forest, and R.E. Station, *Aids to Determining Fuel Models for Estimating Fire Behavior*. 1981: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
16. Mandel, J., et al., *Recent advances and applications of WRF–SFIRE*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2014. **14**(10): p. 2829-2845.
17. *0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids*. 2015, National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. NCEP GDAS/FNL.
18. Finney, M.A., *Fire growth using minimum travel time methods*. Canadian Journal of Forest Research, 2002. **32**(8): p. 1420-1424.
19. Kondratenko, V.Y., et al. *Ignition from a Fire Perimeter in a WRF Wildland Fire Model*. 2011. arXiv:1107.2675.
20. Westerling, A.L. and B.P. Bryant, *Climate change and wildfire in California*. Climatic Change, 2008. **87**(1): p. 231-249.
21. Mandel, J., J.D. Beezley, and A.K. Kochanski, *Coupled atmosphere-wildland fire modeling with WRF 3.3 and SFIRE 2011*. Geosci. Model Dev., 2011. **4**(3): p. 591-610.

