



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΟΣΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

ΥΠΟ
ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΣΔΗΡΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΟΣΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

ΥΠΟ
ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΣΔΗΡΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2025

© 2025 Νικόλαος Σδήρος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Κωνσταντίνος Αμπουντώλας Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Καθηγητή κ. Βασίλειο Μποντόζογλου, για την καθοδήγηση και την βοήθειά του κατά την διάρκεια υλοποίησης της εργασίας. Οι συμβουλές του ήταν πολύτιμες για την πραγματοποίηση της πρώτης μου ερευνητικής εργασίας.

Ευχαριστώ τον κ. Κωνσταντίνο Βογιατζόγλου για την βοήθεια του στην κατανόηση του αρχικού κώδικα του μοντέλου, καθώς και για τις προτάσεις του για την ενσωμάτωση του κώδικα που αφορά την συνεισφορά της κλίσης του εδάφους στο μοντέλο. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγητές κ. Κωνσταντίνο Παπαδημητρίου και κ. Κωνσταντίνο Αμπουντώλα, για την προσεκτική ανάγνωση της διπλωματικής μου εργασίας και τον χρόνο που αφιέρωσαν.

Ευχαριστώ τους φίλους μου Επαμεινώνδα και Νίκο για την φιλία τους και τις στιγμές που περάσαμε κατά την διάρκεια φοίτησής μας στον Βόλο. Εύχομαι τα καλύτερα για το μέλλον.

Τέλος, είμαι ευγνώμων στους γονείς μου Ιωάννη και Ζωή και στον αδερφό μου Γιώργο, για τις αξίες που με δίδαξαν και την ολόψυχη στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Αφιερώνω αυτήν την εργασία στον παππού μου Γιώργο και στην γιαγιά μου Ελένη.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΣΤΗΝ ΔΙΑΔΟΣΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΔΗΡΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 2025

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου

Καθηγητής Φαινομένων Μεταφοράς – Συσκευών Φυσικών Διεργασιών

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η μελέτη της συνεισφοράς της κλίσης του εδάφους στη διάδοση μιας δασικής πυρκαγιάς. Η κλίση του εδάφους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ταχύτητα διάδοσης της φλόγας. Σκοπός της εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης για την ακριβή πρόβλεψη της χρονικής εξέλιξης της πυρκαγιάς. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ο αντίστοιχος κώδικας στο MATLAB, που αφορά τη συνεισφορά της κλίσης και ενσωματώθηκε στο υπολογιστικό μοντέλο που έχει αναπτυχθεί. Στην αρχή της εργασίας γίνεται αναφορά στις σημαντικότερες παραμέτρους που επηρεάζουν την εξέλιξη της πυρκαγιάς, όπως η ταχύτητα του ανέμου, το «bulk density», η υγρασία και η κλίση του εδάφους. Στη συνέχεια, ακολουθεί η ανάλυση της μοντελοποίησης της συνεισφοράς της κλίσης του εδάφους, σύμφωνα με την προσέγγιση του Ralph M. Nelson, εισάγοντας τον ορισμό της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου. Κατόπιν, παρουσιάζονται σημαντικά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά και την ταχύτητα διάδοσης του μετώπου της φλόγας με την μεταβολή της κλίσης. Ερμηνεύεται η επίδραση των σημαντικών παραμέτρων στην εξέλιξη της πυρκαγιάς και πραγματοποιείται εξαγωγή κατάλληλων σχέσεων για την εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσης από τις παραμέτρους αυτές, με βάση τα δεδομένα των προσομοιώσεων. Αναφέρονται όλες οι παραδοχές που υιοθετήθηκαν για τη μοντελοποίηση του προβλήματος και προτείνονται ορισμένες βελτιώσεις. Στο τέλος της εργασίας, παρατίθενται τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Λέξεις – Κλειδιά: Κλίσης εδάφους, πυρκαγιά, ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου, ταχύτητα διάδοσης φλόγας.

EFFECT OF GROUND SLOPE ON WILDFIRE SPREAD

NIKOLAOS SDIROS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2025

Supervisor: Dr. Vasileios Bontozoglou

Professor of Transport Phenomena and Process Equipment

Abstract

The subject of this graduation thesis is about the contribution of the ground slope to wildfire spread. The ground slope plays a vital role on the rate of fire spread. The aim of this study is to examine the effect of local inclination angle of the terrain on accurately predicting the temporal evolution of wildfires. To achieve this, MATLAB code has been developed and has been integrated into the physics-based model to produce simulations about fire spread. The study begins with an overview of the main factors that have a significant impact on the fire's behavior, including wind speed, bulk density, moisture content, and ground slope. The model of Ralph M. Nelson is utilized to incorporate the ground slope into the problem, introducing the definition of effective wind velocity. In the following, results from the simulations highlight the effect of ground slope on firefront. Additionally, the thesis analyzes the dependence of the rate of spread from the main parameters by exploring mathematical expressions that best fit the simulation data. Finally, suggestions are provided to improve the physics-based model and major conclusions have been summarized.

Key – words: Ground slope, wildfire, effective wind velocity, rate of spread.

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
Κίνητρο και Υπόβαθρο.....	1
Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας.....	2
Κεφάλαιο 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	3
2.1 Bulk Density.....	3
2.2 Ταχύτητα ανέμου.....	5
2.3 Περιεχόμενο σε υγρασία.....	8
2.4 Κλίση εδάφους.....	9
2.4.1 Ανωστική ταχύτητα των καυσαερίων.....	9
2.4.2 Ένταση φλόγας.....	11
2.4.3 Ποσότητα ύλης που καίγεται.....	11
2.5 Ταχύτητα διάδοσης της φλόγας (ROS).....	12
2.5.1 Εκτίμηση του ROS.....	12
2.5.2 Μέθοδοι εκτίμησης του ROS.....	13
2.6 Εξισώσεις καύσης.....	17
2.6.1 Ισοζύγια μάζας και ενέργειας.....	17
2.6.2 Κινητική της καύσης.....	20
2.7 Προσομοίωση έναρξης της φλόγας.....	22
Κεφάλαιο 3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ RALPH M. NELSON.....	23
3.1 Ανηφόρα.....	24
3.1.1 Μονοδιάστατη προσέγγιση.....	30
3.1.2 Μηδενική ταχύτητα ανέμου.....	31
3.2 Οριζόντιο έδαφος.....	32
3.3 Κατηφόρα.....	33
3.3.1 Μονοδιάστατη προσέγγιση.....	37
3.3.3 Μηδενική ταχύτητα ανέμου.....	38

3.4 Οριακή περίπτωση για την μονοδιάστατη διάδοση φλόγας.....	39
3.5 Τοπικό φαινόμενο της ανωστικής ταχύτητας της φλόγας.....	40
Κεφάλαιο 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	42
4.1 Σταθεροποίηση του ROS.....	42
4.2 Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης του ROS.....	44
4.3 Επίδραση των παραμέτρων.....	46
4.3.1 Κλίση εδάφους.....	46
4.3.2 Ταχύτητα ανέμου.....	51
4.3.3 Εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα ανέμου.....	53
4.3.4 Bulk density.....	57
4.3.5 Εξάρτηση του ROS από το bulk density.....	61
4.3.6 Περιεχόμενο σε υγρασία.....	67
4.3.7 Εξάρτηση του ROS από την υγρασία.....	72
Κεφάλαιο 5. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ – ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ.....	77
Κεφάλαιο 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	79
Κεφάλαιο 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1.1: Προφίλ ταχύτητας αέρα εντός και εκτός της βλάστησης.....	6
Σχήμα 2.4.1.1: Ιδιότητες του αέρα σε $T_a = 300\text{ K}$ και $P = 1\text{ atm}$	10
Σχήμα 2.5.2.1: Πρώτος τρόπος υπολογισμού του ROS. $U_{10} = 5\text{ m/s}$ και $\theta = 10^\circ$	14
Σχήμα 2.5.2.2: Συχνότερος υπολογισμός σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο εκτίμησης του ROS. $U_{10} = 5\text{ m/s}$ και $\theta = 10^\circ$	15
Σχήμα 2.5.2.3: Δεύτερος τρόπος υπολογισμού του ROS. $U_{10} = 5\text{ m/s}$ και $\theta = 10^\circ$	16
Σχήμα 2.6.2.1: Παράλληλη σύνδεση των δύο ρυθμών r_2 και r_m	21
Σχήμα 3.1.1: Διεύθυνση ταχύτητας ανέμου σχετικά με την διεύθυνση του ανηφορικού εδάφους (Κάτοψη).....	25
Σχήμα 3.1.2: Προβολή της ανωστικής ταχύτητας της φλόγας στην διεύθυνση του ανηφορικού εδάφους.....	25
Σχήμα 3.1.3: Η διεύθυνση της ισοδύναμης ταχύτητας του ανέμου.....	25
Σχήμα 3.1.4: Θετικό πρόσημο γωνίας για την ανηφόρα (upslope) και αρνητικό πρόσημο γωνίας για κατηφόρα (downslope).....	25
Σχήμα 3.1.5: Οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στις διευθύνσεις x και y και η προβολή της ανωστικής ταχύτητας της φλόγας.....	27
Σχήμα 3.1.6: Ανάλυση της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου σε δύο συνιστώσες, μια στον άξονα x (cross-slope) και μια στον άξονα y (upslope).....	27
Σχήμα 3.1.7: Η κατεύθυνση του διανύσματος της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου εξαρτάται από τον προσανατολισμό των θετικών ημιαξόνων. $\omega = \tan^{-1}(Arg)$	28
Σχήμα 3.3.1: Διεύθυνση ταχύτητας ανέμου σχετικά με την διεύθυνση του κατηφορικού εδάφους (Κάτοψη).....	34
Σχήμα 3.3.2: Προβολή της ανωστικής ταχύτητας της φλόγας στην διεύθυνση του κατηφορικού εδάφους.....	34
Σχήμα 3.3.3: Η συνιστώσα $U_a \cos \psi$ και η προβολή $U_b \sin \theta$ έχουν αντίθετη φορά στην περίπτωση του κατηφορικού εδάφους.....	34
Σχήμα 3.3.4: Διεύθυνση της U_{ws} στην κατηφόρα, αφού αλλάξει η φορά του διανύσματος $U_b \sin \theta$	34
Σχήμα 3.3.5: Απεικόνιση των συνιστωσών $U_a \cos \psi$, $U_a \sin \psi$ και της προβολής $U_b \sin \theta$ στις διευθύνσεις x και y στην περίπτωση της κατηφόρας.....	35
Σχήμα 3.3.2.1: Στην περίπτωση μηδενικής ταχύτητας ανέμου, η κατεύθυνση διάδοσης της πυρκαγιάς είναι η ανηφόρα.....	39
Σχήμα 4.1.1: Σταθεροποίηση του ROS σε οριζόντιο και κεκλιμένο έδαφος 10° για μέτρια ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 4\text{ m/s}$	43
Σχήμα 4.1.2 : Σταθεροποίηση του ROS σε οριζόντιο και κεκλιμένο έδαφος 10° για υψηλή ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 10\text{ m/s}$	43
Σχήμα 4.2.1: Σύγκλιση των δύο μεθόδων εκτίμησης του ROS για διάφορες περιπτώσεις τιμών ταχύτητας ανέμου U_{10} και κλίσης εδάφους.....	45

Σχήμα 4.3.1.1: Επίδραση της κλίσης στην ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς. $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, $m_{s,o} = 1,4 \text{ Kg/m}^2$, $S_2=0.9$	47
Σχήμα 4.3.1.2: Επίδραση της κλίσης για μηδενική ταχύτητα ανέμου.....	48
Σχήμα 4.3.1.3: Επίδραση της κλίσης για ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 4 \text{ m/s}$	49
Σχήμα 4.3.1.4: Επίδραση της κλίσης για ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 10 \text{ m/s}$	50
Σχήμα 4.3.2.1: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου για κεκλιμένο έδαφος 10°	52
Σχήμα 4.3.2.2: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου για κεκλιμένο έδαφος 20°	52
Σχήμα 4.3.3.1: Εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα ανέμου U_{10} για διάφορες τιμές της κλίσης εδάφους.....	53
Σχήμα 4.3.3.2: Αντιστοίχιση των δεδομένων με πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Κλίση εδάφους 10°	55
Σχήμα 4.3.3.3: Αντιστοίχιση των δεδομένων με πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Κλίση εδάφους 20°	55
Σχήμα 4.3.4.1: Επίδραση του bulk density στα προφίλ $T(x,t)$ και $S_2(x,t)$ για $U_{10} = 1 \text{ m/s}$ και κλίση 10°	58
Σχήμα 4.3.4.2: Επίδραση του bulk density στα προφίλ $T(x,t)$ και $S_2(x,t)$ για $U_{10} = 5 \text{ m/s}$ και για μεταβολή της κλίσης του εδάφους.....	60
Σχήμα 4.3.5.1: Απεικόνιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density».....	62
Σχήμα 4.3.5.2: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» με εξίσωση υπερβολής της μορφής $y = ax^{-b}$. $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, $\theta = 0^\circ$	63
Σχήμα 4.3.5.3: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» με εξίσωση υπερβολής της μορφής $y = ax^{-b}$. $U_{10} = 5 \text{ m/s}$, $\theta = 10^\circ$	63
Σχήμα 4.3.5.4: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» με εξίσωση υπερβολής της μορφής $y = ax^{-b}+c$. $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, $\theta = 0^\circ$	65
Σχήμα 4.3.5.5: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» με εξίσωση υπερβολής της μορφής $y = ax^{-b}+c$. $U_{10} = 5 \text{ m/s}$, $\theta = 10^\circ$	65
Σχήμα 4.3.6.1: Επίδραση της υγρασίας στην συμπεριφορά του μετώπου της φλόγας.....	69
Σχήμα 4.3.6.2: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου στην τιμή DFME.....	70
Σχήμα 4.3.6.3: Επίδραση της κλίσης του εδάφους στην τιμή DFME.....	71
Σχήμα 4.3.7.1: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από την υγρασία FMC με εξίσωση της μορφής $y = ae^{-bx}$. $U_{10} = 5 \text{ m/s}$, $\theta = 10^\circ$	74
Σχήμα 4.7.3.2: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από την υγρασία με εξίσωση της μορφής $y = ae^{-bx}$. $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, $\theta = 0^\circ$	74

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.3.5.1: Συντελεστές a, b για την μορφή $y = ax^{-b}$	64
Πίνακας 4.3.5.2: Συντελεστές a, b για την μορφή $y = ax^{-b}+c$	66
Πίνακας 4.3.6.1: Τιμές της υγρασίας που οδηγεί σε σβήσιμο της φλόγας για τους 53 τύπους μοντέλων.....	68
Πίνακας 4.3.7.1: Συντελεστές a, b για την μορφή $y = ae^{-bx}$	73
Πίνακας 4.3.7.2: Ομοιότητα των συντελεστών.....	76

Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κίνητρο και Υπόβαθρο

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μια από τις ολέθριες περιβαλλοντικές καταστροφές σε παγκόσμια κλίμακα. Η εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες, συνιστούν άμεσο κίνδυνο για την ασφάλεια των πολιτών και των περιουσιών τους, με ταυτόχρονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις λόγω των εκπομπών αερίων της καύσης και της καταστροφή τεράστιων εκτάσεων γης. Μια σύντομη ανασκόπηση στα στατιστικά δεδομένα καταδεικνύει το μέγεθος του φαινομένου αυτού. Η Ελλάδα που μαστίζεται από τις δασικές πυρκαγιές κάθε χρόνο, γνώρισε τον Ιούλιο του 2018 στην Αττική την δεύτερη φονικότερη καταστροφή τον 21^ο αιώνα παγκοσμίως. Αποτέλεσμα της ανεξέλεγκτης πυρκαγιάς στο Μάτι της Αττικής ήταν να χάσουν την ζωή τους 104 άνθρωποι και να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους περίπου 700 άτομα [1]. Τον Ιούλιο του 2023, στο νομό Έβρου της Θράκης σημειώθηκε η μεγαλύτερη έκταση καμένης γης στην σύγχρονη ιστορία της Ευρώπης, μια έκταση που ανέρχεται περίπου στα 938 km² [2]. Ο ετήσιος μέσος όρος καμένης έκτασης γης από την εξάπλωση δασικών πυρκαγιών παγκοσμίως ανέρχεται περίπου στα 4×10^6 km². [2]. Από τον Μάρτιο 2023 έως τον Φεβρουάριο 2024 περίπου 8,8 Gt CO₂ απελευθερώθηκαν από την καύση δασών παγκοσμίως, τιμή συγκρίσιμη με τις εκπομπές CO₂ που προέρχονται από ανθρωπογενείς παράγοντες σε Ηνωμένες Πολιτείες, Ευρώπη και Νότια Αμερική αθροιστικά [3]. Επομένως, η ύπαρξη ενός *υπολογιστικού μοντέλου* που να μπορεί να προβλέψει σε σημαντικό βαθμό την συμπεριφορά και την ταχύτητα διάδοσης της φλόγας, κάτω από πραγματικές συνθήκες είναι κρίσιμης σημασίας.

Η μελέτη της συμπεριφοράς και της ταχύτητας διάδοσης της φλόγας αποτελεί ένα συνδυαστικό και περίπλοκο πρόβλημα. Περιλαμβάνει την χημεία και την κινητική της καύσης, τα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας, την ρευστομηχανική προσέγγιση και εισάγει την στοχαστική-πιθανολογική εξέλιξη της φλόγας, λόγω της διαφορετικής σύστασης του εδάφους, αλλά και της μεταβολής των καιρικών συνθηκών. Συνεπώς, το υπολογιστικό μοντέλο πρέπει να λάβει υπόψιν αρκετούς παράγοντες με κυρίαρχους την ταχύτητα του ανέμου, την *κλίση* του εδάφους, την πυκνότητα της καύσιμης ύλης και το περιεχόμενο σε υγρασία.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει την συνεισφορά της κλίσης του εδάφους στην *μονοδιάστατη* διάδοση της δασικής πυρκαγιάς. Στο πλαίσιο αυτό, χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση του Ralph M. Nelson [4], θεωρώντας την ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου, η οποία αντιπροσωπεύει την κοινή συνεισφορά της ταχύτητας του ανέμου με την κλίση του εδάφους. Η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου συμπεριλαμβάνει την ταυτόχρονη επίδραση του ανέμου και της κλίσης, ενώ όλα τα άλλα μοντέλα θεωρούν ξεχωριστές τις επιδράσεις των δύο παραγόντων. Για την εξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων δημιουργήθηκε ο αντίστοιχος κώδικας στο MATLAB και εντάχθηκε στο ήδη υπάρχον μοντέλο των Κ. Βογιατζόγλου κ.α. [5], το οποίο βασίζεται στα ισοζύγια μάζας και ενέργειας και στην κινητική της καύσης. Η ένταξη της συνεισφοράς της κλίσης συμπληρώνει και διευρύνει το μοντέλο, αποσκοπώντας στην καλύτερη πρόβλεψη της εξέλιξης δασικής πυρκαγιάς υπό ρεαλιστικές συνθήκες.

1.2 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται όλο το θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση του προβλήματος της διάδοσης μιας δασικής πυρκαγιάς. Αναφέρονται οι σημαντικότερες παράμετροι που επηρεάζουν την συμπεριφορά της φλόγας και καταγράφονται όλες οι απαραίτητες σχέσεις που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση του μοντέλου.

Το Κεφάλαιο 3 πραγματεύεται την μοντελοποίηση της συνεισφοράς της κλίσης στην ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς. Για τον σκοπό αυτό αναλύεται το μοντέλο του Ralph M. Nelson και εξάγεται η σχέση για την ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου που ενσωματώνει την ταυτόχρονη επίδραση της κλίσης του εδάφους και της ταχύτητας ανέμου. Εξετάζονται όλες οι δυνατές περιπτώσεις κλίσεων (ανηφόρα, κατηφόρα, οριζόντιο έδαφος) και εξάγονται οι αντίστοιχες σχέσεις για την ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την επίδραση της κλίσης του εδάφους, της ταχύτητας ανέμου, του «bulk density» και του περιεχομένου σε υγρασία στην συμπεριφορά και στην ταχύτητα διάδοσης της φλόγας. Ερμηνεύεται ξεχωριστά η κάθε περίπτωση, ενώ πραγματοποιείται αντιστοίχιση των δεδομένων από τις προσομοιώσεις, εξετάζοντας την εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσης από τις τέσσερις προαναφερθείσες παραμέτρους.

Στο Κεφάλαιο 5 αναφέρονται οι σημαντικότερες παραδοχές που υιοθετήθηκαν κατά την μοντελοποίηση του προβλήματος και προτείνονται βελτιώσεις για ακόμη καλύτερη πρόβλεψη της διάδοσης της πυρκαγιάς.

Τα συμπεράσματα από την διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης του εδάφους και των άλλων μεγεθών στην εξέλιξη της φλόγας παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 6.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά την μελέτη και συγγραφή της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κεφάλαιο 2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η θεωρητική ανάλυση των κύριων παραμέτρων που επηρεάζουν την συμπεριφορά και την ταχύτητα διάδοσης μιας δασικής πυρκαγιάς. Η μοντελοποίηση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της φλόγας αποτελεί ένα αρκετά δύσκολο πρόβλημα που επηρεάζεται από πλήθος παραμέτρων και συνθηκών. Σκοπός λοιπόν της ενότητας αυτής είναι η συνοπτική ανάλυση των βασικών μεγεθών που επιδρούν στην *μονοδιάστατη* διάδοση της φλόγας και η κατάστρωση των βασικών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα.

2.1 Bulk Density

Η πρώτη σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την συμπεριφορά της φλόγας είναι ένα μέγεθος με την ονομασία «bulk density». Όπως δηλώνει και ο ξενόγλωσσος όρος, πρόκειται για ένα μέγεθος σχετικό με την πυκνότητα. Αποτελεί το γινόμενο της πυκνότητας του καυσίμου ρ_s ($[=]$ Kg/m³) με το αδιάστατο κλάσμα όγκου α ($[=]$ στερεό m³/ συνολικό m³). Πρόκειται για ένα μέγεθος που ενσωματώνει τόσο την πυκνότητα της καύσιμης ύλης, αλλά και τον χώρο που καταλαμβάνει. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι τιμές του «bulk density» κυμαίνονται [0,5, 25] Kg/m³, ενώ οι τιμές του κλάσματος όγκου κυμαίνονται [0,00106, 0,04878]. [6]

Το κλάσμα όγκου αναπαριστά το ποσοστό του όγκου που καταλαμβάνει μόνο η καύσιμη ύλη σε ένα κυβικό μέτρο (m³). Προφανώς, ο υπόλοιπος όγκος καταλαμβάνεται από αέρα. Για να γίνει πιο σαφές:

$$\alpha = \frac{\text{όγκος που καταλαμβάνει η στερεή ύλη}}{\text{συνολικός όγκος (αέρας+καύσιμη ύλη)}} = \frac{\text{στερεός όγκος } m^3}{\text{συνολικός όγκος } m^3} \quad (2.1)$$

Ο όρος «bulk density» συμβολίζεται ως $m_{s,0}$ και έχει μονάδες πυκνότητας ($[=]$ Kg/m³). Εκφράζει την μάζα (Kg) καύσιμης ύλης που περιέχεται σε ένα κυβικό μέτρο (m³). Αναλυτικά ο τύπος υπολογισμού και οι αντίστοιχες μονάδες:

$$m_{s,0} = \alpha \rho_s \quad (2.2)$$

$$m_{s,0} [=] \frac{\text{στερεός όγκος } m^3}{\text{συνολικός όγκος } m^3} \times \frac{\text{Kg καύσιμης ύλης}}{\text{στερεός όγκος } m^3} = \frac{\text{Kg καύσιμης ύλης}}{\text{συνολικός όγκος } m^3}$$

Η στερεή φάση περιλαμβάνει τόσο την εύφλεκτη ύλη που καίγεται, όσο και την ποσότητα νερού που περιέχεται. Με $m_{s1,0}$ συμβολίζεται η αρχική ποσότητα νερού στην καύσιμη ύλη ($[=]$ Kg/m³) και με $m_{s2,0}$ συμβολίζεται η αρχική ποσότητα της ύλης που

καίγεται ($[=]$ Kg/m³). Προφανώς, το άθροισμα των δύο ισούται με την συνολική αρχική ποσότητα της στερεής φάσης:

$$m_{s,0}(x) = m_{s1,0}(x) + m_{s2,0}(x) \quad \left(\frac{Kg}{m^3}\right) \quad (2.3)$$

Κατά την αντίδραση της καύσης η υγρασία εξατμίζεται και η εύφλεκτη καύσιμη ύλη καταναλώνεται με το χρόνο. Με m_{s1} συμβολίζεται η ποσότητα της υγρασίας και αντίστοιχα με m_{s2} συμβολίζεται η ποσότητα της εύφλεκτης καύσιμης ύλης μια δεδομένη χρονική στιγμή. Συνεπώς:

$$\begin{aligned} m_{s1} &= m_{s1}(x, t) \\ m_{s2} &= m_{s2}(x, t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Το άθροισμα των δύο ποσοτήτων αναπαριστά την ποσότητα της στερεής φάσης συνολικά την δεδομένη χρονική στιγμή:

$$m_{s1}(x, t) + m_{s2}(x, t) = m_s(x, t) \quad \left(\frac{Kg}{m^3}\right) \quad (2.5)$$

Για την ευκολία των υπολογισμών, ορίζεται η αδιάστατη ποσότητα υγρασίας και εύφλεκτης ύλης. Η αδιάστατη ποσότητα υγρασίας συμβολίζεται με S_1 και αναπαριστά την ποσότητα της υγρασίας μια δεδομένη χρονική στιγμή ως προς την αρχική ποσότητα της στερεής φάσης. Αντίστοιχα, η αδιάστατη ποσότητα της εύφλεκτης ύλης συμβολίζεται με S_2 και αναπαριστά την ποσότητα της καύσιμης ύλης που έχει απομείνει μια δεδομένη χρονική στιγμή ως προς την αρχική ποσότητα τη στερεής φάσης. Με S ορίζεται η αδιάστατη ποσότητα της στερεής φάσης μια δεδομένη χρονική στιγμή.

$$\begin{aligned} S_1 &= S_1(x, t) = \frac{m_{s1}(x, t)}{m_{s,0}} \\ S_2 &= S_2(x, t) = \frac{m_{s2}(x, t)}{m_{s,0}} \\ S &= S(x, t) = \frac{m_s(x, t)}{m_{s,0}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Συνεπώς, η σχέση (2.5) μπορεί να εκφραστεί με αδιάστατους όρους (2.6) ως εξής:

$$S_1(x, t) + S_2(x, t) = S(x, t) \quad (2.7)$$

Όσον αφορά τις αρχικές συστάσεις της υγρασίας και της καύσιμης ύλης αυτές εκφράζονται με τους αντίστοιχους όρους $S_{1,0}$ και $S_{2,0}$:

$$\begin{aligned} S_{1,0}(x) &= \frac{m_{s1,0}(x)}{m_{s,0}(x)} \\ S_{2,0}(x) &= \frac{m_{s2,0}(x)}{m_{s,0}(x)} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Σε αυτήν την περίπτωση η σχέση (2.3) αποκτά την εξής απλή μορφή:

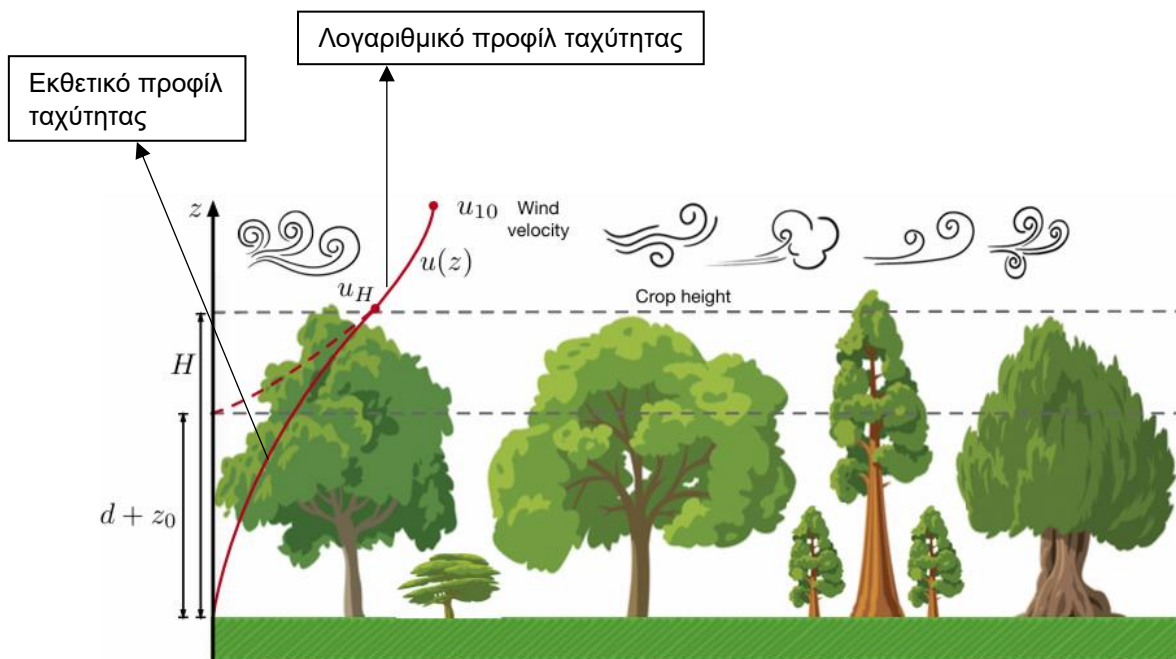
$$S_{1,0}(x) + S_{2,0}(x) = 1 \quad (2.7)$$

2.2 Ταχύτητα ανέμου

Είναι ευρέως γνωστή η σημαντικότητα της παρουσίας αέρα όταν υπάρχει ενεργό μέτωπο φλόγας. Υψηλές ταχύτητες ανέμου καθιστούν ιδιαίτερα επικίνδυνη την ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το μέτωπο. Καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τόσο τον ρυθμό, όσο και την διεύθυνση διάδοσης της πυρκαγιάς. Η ταχύτητα του αέρα που επηρεάζει την φλόγα δεν είναι η ονομαστική ταχύτητα του αέρα. Η ονομαστική ταχύτητα μετράται 10 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, συμβολίζεται ως U_{10} , είναι σταθερή για δεδομένες μετεωρολογικές συνθήκες. Είναι προφανές πως η ταχύτητα του ανέμου δεν έχει σταθερή τιμή, καθώς ο αέρας διέρχεται μέσα από την βλάστηση. Με άλλα λόγια εμφανίζεται προφίλ ταχύτητας. Εκτός της βλάστησης εμφανίζεται λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας, ενώ εντός της βλάστησης εμφανίζεται εκθετικό προφίλ [7]. Στο **Σχήμα 2.2.1** απεικονίζονται τα προφίλ ταχυτήτων κατά την διεύθυνση του ύψους της βλάστησης. Η σχέση που περιγράφει το προφίλ ταχύτητας του αέρα εκτός της βλάστησης είναι:

$$u_v(z) = \frac{u_{v*}}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad [7] \quad (2.8)$$

όπου u_v η ταχύτητα του ανέμου ([=] m/s), z η απόσταση ([=] m) από το έδαφος, u_{v*} η ταχύτητα τριβής («friction velocity») ([=] m/s), $\kappa = 0,41$ η σταθερά του Kaplan, z_0 η τραχύτητα του εδάφους («surface roughness») ([=] m) και d η απόσταση ([=] m) έτσι ώστε σε μια απόσταση $z = z_0 + d$, η ταχύτητα u_v να μηδενίζεται, δηλαδή $u_v(z_0+d) = 0$.



Σχήμα 2.2.1: Προφίλ ταχύτητας αέρα εντός και εκτός της βλάστησης. Πηγή [5]

Για την εύρεση της ταχύτητας τριβής («friction velocity») αρκεί να θεωρήσουμε στην σχέση (2.8) $u_v(z = 10 \text{ m}) = u_{10}$. Συγκεκριμένα:

$$u_v(z = 10 \text{ m}) = U_{10} \Rightarrow \frac{u_{v*}}{\kappa} \ln \left(\frac{10-d}{z_0} \right) = U_{10} \Rightarrow u_{v*} = \kappa U_{10} \left[\ln \left(\frac{10-d}{z_0} \right) \right]^{-1} \quad (2.9)$$

Η τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος H ([= m]) της βλάστησης υπολογίζεται ως εξής:

$$u_v(H) = \frac{u_{v*}}{\kappa} \ln \left(\frac{H-d}{z_0} \right) \quad (2.10)$$

Το εκθετικό προφίλ ταχύτητας που εμφανίζεται εντός της βλάστησης περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$u_v(z) = u_H e^{-\eta \left(\frac{1-z}{H} \right)} \quad [7] \quad (2.11)$$

όπου η κυμαίνεται περίπου [2, 3] [7].

Είναι λογικό στο μοντέλο να χρησιμοποιείται μια μέση τιμή της ταχύτητας ανέμου εντός της βλάστησης. Η μέση τιμή υπολογίζεται εύκολα:

$$\langle u_v \rangle = \frac{1}{H} \int_0^H u_v(z) dz \Rightarrow \langle u_v \rangle = \frac{u_H}{\eta} (1 - e^{-\eta}) \quad (2.12)$$

Η ταχύτητα αυτή αφορά την ταχύτητα του αέρα μπροστά από το μέτωπο της φλόγας, όπου η βλάστηση δεν έχει καεί. Πίσω από το μέτωπο της φλόγας υπάρχει η καμένη βλάστηση, με αποτέλεσμα ο αέρας να συναντά μικρότερη αντίσταση στην ροή του. Συνεπώς, η ταχύτητα του αέρα πίσω από το μέτωπο της φλόγας να είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα που υπολογίστηκε από την σχέση (2.12) [5]. Συμβολίζεται με u_f και εμφανίζει λογαριθμικό προφίλ, λόγω της καμένης βλάστησης, σύμφωνα με την σχέση:

$$u_f(z) = \frac{u_{f*}}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad [5] \quad (2.13)$$

όπου u_{f*} η ταχύτητα τριβής («friction velocity») ($[=]$ m/s). Η μέση ταχύτητα υπολογίζεται ως εξής:

$$\langle u_f \rangle = \frac{1}{H-z_0} \int_{z_0}^H u(z) dz \Rightarrow \langle u_f \rangle = \frac{u_{f*}}{\kappa} \left[\frac{H}{H-z_0} \ln\left(\frac{H}{z_0}\right) - 1 \right] \quad (2.14)$$

Η ταχύτητα του αέρα, που χρησιμοποιείται τελικά στις μαθηματικές σχέσεις του μοντέλου, αποτελεί έναν σταθμισμένο μέσο όρο της μέσων ταχυτήτων $\langle u_v \rangle$ και $\langle u_b \rangle$. Για τον υπολογισμό ορίζεται ο λόγος x_c που εκφράζει το ποσοστό της ύλης που έχει απομείνει σε σχέση με την ποσότητα της ύλης την χρονική στιγμή $t = 0$ s. Ο λόγος εκφράζεται με την βοήθεια της σχέσης:

$$x_c = \frac{m_{s2}}{m_{s2,0}} = \frac{m_{s,0} S_2}{m_{s,0} S_{2,0}} = \frac{S_2}{S_{2,0}} \quad [5] \quad (2.15)$$

Συνεπώς, ο σταθμισμένος μέσος όρος υπολογίζεται:

$$\langle u \rangle = x_c \langle u_v \rangle + (1 - x_c) \langle u_f \rangle \quad [5] \quad (2.16)$$

όπου $\langle u \rangle$ ($[=]$ m/s) η ταχύτητα που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις του μοντέλου. Ο πρώτος όρος της σχέσης (2.16) αφορά την άκαυτη βλάστηση, ενώ ο δεύτερος την καμένη.

x_c : ποσοστό της καύσιμης ύλης που έχει απομείνει.

$(1 - x_c)$: ποσοστό της καύσιμης ύλης που έχει καεί.

$$\langle u \rangle = x_c \langle u_v \rangle + (1 - x_c) \langle u_f \rangle$$

άκαυτη βλάστηση

καμένη βλάστηση

2.3 Περιεχόμενο σε υγρασία

Η ποσότητα υγρασίας που περιέχεται στην καύσιμη ύλη κατέχει σημαντικό ρόλο στην διάδοση της φλόγας. Εκφράζεται είτε με τον όρο m_{s1} που έχει μονάδες πυκνότητας **(2.4)**, είτε με το αδιάστατο μέγεθος S_1 **(2.6)**. Τονίζεται πως στο μοντέλο όταν αναγράφεται ο όρος «υγρασία» εννοείται η ποσότητα σε υγρασία που περιέχεται στην καύσιμη ύλη και όχι η υγρασία του περιβάλλοντος. Η σχετική υγρασία αποτελεί επίσης μια περιβαλλοντική συνθήκη που επηρεάζει την συμπεριφορά της φλόγας, ωστόσο δεν έχει ενσωματωθεί ακόμη στο μοντέλο. Επομένως, ο όρος «υγρασία» αναφέρεται στο περιεχόμενο σε νερό της καύσιμης ύλης. Καθορίζει με άλλα λόγια το πόσο ξηρό είναι ένα καύσιμο. Για αυτό ορίζεται ένα νέο μέγεθος «περιεχόμενο σε υγρασία» που συμβολίζεται ως FMC ($[=] \%$) (Fuel Moisture Content) και υπολογίζεται ως προς ξηρή βάση. Εκφράζει την ποσότητα της υγρασίας που περιέχεται στην καύσιμη ύλη ως προς την ποσότητα της ξηρής εύφλεκτης ύλης.

$$FMC = \frac{m_{s1,0}}{m_{s2,0}} \times 100 \quad (2.17)$$

Όπως είναι γνωστό η υγρασία λειτουργεί ανασταλτικά στην διάδοση της φλόγας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένα μέρος της θερμότητας που παράγεται κατά την καύση καταναλώνεται στην εξάτμιση του νερού. Η εξάτμιση είναι μια ενδόθερμη αντίδραση, δηλαδή απορροφάται θερμότητα για την πραγματοποίησή της. Αποτέλεσμα είναι η μερική ψύξη των καυσαερίων κάτι το οποίο δυσχεραίνει την προανάφλεξη της διπλανής καύσιμης ύλης, λόγω των μικρότερων αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών. Κατ' επέκταση, μειώνεται και ο ρυθμός διάδοσης της πυρκαγιάς, όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα «Αποτελέσματα». Μάλιστα, για πολύ μεγάλες τιμές της υγρασίας η φλόγα σβήνει ταχύτατα, με την παραγόμενη θερμότητα να καταναλώνεται για την εξάτμιση του νερού.

Αξίζει να γίνει μια σύντομη αναφορά ως προς την εξεταζόμενη υγρασία. Γενικά, στο μοντέλο δεν γίνεται διάκριση μεταξύ της υγρασίας σε «νεκρή» οργανική ύλη και της υγρασίας σε «ζωντανή» βλάστηση. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψιν μόνο την ποσότητα του νερού που περιέχεται στην καύσιμη ύλη. Στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία

η ποσότητα της υγρασίας σε «νεκρή» οργανική ύλη αναφέρεται ως «dead fuel moisture», ενώ σε «ζωντανή» βλάστηση αναφέρεται ως «live fuel moisture». Οι δύο αυτές περιπτώσεις εξαρτώνται από διαφορετικές παραμέτρους και επηρεάζουν με διαφορετικό τρόπο την διάδοση της φλόγας. Η κύρια διαφορά τους στηρίζεται στην εξάρτησή τους από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, το περιεχόμενο σε υγρασία στην «νεκρή» ύλη εξαρτάται έντονα από την θερμοκρασία και την υγρασία του περιβάλλοντος, σε αντίθεση με την περίπτωση «ζωντανής» βλάστησης. Συνεπώς, το μοντέλο εστιάζει μόνο στην τιμή της ποσότητας υγρασίας στην καύσιμη ύλη.

2.4 Κλίση εδάφους

Η συνεισφορά της κλίσης του εδάφους στην μονοδιάστατη διάδοση της φλόγας, που αποτελεί το κύριο θέμα μελέτης της διπλωματικής εργασίας, είναι η τελευταία υπό σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς. Για την μοντελοποίηση της επίδρασης της κλίσης του εδάφους χρησιμοποιείται η προσέγγιση του Ralph M.Nelson [4]. Ο Ralph M.Nelson εισάγει την ιδέα της κοινής συνεισφοράς της ταχύτητας του ανέμου και της κλίσης για την διάδοση της φλόγας, μέσω της θεώρησης της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου. Στο κεφάλαιο «Το μοντέλο του Ralph M.Nelson» γίνεται η ανάλυση για τον τρόπο με τον οποίο η κλίση υπεισέρχεται στο πρόβλημα και εξετάζονται όλες οι δυνατές περιπτώσεις.

Για την μοντελοποίηση της κλίσης πρέπει να οριστούν κάποια μεγέθη που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συνεισφοράς της κλίσης. Η θεώρηση της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου κατά τον του Ralph M.Nelson λαμβάνει υπόψιν την ταχύτητα του ανέμου και την ανωστική ταχύτητα των προϊόντων της καύσης. Η ταχύτητα του ανέμου είναι ουσιαστικά η ταχύτητα που υπολογίστηκε από την σχέση (2.16) και η ανωστική ταχύτητα αντιπροσωπεύει την άνοδο των θερμών καυσαερίων. Παρακάτω ορίζονται όλα τα απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων.

2.4.1 Ανωστική ταχύτητα των καυσαερίων

Τα καυσαέρια έχουν υψηλή θερμοκρασία, λόγω της εξώθερμης αντίδρασης της καύσης. Στις υψηλές θερμοκρασίες η πυκνότητα των καυσαερίων είναι αρκετά μικρότερη από την πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, με αποτέλεσμα λόγω φυσική συναγωγής να πραγματοποιείται ροή των καυσαερίων προς τα πάνω. Η ανωστική ταχύτητα συμβολίζεται ως U_b και υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$U_b = \left(\frac{2gI_B}{\rho_a c_p T_a} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [4] \quad (2.18)$$

όπου g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($[=] 9,81\text{m/s}^2$), T_a η θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα ($[=] \text{K}$), ρ_a η πυκνότητα ($[=] \text{Kg/m}^3$) και c_p η ειδική θερμοχωρητικότητα ($[=] \text{J/KgK}$) του ατμοσφαιρικού αέρα στην θερμοκρασία T_a και σε πίεση μιας ατμόσφαιρας. I_B αποτελεί ένα νέο μέγεθος και εκφράζει την ένταση της φλόγας ($[=] \text{J/sm}$) και μελετάται παρακάτω. Στο **Σχήμα 2.4.1.1** φαίνονται οι ιδιότητες του αέρα σε ατμοσφαιρικές συνθήκες.

IRC Fluid Property Calculator

International Units (selected) English Units

Step 1. Choose a fluid to model: Dry Air

Step 2. Enter two conditions:

Temperature: 27 °C
Abs. Pressure: 101.325 kPa

Step 3. Press Calculate:

Calculate Properties

Reference: Fluid Default
 Temperature: 27 °C
 Pressure: 101.3 kPa
 Density: 1.176 kg/m³
 Volume: 0.8503 m³/kg
 Quality: Superheated gas
 Internal Energy: 214.3 kJ/kg
 Enthalpy: 300.5 kJ/kg
 Entropy: 6867 J/kg-K
 Isochoric Heat Capacity: 718.2 J/kg-K
 Isobaric Heat Capacity: 1007 J/kg-K

Other Properties:
 Molar Weight: 28.96
 Components by mass:
 Nitrogen: 0.7557
 Argon: 0.01269
 Oxygen: 0.2316
 Critical Temperature: -140.3 °C
 Critical Pressure: 3850 kPa
 Critical Density: 345.7 kg/m³
 Gas Constant: 287.1 J/kg-K
 Surface Tension: Undefined
 Thermal Expansion: 0.003341 1/K
 Sound Speed: 347.5 m/s
 Nitrogen Fugacity: 79.14 kPa
 Argon Fugacity: 0.9316 kPa
 Oxygen Fugacity: 21.22 kPa
 Viscosity: 18.59 microPa-s
 Thermal Conductivity: 0.02602 W/m-K
 Prandtl Number: 0.7191
 Helmholtz Energy: -1847 kJ/kg
 Gibbs Free Energy: -1761 kJ/kg

Σχήμα 2.4.1.1: Ιδιότητες του αέρα σε $T_a = 300 \text{ K}$ και $P = 1 \text{ atm}$. Πηγή <https://irc.wisc.edu/properties/>

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος θεωρείται $T_a = 300 \text{ K}$ (27°C)

Η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε $T_a = 300 \text{ K}$, $P = 1 \text{ atm}$: $\rho_a = 1,176 \text{ Kg/m}^3$

Η ειδική θερμοχωρητικότητα του ατμοσφαιρικού αέρα σε $T_a = 300 \text{ K}$, $P = 1 \text{ atm}$:

$c_p = 1007 \text{ J/KgK}$

2.4.2 Ένταση φλόγας

Η ένταση της φλόγας συμβολίζεται ως I_B ($[=]$ J/sm) και αποτελεί γενικότερα κρίσιμο μέγεθος για την διάδοση της φλόγας. Ορίζεται ως την ενέργεια που απελευθερώνεται ανά μέτρο πλάτους του μετώπου στην μονάδα του χρόνου. Εκφράζει, όπως δηλώνει και το όνομα, την ένταση της φωτιάς και αντικατοπτρίζει την επικινδυνότητα του μετώπου, καθώς λαμβάνεται υπόψιν τόσο η εκλυόμενη θερμότητα, όσο και η ταχύτητα διάδοσης. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η ένταση της φλόγας μπορεί να υπολογιστεί:

$$I_B = H_c W_a ROS \left(\frac{J}{sm} \right) \quad [8] \quad (2.19)$$

όπου H_c η ενθαλπία καύσης ($[=]$ J/Kg), W_a η ποσότητα ύλης που καίγεται ($[=]$ Kg/m²) και ROS η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας. Συνήθης τιμή για την ενθαλπία καύσης λαμβάνεται $H_c = 18.000$ KJ/Kg [6]. Τα μεγέθη W_a και ROS αναλύονται στην συνέχεια.

2.4.3 Ποσότητα ύλης που καίγεται

Το μέγεθος W_a που αναφέρθηκε στην σχέση (2.19) συνιστά την ποσότητα της ύλης που καίγεται από την φλόγα μια δεδομένη χρονική στιγμή. Εκφράζει την μάζα ύλης που καίγεται ανά τετραγωνική επιφάνεια ($[=]$ Kg/m²). Η αρχική ποσότητα διαθέσιμης καύσιμης ύλης συμβολίζεται ως $W_{a,0}$, εννοώντας την ποσότητα ξηρής ύλης την χρονική στιγμή $t = 0$ sec. Στην αγγλική βιβλιογραφία συναντάται με τον όρο «available fuel» και υπολογίζεται ως εξής:

$$W_{a,0} = m_{s2,0} H \left(\frac{Kg}{m^2} \right) \quad (2.20)$$

όπου $m_{s2,0}$ η ποσότητα ξηρής καύσιμης ύλης την χρονική στιγμή $t = 0$ sec ($[=]$ Kg/m³) και H το μέσος ύψος της βλάστησης ($[=]$ m).

Ο υπολογισμός της ποσότητας W_a για μια δεδομένη χρονική στιγμή περιγράφεται παρακάτω:

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_{s2,0} - m_{s2} \Rightarrow \Delta m H = m_{s2,0} H - m_{s2} H \Rightarrow W_a = m_{s2,0} H \left(1 - \frac{m_{s2}}{m_{s2,0}} \right) \Rightarrow \\ W_a &= W_{a,0} \left(1 - \frac{m_{s2}/m_{s,0}}{m_{s2,0}/m_{s,0}} \right) \Rightarrow W_a = W_{a,0} \left(1 - \frac{s_2}{s_{2,0}} \right) \left(\frac{Kg}{m^2} \right) \end{aligned} \quad (2.21)$$

2.5 Ταχύτητα διάδοσης της φλόγας (ROS)

Η ταχύτητα διάδοσης της φλόγας αποτελεί ουσιαστικά το σημαντικότερο μέγεθος, όταν μελετάται η συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς. Στην ξενόγλωσση βιβλιογραφία συναντάται με τον όρο «Rate Of Spread» και συμβολίζεται ως ROS ($[=]$ m/s). Η εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης συνιστά ουσιαστικά το τελικό μέγεθος που υπολογίζεται, έχοντας λάβει υπόψιν όλες τις σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν την συμπεριφορά της φλόγας. Η σωστή εκτίμηση του ROS είναι ο αντικειμενικός στόχος όλων των υπολογιστικών μοντέλων πρόβλεψης δασικών πυρκαγιών.

2.5.1 Εκτίμηση του ROS

Η παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιεί δύο τρόπους εκτίμησης της ταχύτητας διάδοσης, που έχουν όμως κοινή λογική. Η κοινή βάση υπολογισμού αφορά τον εντοπισμό των μεγίστων τιμών των προφίλ θερμοκρασίας, καθώς το μέτωπο της φωτιάς εξελίσσεται. Για την εκτίμηση χρησιμοποιείται είτε σταθερό χρονικό βήμα, είτε σταθερό χωρικό βήμα. Οι δύο τρόποι υπολογισμού αναλύονται παρακάτω.

Ο κοινός τύπος υπολογισμού του ROS είναι ο απλός τύπος υπολογισμού της ταχύτητας. Με dx συμβολίζεται η απειροστή μεταβολή της απόστασης που διανύει το μέτωπο στον απειροστό χρόνο dt .

$$ROS = \frac{dx}{dt} \quad (m/s) \quad (2.22)$$

Είναι προφανές πως είναι αδύνατος ο υπολογισμός του ROS σε απειροστά διαστήματα. Για την υπολογιστική απόδοση, θεωρείται πως ο ROS παραμένει σταθερός μεταξύ δύο διαδοχικών υπολογισμών του. Συνεπώς, η εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης γίνεται με βάση την σχέση (2.23). Με Δx συμβολίζεται το πεπερασμένο διάστημα που διανύει το μέτωπο στον πεπερασμένο χρόνο Δt .

$$ROS = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (m/s) \quad (2.23)$$

2.5.2 Μέθοδοι εκτίμησης του ROS

Σταθερό χωρικό βήμα x_a – Πρώτος τρόπος εκτίμησης

Ο πρώτος τρόπος υπολογισμού βασίζεται στην υπόθεση σταθερού χωρικού βήματος x_a (m). Το σταθερό χωρικό βήμα ορίζεται στον κώδικα από τον χρήστη και αναπαριστά το μεσοδιάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών υπολογισμών του ROS. Με άλλα λόγια ο χρήστης ορίζει ανά πόση απόσταση που διανύει το μέτωπο της φλόγας επιθυμεί να γίνεται ο υπολογισμός του ROS. Με τον ορισμό της παραμέτρου x_a , το μοντέλο εντοπίζει την μέγιστη τιμή θερμοκρασίας που αναπτύχθηκε σε κάθε θέση της μορφής:

$$\mathbf{x} = \mathbf{k} * \mathbf{x}_a, \quad \mathbf{k} \in \mathbb{N} \quad (2.24)$$

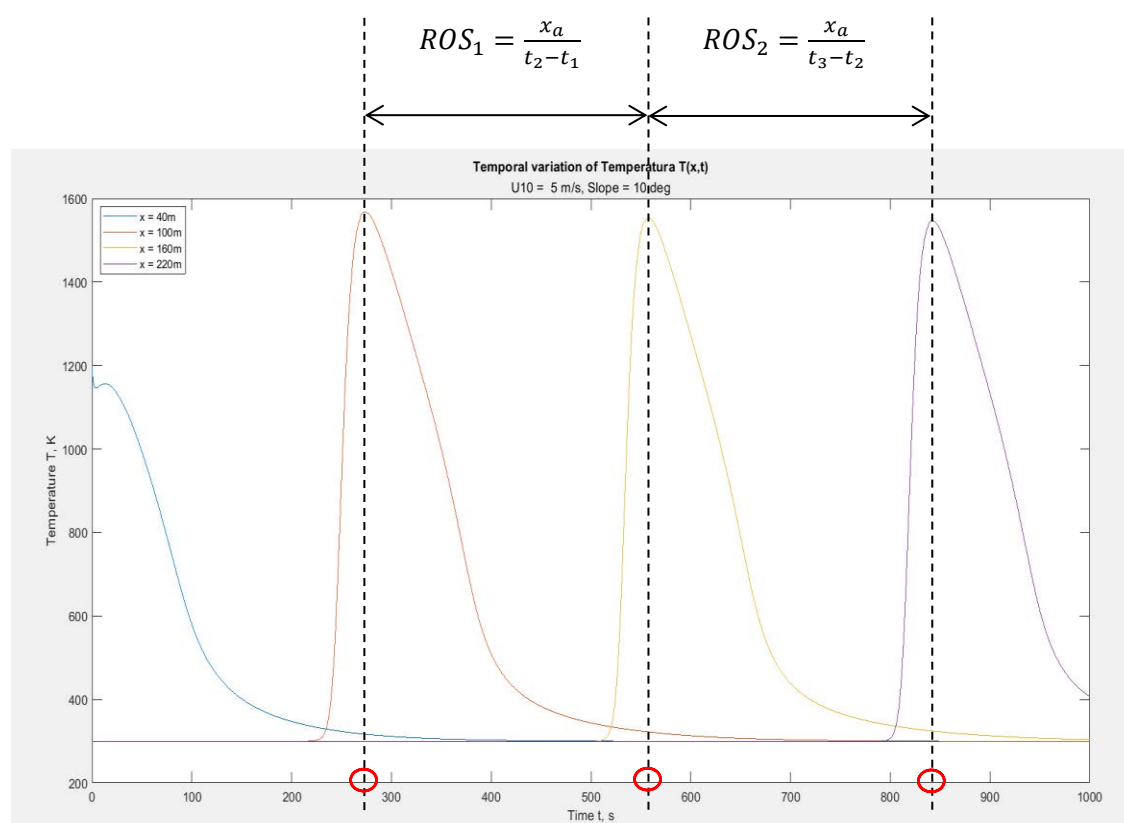
Το υπολογιστικό μοντέλο καταγράφει τόσο τις μέγιστες αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες στα σημεία της εξίσωσης (2.24), όσο και τις χρονικές στιγμές που αυτές εμφανίζονται. Η χρονική στιγμή που καταγράφεται για μια συγκεκριμένη θέση, υποδηλώνει πως το μέτωπο φλόγας έχει φτάσει στο σημείο αυτό την δεδομένη χρονική στιγμή. Συνεπώς, είναι εφικτός ο υπολογισμός του ROS.

Πιο συγκεκριμένα, όταν καθορίζεται το διάστημα x_a , ο ROS υπολογίζεται κάθε σταθερό διάστημα $\Delta x = x_a$. Με την καταγραφή των μεγίστων θερμοκρασιών (peaks) και των αντίστοιχων χρονικών στιγμών ο ROS μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε διάστημα από τον εξής τύπο:

$$ROS_i = \frac{x_a}{t_{i+1} - t_i}, \quad i = 0, 1, \dots \quad (2.25)$$

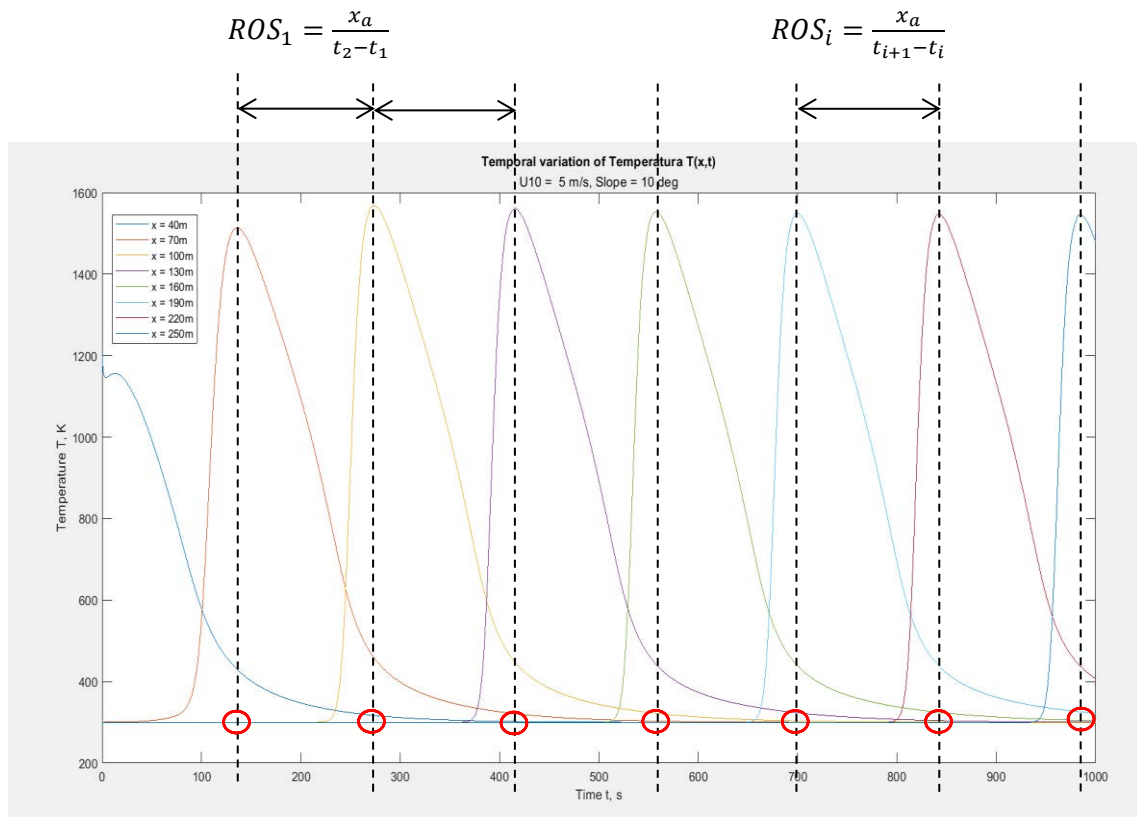
όπου με t_i συμβολίζεται η χρονική στιγμή που εντοπίζεται η μέγιστη θερμοκρασία σε κάθε σημείο της σχέσης (2.24). Στο **Σχήμα 2.5.2.1** απεικονίζεται γραφικά ο πρώτος τρόπος υπολογισμού της ταχύτητας διάδοσης της πυρκαγιάς. Οι διακεκομμένες γραμμές συμβολίζουν τις χρονικές στιγμές που εντοπίζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες.

Είναι απόλυτα λογικό να τεθεί το ερώτημα ποιες είναι οι ενδεδειγμένες τιμές του διαστήματος x_a . Μεγάλες τιμές του διαστήματος x_a οδηγούν σε λιγότερο συχνό υπολογισμό του ROS, ενώ μικρότερες τιμές οδηγούν σε συχνότερο υπολογισμό. Γίνεται αντιληπτό πως η συχνότερη εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης είναι χρήσιμη, έτσι ώστε να γίνει αναλυτική διερεύνηση της διακύμανσης του ROS, με επακόλουθο την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της φλόγας. Ωστόσο, η υπερβολικά συχνή εκτίμηση του ROS, από την μια δεν οδηγεί σε ορθά συμπεράσματα, καθώς η φλόγα χρειάζεται ένα εύλογο χρονικό διάστημα για να διαδοθεί. Από την άλλη, πρέπει να συνεκτιμηθεί και το υπολογιστικό φορτίο με την υπερβολικά συχνή εκτίμηση του ROS. Συνεπώς, η τιμή του x_a εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την εκάστοτε περίπτωση (τιμές των παραμέτρων), αλλά και από την επιθυμητή ακρίβεια. Παρόλα αυτά, έπειτα από ένα μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων τιμές του $x_a \in [3, 10]$ είναι λογικές.



Σχήμα 2.5.2.1: Πρώτος τρόπος υπολογισμού του ROS. $U_{10} = 5 \text{ m/s}$ και κλίση 10° .

Στο **Σχήμα 2.5.2.2** παρουσιάζεται συχνότερος υπολογισμός του ROS συγκριτικά με το αυτόν του **Σχήματος 2.5.2.1** για τις ίδιες τιμές παραμέτρων.



Σχήμα 2.5.2.2: Συχνότερος υπολογισμός σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο εκτίμησης του ROS για τις ίδιες τιμές παραμέτρων. Ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 5 \text{ m/s}$ και $\theta = 10^\circ$.

Σταθερό χρονικό βήμα t_b – Δεύτερος τρόπος εκτίμησης

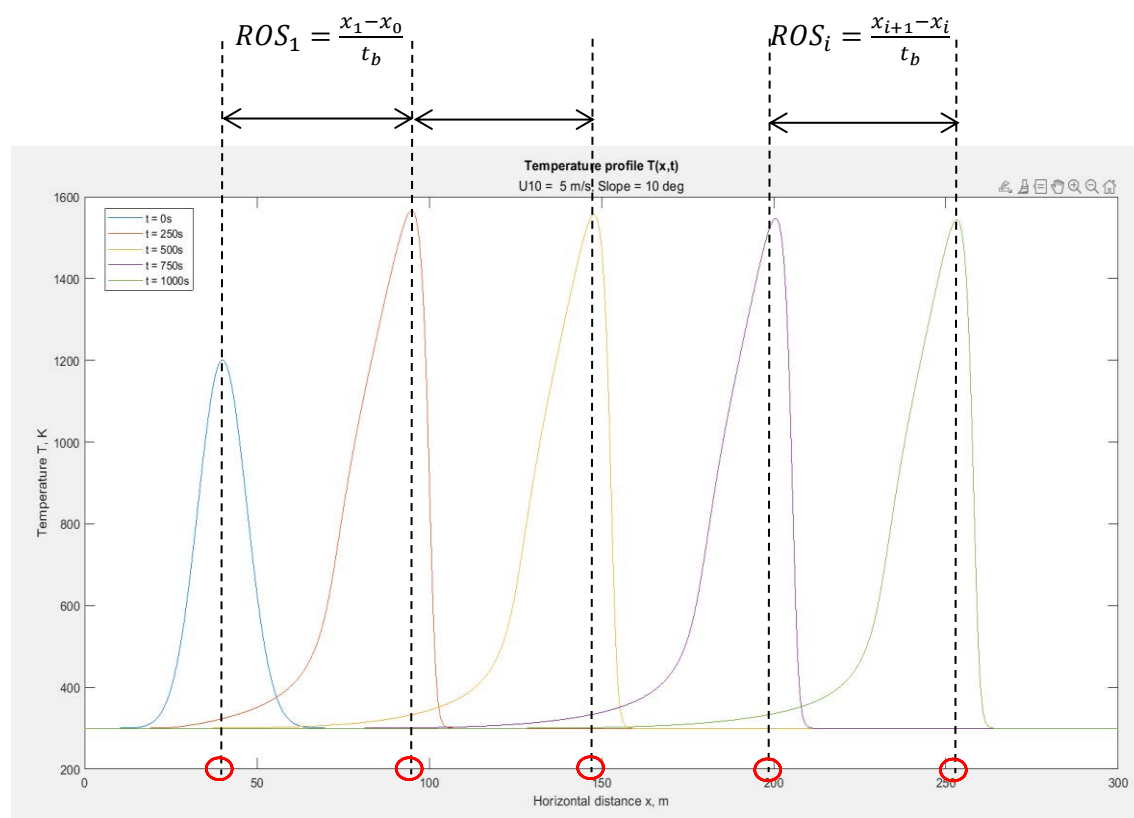
Ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού βασίζεται στην υπόθεση σταθερού χρονικού βήματος t_b (s). Το σταθερό χρονικό βήμα ορίζεται από τον χρήστη και αναπαριστά την συχνότητα με την οποία υπολογίζεται ο ROS, καθώς το μέτωπο της φλόγας εξελίσσεται. Το μοντέλο καταγράφει τις μέγιστες τιμές των προφίλ θερμοκρασίας και των θέσεων τους ανά χρονικό διάστημα $\Delta t = t_b$ δευτερόλεπτα. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε χρονική στιγμή της μορφής:

$$t = m \cdot t_b, \quad m \in \mathbb{N} \quad (2.26)$$

εντοπίζεται η θέση x_i που εμφανίζεται το μέγιστο του προφίλ θερμοκρασίας. Εάν είναι γνωστές όλες οι χωρικές θέσεις x_i στις χρονικές στιγμές της σχέσης (2.26), τότε είναι εφικτός ο υπολογισμός του ROS σε κάθε χρονικό διάστημα σύμφωνα με τον εξής τύπο:

$$ROS_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_b}, \quad i = 0, 1, \dots \quad (2.27)$$

Η γραφική απεικόνιση του δεύτερου τρόπου εκτίμησης της ταχύτητας διάδοσης απεικονίζεται στο **Σχήμα 2.5.2.3**. Παρουσιάζονται τα προφίλ θερμοκρασίας τις χρονικές στιγμές που ικανοποιούν την σχέση **(2.26)** για ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 5 \text{ m/s}$ και κλίση εδάφους 10° . Οι διακεκομμένες γραμμές αντιπροσωπεύουν τις χωρικές θέσεις x_i , όπου συναντώνται τα μέγιστα των προφίλ θερμοκρασίας



Σχήμα 2.5.2.3: Δεύτερος τρόπος υπολογισμού του ROS. $U_{10} = 5 \text{ m/s}$ και $\theta = 10^\circ$.

Όσο πιο μικρή είναι η τιμή του βήματος t_b , τόσο πιο συχνή είναι η εκτίμηση του ROS. Όπως αναφέρθηκε αντίστοιχα και στον πρώτο τρόπο υπολογισμού, ο υπολογισμός του ROS για μεγάλες τιμές του βήματος t_b στερείται ακρίβειας και δεν είναι δυνατή η αναλυτική εξέταση της χρονικής του διακύμανσης. Από την άλλη, πολύ μικρές τιμές οδηγούν σε μη λογικά συμπεράσματα, λόγω του χρόνου που χρειάζεται προκειμένου να γίνει η προανάφλεξη της καύσιμης ύλης και να διαδοθεί η πυρκαγιά. Συνεπώς, η επιλογή τιμής εξαρτάται από την εκάστοτε περίπτωση και από την επιθυμητή ακρίβεια. Τιμές του βήματος $t_b \in [5, 20]$ είναι λογικές.

2.6 Εξισώσεις καύσης

Για την πρόβλεψη της διάδοσης της φλόγας είναι απαραίτητη η κατάστρωση εξισώσεων που να περιγράφουν την φυσική του προβλήματος. Η ερμηνεία και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της φλόγας συνιστά δύσκολο αντικείμενο μελέτης. Υπεισέρχονται φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας, θεωρία από την θερμοδυναμική και την μηχανική των ρευστών, αλλά λαμβάνεται υπόψιν και η πιθανολογική συμπεριφορά της φλόγας, λόγω αστάθμητων παραγόντων, όπως είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες και η ανομοιομορφία του εδάφους και της καύσιμης ύλης. Παρά την πολυπλοκότητα του προβλήματος, είναι εφικτή η διατύπωση απλών εξισώσεων που να ερμηνεύουν την διάδοση της φλόγας.

2.6.1 Ισοζύγιο μάζας και ενέργειας

Οι δύο βασικές εξισώσεις που πρέπει να ικανοποιούνται από την μοντελοποίηση του προβλήματος είναι τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας.

Ισοζύγιο μάζας

Η κατάστρωση του ισοζυγίου μάζας στηρίζεται στην απλή θεώρηση ότι η καύση αποτελείται από δύο απλές αντιδράσεις, την εξάτμιση της υγρασίας και την μετατροπή της ξηρής ύλης σε προϊόντα καύσης (CO_2 , CO , H_2O , κλπ). Κατά την καύση το νερό που περιέχεται στην καύσιμη ύλη (υγρασία) εξατμίζεται, καθώς ένα ποσό της ενέργειας καταναλώνεται για την αλλαγή φάσης του νερού (ενδόθερμη αντίδραση). Στην συνέχεια, όταν όλη η υγρασία έχει εξατμιστεί, λαμβάνει χώρα η κατανάλωση της στερεής εύφλεκτης ύλης με την έκλυση ενέργειας, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας των προϊόντων της καύσης (εξώθερμη αντίδραση).

Η ποσότητα της στερεής φάσης μια δεδομένη χρονική στιγμή δίνεται από την σχέση (2.5), η οποία μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου. Αυτό οφείλεται λόγω της μετατροπής της ύλης σε αέρια προϊόντα της καύσης. Η μάζα των προϊόντων συμβολίζεται με m_g ($[=] \text{Kg/m}^3$). Θεωρώντας ότι η καύση πραγματοποιείται σε ένα κλειστό σύστημα το ισοζύγιο μάζας εκφράζεται ως εξής:

$$m_s(t) + m_g(t) = a\rho_s + (1 - a)\rho_{air} \quad [5] \quad (2.28)$$

όπου m_s η μάζα της στερεής ύλης ($[=] \text{Kg/m}^3$), a το κλάσμα όγκου, ρ_s η πυκνότητα της καύσιμης ύλης ($[=] \text{Kg/m}^3$), ρ_{air} η πυκνότητα του αέρα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ($[=] \text{Kg/m}^3$).

Το ισοζύγιο της σχέσης **(2.28)** είναι ένα απλό αλλά «χονδρικό» ισοζύγιο, καθώς δεν έχει ληφθεί υπόψιν η παροχή οξυγόνου που απαιτείται για την μετατροπή της ύλης σε αέρια προϊόντα ($m_s \rightarrow m_g$). Παρόλα αυτά αν η μάζα του οξυγόνου, που παρέχεται μέσω του αέρα, θεωρηθεί μικρή συγκριτικά με τους υπόλοιπους όρους, η διατήρηση της μάζας εκφράζεται ως:

$$m_s(t) + m_g(t) = a\rho_s + (1 - a)\rho_{air}$$

Μετατροπή της ύλης σε αέρια προϊόντα καύσης

Αρχική ποσότητα μάζας στο κλειστό σύστημα

Για την αδιάστατη μορφή του ισοζυγίου μάζας αρκεί να οριστεί η αδιάστατη ποσότητα καυσαερίων σύμφωνα με την σχέση:

$$S_g = S_g(x, t) = \frac{m_g(x, t)}{m_{s,0}} \quad (2.29)$$

Συνεπώς, από τις σχέσεις **(2.28)** και **(2.29)** προκύπτει το αδιάστατο ισοζύγιο μάζας:

$$S + S_g = 1 + \frac{1-a}{a} \lambda, \quad \lambda = \frac{\rho_{air}}{\rho_g} \quad [5] \quad (2.30)$$

Ισοζύγιο ενέργειας

Η κατάστρωση του ισοζυγίου ενέργειας για την φλόγα αποτελεί γενικά ένα περίπλοκο αντικείμενο μελέτης. Πρέπει να λαμβάνει υπόψιν τόσο το ισοζύγιο της στερεής φάσης, όσο και το ισοζύγιο της αέριας φάσης. Η αναλυτική παρουσίαση για την εξαγωγή του ολικού ισοζυγίου ξεφεύγει από τον σκοπό της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Παρόλα αυτά, πραγματοποιείται μια συνοπτική αναφορά για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος της διάδοσης φλόγας.

Αρχικά, διατυπώνονται τα ισοζύγια της στερεής και της αέριας φάσης ξεχωριστά. Το ολικό ισοζύγιο προκύπτει από το άθροισμα των δύο ισοζυγίων, για το οποίο γίνεται η υπόθεση της τοπικής ισορροπίας, δηλαδή ότι η στερεή και η αέρια φάση έχουν την ίδια θερμοκρασία. Η αναλυτική σχέση για το ολικό ισοζύγιο εκφράζεται ως εξής [\[5\]](#):

$$\begin{aligned}
 & \text{Όρος συσσώρευσης} \rightarrow (m_s c_{ps} + m_g c_{pg}) \frac{\partial T}{\partial t} = \\
 & = \underbrace{-H_{lv} m_{s1} r_1}_{\text{Όρος κατανάλωσης}} + \underbrace{H_c m_{s2} r_{2t}}_{\text{Όρος παραγωγής}} - \underbrace{m_g c_{pg} \langle u \rangle \cdot \nabla T}_{\text{Όρος συναγωγής λόγω διαφοράς θερμοκρασίας}} + \underbrace{m_g c_{pg} \nabla \cdot (D_{eff} \cdot \nabla T)}_{\text{Όρος για μεταφορά με μοριακά μέσα}} - \underbrace{\frac{U}{H} (T - T_a)}_{\text{Όρος συναγωγής λόγω απωλειών θερμότητας}}
 \end{aligned}
 \tag{2.31}$$

C_{ps} : ειδική θερμοχωρητικότητα της στερεής φάσης ([=] J/KgK).

C_{pg} : ειδική θερμοχωρητικότητα της αέριας φάσης ([=] J/KgK).

H_{lv} : ενθαλπία εξάτμισης του νερού ([=] J/Kg).

H_c : ενθαλπία καύσης ([=] J/Kg).

$\langle u \rangle = (u_x, u_y)$: Διάνυσμα για την μέση ταχύτητα ανέμου σε κάθε διεύθυνση ([=] m/s).

D_{eff} : Διαγώνιος πίνακας που περιλαμβάνει τους συντελεστές μεταφοράς με μοριακά μέσα σε κάθε διεύθυνση (m²/s).

$$D_{eff} = \begin{bmatrix} D_{eff,x} & 0 \\ 0 & D_{eff,y} \end{bmatrix}$$

U : Ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με φυσική συναγωγή και ακτινοβολία ([=] W/m²K).

H : Μέσο ύψος βλάστησης ([=] m).

Η σχέση **(2.31)** αποτυπώνει το γενικό ισοζύγιο ενέργειας προς τις δύο κατευθύνσεις. Στην μονοδιάστατη προσέγγιση το γενικό ισοζύγιο απλοποιείται:

$$\begin{aligned} & (m_s c_{ps} + m_g c_{pg}) \frac{\partial T}{\partial t} = \\ & = -H_{lv} m_{s1} r_1 + H_c m_{s2} r_{2t} - m_g c_{pg} U_{ws} \frac{\partial T}{\partial x} + m_g c_{pg} D_{eff,x} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{U}{H} (T - T_a) \end{aligned} \quad (2.32)$$

Ο όρος U_{ws} ([=] m/s) αποτελεί την ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου που έχει συμπεριληφθεί σε αυτόν η συνεισφορά της κλίσης του εδάφους, σύμφωνα με την σχέση **(3.28)**.

2.6.2 Κινητική της καύσης

Έπειτα από την κατάστρωση των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας, ακολουθεί η διατύπωση των εξισώσεων για την κινητική της καύσης. Με τον όρο κινητική της καύσης εννοείται ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται η ποσότητα της υγρασίας και της ξηρής ύλης με τον χρόνο. Οι ρυθμοί μεταβολής των αδιάστατων ποσοτήτων S_1 και S_2 ακολουθούν κινητική νόμου Arrhenius.

Η χρονική διακύμανση της αδιάστατης ποσότητας υγρασίας εκφράζεται από την σχέση **(2.33)**. Ο ρυθμός εξάτμισης της υγρασίας ακολουθεί τον νόμο του Arrhenius σύμφωνα με την σχέση **(2.34)**

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} = -S_1 r_1 \quad [5] \quad (2.33)$$

$$r_1 = c_{s1} e^{-\frac{b_1}{T}} \quad [5] \quad (2.34)$$

όπου r_1 ([=] s⁻¹) ο ρυθμός εξάτμισης του νερού, c_{s1} ([=] s⁻¹) ο συντελεστής για τον ρυθμό εξάτμισης, b_1 ([=] K) η ενδόθερμη ενέργεια ενεργοποίησης και T ([=] K) η θερμοκρασία. Από την σχέση **(2.33)** η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού εξάτμισης r_1 .

Ο ρυθμός κατανάλωσης για την ποσότητα S_2 δεν περιορίζεται μόνο από τις χαμηλές θερμοκρασίες, όπως στην περίπτωση της εξάτμισης της υγρασίας, αλλά και από την έλλειψη οξυγόνου που είναι απαραίτητο για την καύση. Ο ρυθμός κατανάλωσης λόγω χαμηλής θερμοκρασίας εκφράζεται επίσης από τον νόμο Arrhenius:

$$r_2 = c_{s2} e^{-\frac{b_2}{T}} \quad [5] \quad (2.35)$$

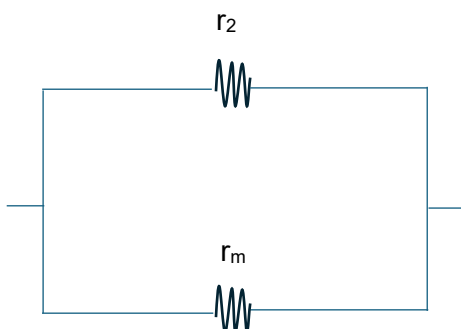
όπου r_2 ($[=] \text{ s}^{-1}$) ο ρυθμός κατανάλωσης λόγω θερμοκρασίας, c_{s2} ($[=] \text{ s}^{-1}$) ο συντελεστής για τον ρυθμό κατανάλωσης, b_2 ($[=] \text{ K}$) η εξώθερμη ενέργεια ενεργοποίησης και T ($[=] \text{ K}$) η θερμοκρασία. Είναι προφανές από την σχέση **(2.35)** ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού κατανάλωσης r_2 .

Ο ρυθμός με τον οποίο παρέχεται το οξυγόνο εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου (ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου), σύμφωνα με την σχέση:

$$r_m = r_{m,0} + r_{m,c}(U_{ws} - 1) \quad (2.36)$$

όπου r_m ($[=] \text{ s}^{-1}$) ο ρυθμός που παρέχεται το οξυγόνο, $r_{m,0}$ ($[=] \text{ s}^{-1}$) ο ρυθμός που παρέχεται το οξυγόνο χωρίς την παρουσία αέρα, $r_{m,c}$ ($[=] \text{ m}^{-1}$) συντελεστής για τον ρυθμό οξυγόνου και U_{ws} η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου που περιγράφεται από την σχέση **(3.28)**.

Οι δύο ρυθμοί **(2.35)** και **(2.36)** που συμβάλλουν στην κατανάλωση της ποσότητας S_2 μπορεί να θεωρηθούν σαν παράλληλες αντιστάσεις. Ο συνολικός ρυθμός r_{2t} ($[=] \text{ s}^{-1}$) με τον οποίο τελικά καταναλώνεται η ποσότητα S_2 προκύπτει ως η ισοδύναμη αντίσταση από την παράλληλη σύνδεση των δύο προηγούμενων αντιστάσεων [5].



Σχήμα 2.6.2.1: Παράλληλη σύνδεση των δύο ρυθμών r_2 και r_m .

Συνεπώς, ο συνολικός ρυθμός κατανάλωσης της ποσότητας S_2 υπολογίζεται από την σχέση **(2.37)** και η χρονική της διακύμανση εκφράζεται από την σχέση **(2.38)**.

$$\frac{1}{r_{2t}} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_m} \Rightarrow r_{2t} = \frac{r_2 r_m}{r_2 + r_m} = \frac{c_{s2} e^{-\frac{b_2}{T}} r_m}{c_{s2} e^{-\frac{b_2}{T}} + r_m} \quad [5] \quad (2.37)$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial t} = -S_2 r_{2t} \quad [5] \quad (2.38)$$

2.7 Προσομοίωση έναρξης της φλόγας

Αξίζει να γίνει αναφορά στον τρόπο με τον οποίο γίνεται η μοντελοποίηση για την έναρξη της φλόγας. Η έναρξη μπορεί να προσομοιωθεί με ένα προφίλ θερμοκρασιών που έχει κανονική κατανομή (Gaussian distribution) με τυπική απόκλιση σ και μέση τιμή x_0 . Η μέση τιμή αναπαριστά ουσιαστικά την θέση στην οποία γίνεται η έναρξη της φλόγας, ενώ η τυπική απόκλιση σ συνιστά μέγεθος που καθορίζει την έκταση του προφίλ θερμοκρασίας. Η αναλυτική σχέση της κανονικής κατανομής που χρησιμοποιείται είναι:

$$T = T_{max} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{\sigma^2}} + T_a \quad (2.39)$$

όπου T_{max} ([=] K) ο συντελεστής που πολλαπλασιάζεται με τον εκθετικό όρο, T_a η θερμοκρασία του περιβάλλοντος ([=] K). Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται σε όλη την ανάλυση της διπλωματικής εργασίας είναι: $T_{max} = 900 \text{ K}$, $T_a = 300 \text{ K}$, $\sigma = 10$, $x_0 = 40 \text{ m}$.

Κεφάλαιο 3. ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ RALPH M. NELSON

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η διάδοση μια δασικής πυρκαγιάς σε κεκλιμένο και οριζόντιο έδαφος. Εξετάζονται σημαντικές περιπτώσεις τιμών της ταχύτητας του ανέμου και της κλίσης και εξάγονται οι απαραίτητες μαθηματικές σχέσεις για την επίδραση των δύο παραγόντων. Ίσως αρκετοί να θεωρούν πως η ύπαρξη της ανηφόρας να καθυστερεί την εξάπλωση της φωτιάς, ενώ μια κατηφόρα να την επιταχύνει. Ωστόσο, σε μια ενδεχόμενη κατάσταση πραγματικής πυρκαγιάς παρατηρείται ακριβώς το αντίθετο. Σκοπός, λοιπόν, του παρόντος Κεφαλαίου είναι να δοθεί με απλές μαθηματικές εκφράσεις η εξήγηση της παραπάνω διαπίστωσης.

Η μοντελοποίηση της συνεισφοράς της κλίσης του εδάφους στην ταχύτητα διάδοσης της φλόγας (ROS), σύμφωνα με τον Ralph M. Nelson [4], βασίζεται στην θεώρηση της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου (effective wind velocity). Η ισοδύναμη ταχύτητα του ανέμου εμπεριέχει την ταυτόχρονη συνεισφορά της πραγματικής ταχύτητας του ανέμου και της κλίσης του εδάφους. Ουσιαστικά αναπαριστά την υποθετική ταχύτητα ανέμου που διαδίδει την φλόγα με τον ρυθμό που θα διαδίδονταν εάν ληφθεί υπόψιν τόσο η συνεισφορά του ανέμου, όσο και η κλίση του εδάφους. Η κλίση και η ταχύτητα του ανέμου, κατά τον Ralph M. Nelson, δεν πρέπει να θεωρούνται ως ανεξάρτητοι παράμετροι. Πρόκειται για μια αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο παραγόντων που έχουν κοινή συνεισφορά στην ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς.

Αντίθετα, άλλα μοντέλα θεωρούν ότι η κλίση του εδάφους και η ταχύτητα ανέμου έχουν ξεχωριστή επίδραση. Για παράδειγμα, το μοντέλο του Rothermel [9], το οποίο αποτελεί το πιο διαδεδομένο μοντέλο μέχρι και σήμερα, στηρίζεται στην άθροιση των δύο παραγόντων για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης της δασικής πυρκαγιάς. Ο Rothermel διατύπωσε εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό των δύο όρων για την συνεισφορά του ανέμου και της κλίσης. Το άθροισμά τους πολλαπλασιάζεται με τον όρο που αφορά την ταχύτητα διάδοσης της φλόγας χωρίς την παρουσία ανέμου και κλίσης. Ο Frank Albini [10] εισήγαγε την ιδέα ενοποίησης της κοινής συνεισφοράς των δύο παραγόντων μέσω της παραμέτρου της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου. Για τον υπολογισμό της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου βασίστηκε στις εμπειρικές σχέσεις του Rothermel που εκτιμούν την επίδραση του ανέμου και της κλίσης.

Το μοντέλο του Nelson στηρίζεται στην χρήση της τριγωνομετρίας, όπως απεικονίζεται στο **Σχήματα 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3**. Χρησιμοποιείται η ανωστική ταχύτητα της φλόγας U_b , που αναπαριστά ουσιαστικά την ταχύτητα των καυσαερίων και η μέση ταχύτητα ανέμου U_a . Η ταχύτητα του ανέμου αναπαριστά την μέση ταχύτητα ανέμου που επηρεάζει την φλόγα, όπως προκύπτει από την σχέση **(2.16)** [5]. Η ταχύτητα U_a υπολογίζεται ως τον σταθμισμένο μέσο όρο των ταχυτήτων U_v , μέση ταχύτητα που εξέρχεται από την «άκαυτη» βλάστηση [7] και U_f , μέση ταχύτητα που εξέρχεται από την «καμένη» βλάστηση [5].

3.1 Ανηφόρα

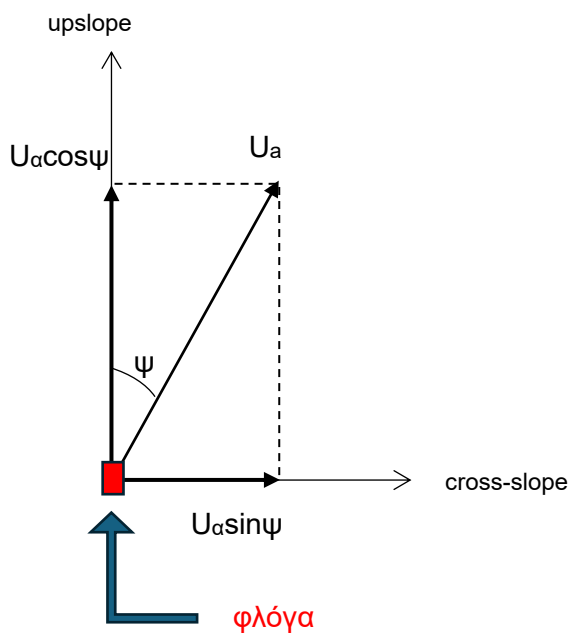
Παρατηρώντας το **Σχήμα 3.1.1**, η ταχύτητα U_a σχηματίζει μια γωνία ψ με την διεύθυνση του κεκλιμένου εδάφους. Πρόκειται για την κάτοψη, με τον όρο «upslope» να υποδηλώνεται το ανηφορικό έδαφος, ενώ με τον όρο «cross-slope» εννοείται η διεύθυνση που είναι κάθετη στην διεύθυνση του κεκλιμένου εδάφους. Η συνιστώσα της ταχύτητας U_a στην διεύθυνση του κεκλιμένου εδάφους είναι $U_a \cos \psi$ και η συνιστώσα της ταχύτητας U_a στην διεύθυνση που είναι κάθετη στην διεύθυνση του κεκλιμένου είναι αντίστοιχα $U_a \sin \psi$.

Στο **Σχήμα 3.1.2** απεικονίζεται η προβολή της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων U_b στην διεύθυνση του ανηφορικού εδάφους. Το κεκλιμένο έδαφος σχηματίζει μια γωνία θ με την οριζόντια διεύθυνση «horizontal». Η γωνία θ μετράται αριστερόστροφα από το οριζόντιο έδαφος, έτσι ώστε μια θετική γωνία θ να ορίζει την περίπτωση της ανηφορικής κλίσης «upslope», ενώ μια αρνητική γωνία θ (δεξιόστροφα από το οριζόντιο έδαφος) να ορίζει την κατηφορική κλίση «downslope», όπως παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.1.4**. Η ανωστική ταχύτητα της φλόγας U_b έχει διεύθυνση κάθετη ως προς το οριζόντιο έδαφος, λόγω της μικρότερης πυκνότητας των θερμών καυσαερίων σε σχέση με την πυκνότητα του αέρα σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Για να βρεθεί η συνεισφορά της ανωστικής ταχύτητας, προβάλλεται το διάνυσμα U_b πάνω στην διεύθυνση του κεκλιμένου εδάφους. Με χρήση απλής τριγωνομετρίας, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.1.2**, η προβολή είναι ίση με $U_b \sin \theta$. Η ποσότητα $U_b \sin \theta$ θα συμβολίζεται πιο απλά ως U_s , εννοώντας την συνεισφορά της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων στην διεύθυνση του κεκλιμένου εδάφους

$$U_s = U_b \sin \theta \quad (3.1)$$

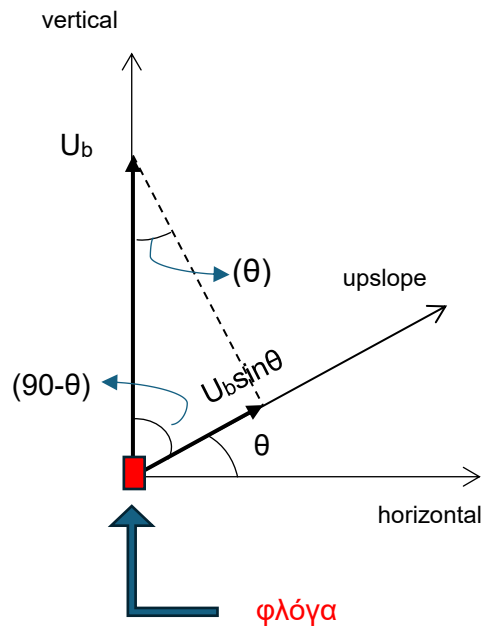
Προκειμένου να ληφθεί υπόψιν τόσο η συνεισφορά της κλίσης του εδάφους, όσο και η ταχύτητα του ανέμου U_a στον υπολογισμό της ισοδύναμης ταχύτητας U_{ws} , απαιτείται η γεωμετρία του **Σχήματος 3.1.3**. Το μαύρο διάνυσμα αναπαριστά την ποσότητα $U_b \sin \theta$ στην διεύθυνση του κεκλιμένου εδάφους. Με γαλάζιο χρώμα απεικονίζεται το διάνυσμα της ταχύτητας του ανέμου U_a και οι αντίστοιχες συνιστώσες της. Η ισοδύναμη ταχύτητα απεικονίζεται με πορτοκαλί χρώμα και προκύπτει από την διανυσματική άθροιση της ταχύτητας του ανέμου και της προβολής $U_s = U_b \sin \theta$.

$$\vec{U}_{ws} = \vec{U}_a + \vec{U}_s \quad (3.2)$$



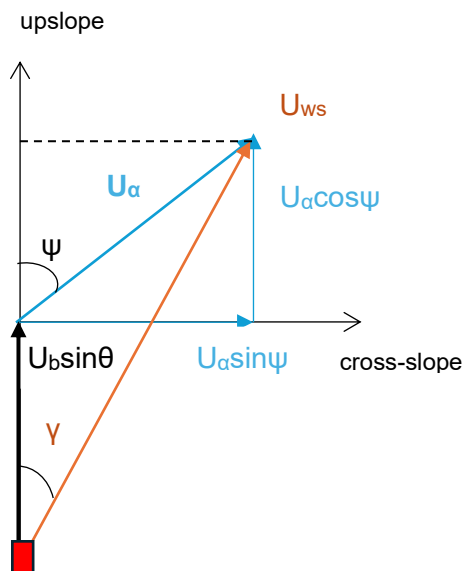
Σχήμα 3.1.1: Διεύθυνση ταχύτητας ανέμου σχετικά με την διεύθυνση του ανηφορικού εδάφους (Κάτοψη).

(Ralph M.Nelson) [4]



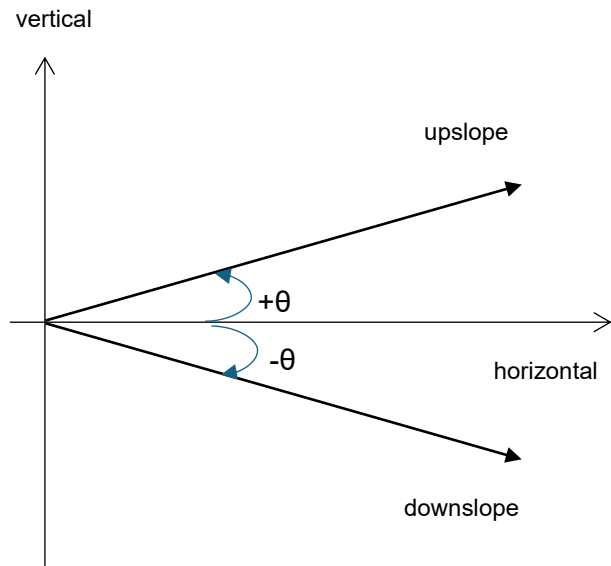
Σχήμα 3.1.2: Προβολή της ανωστικής ταχύτητας της φλόγας στην διεύθυνση του ανηφορικού εδάφους.

(Ralph M.Nelson) [4]



Σχήμα 3.1.3: Η διεύθυνση της ισοδύναμης ταχύτητας του ανέμου.

(Ralph M.Nelson) [4]



Σχήμα 3.1.4: Θετικό πρόσημο γωνίας για την ανηφόρα (upslope) και αρνητικό πρόσημο γωνίας για την κατηφόρα (downslope).

Η διεύθυνση της ισοδύναμης ταχύτητας U_{ws} , εξαρτάται από την γωνία γ , οποία μετράται δεξιόστροφα από την διεύθυνση του ανηφορικού εδάφους «upslope». Για τον υπολογισμό της γωνίας γ , απαιτείται η γνώση των συνιστωσών της ισοδύναμης ταχύτητας στην διεύθυνση του κεκλιμένου εδάφους (upslope) και στην κάθετη σε αυτήν διεύθυνση (cross-slope). Χάριν ευκολίας, ο άξονας x θα αναπαριστά την διεύθυνση «cross-slope» και ο άξονας y θα αναπαριστά την διεύθυνση «upslope». Αντίστοιχα, η U_y συμβολίζει την συνιστώσα της ισοδύναμης ταχύτητας U_{ws} στην διεύθυνση της ανηφόρας, ενώ η U_x συμβολίζει την συνιστώσα που είναι κάθετη σε αυτή, όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.1.6**. Προφανώς η διανυσματική άθροιση των ταχυτήτων U_x και U_y ισούται με το διάνυσμα της U_{ws} .

$$\vec{U}_{ws} = \vec{U}_x + \vec{U}_y \quad (3.3)$$

Στο **Σχήμα 3.1.5** απεικονίζονται όλα τα απαραίτητα μεγέθη στις διευθύνσεις x και y . Συγκρίνοντας το **Σχήμα 3.1.5** με το **Σχήμα 3.1.6**, υπολογίζονται εύκολα οι συνιστώσες της ισοδύναμης ταχύτητας του ανέμου στην διεύθυνση του ανηφορικού εδάφους (άξονας y) και στην κάθετη σε αυτήν διεύθυνση (άξονας x). Συνεπώς, η συνιστώσα της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου στην διεύθυνση της ανηφόρας είναι:

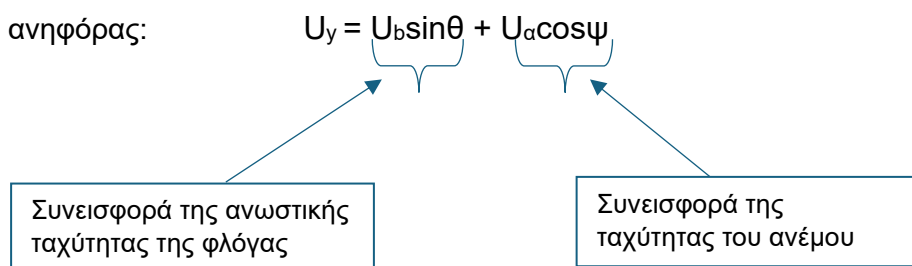
$$U_y = U_b \sin \theta + U_a \cos \psi \quad (3.4)$$

Η συνιστώσα της ισοδύναμης ταχύτητας στην διεύθυνση που είναι κάθετη στο ανηφορικό έδαφος είναι:

$$U_x = U_a \sin \psi \quad (3.5)$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις (3.4) και (3.5) στην διεύθυνση της ανηφόρας (y διεύθυνση) συνεισφέρει τόσο η ανωστική ταχύτητα της φλόγας, U_b όσο και η ταχύτητα του ανέμου U_a . Αντίθετα, στην διεύθυνση που είναι κάθετη στο ανηφορικό έδαφος (x διεύθυνση) συνεισφέρει μόνο η ταχύτητα του ανέμου.

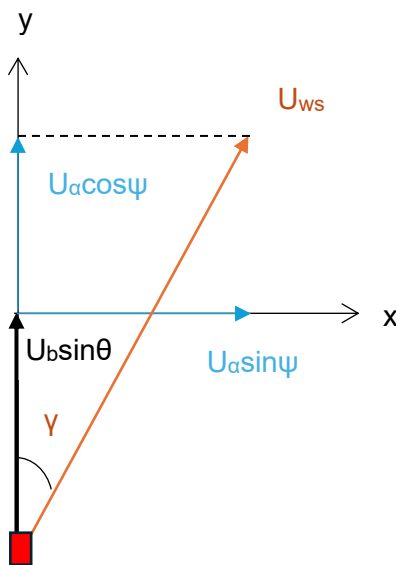
Διεύθυνση ανηφόρας:



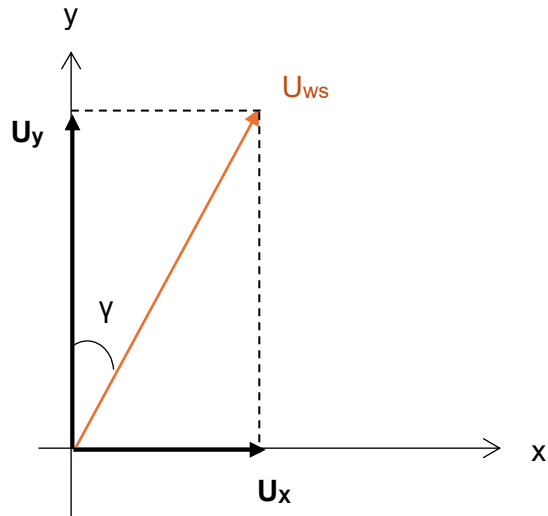
Διεύθυνση κάθετη στο ανηφορικό έδαφος:

$$U_x = U_a \sin \psi$$

Μοναδική συνεισφορά της ταχύτητας του ανέμου



Σχήμα 3.1.5: Οι συνιστώσες της ταχύτητας του ανέμου στις διευθύνσεις x και y και η προβολή της ανωστικής ταχύτητας της φλόγας



Σχήμα 3.1.6: Ανάλυση της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου σε δύο συνιστώσες, μια στον άξονα x (cross-slope) και μια στον άξονα y (upslope).

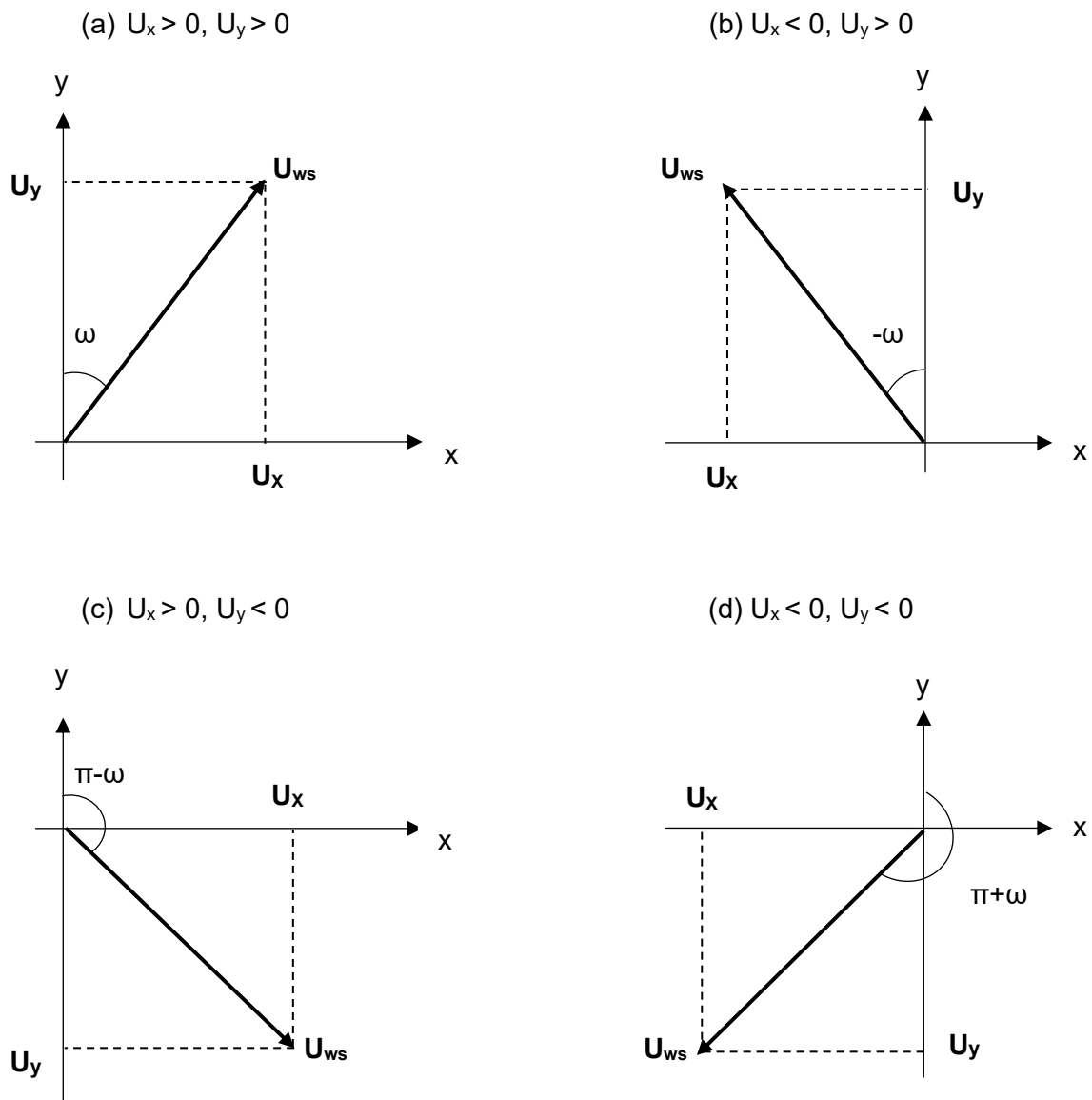
Η διεύθυνση της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου U_{ws} προσδιορίζεται με την γνώση της γωνίας γ . Σύμφωνα με το **Σχήμα 3.1.5** και το **Σχήμα 3.1.6** η γωνία γ υπολογίζεται ως εξής:

$$\tan \gamma = \frac{U_x}{U_y} = \frac{U_a \sin \psi}{U_b \sin \theta + U_a \cos \psi} = \frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\sin \theta + \frac{U_a}{U_b} \cos \psi} \Rightarrow \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\sin \theta + \frac{U_a}{U_b} \cos \psi} \right). \quad (3.6)$$

Για τον υπολογισμό της γωνίας γ απαιτείται τόσο το μέτρο των συνιστωσών U_x και U_y , όσο και ο προσανατολισμός των ημιαξόνων x και y. Με άλλα λόγια πρέπει να γνωρίζουμε σε ποιο τεταρτημόριο βρίσκεται το διάνυσμα της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου, ώστε να υπολογιστεί ορθά η τιμή της γωνίας γ . Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι η γωνία γ μετράται δεξιόστροφα από τον θετικό ημιάξονα y. Για αυτό

εξετάζονται οι τέσσερις δυνατές περιπτώσεις, όπως απεικονίζονται στο **Σχήμα 3.1.7**. Για ευκολία ορίζουμε ως Arg την ποσότητα $\frac{U_x}{U_y}$.

$$Arg = \frac{U_x}{U_y} \quad (3.7)$$



Σχήμα 3.1.7: Η κατεύθυνση του διανύσματος της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου εξαρτάται από τον προσανατολισμό των θετικών ημιαξόνων. $\omega = \tan^{-1}(|Arg|)$

Σύμφωνα με τις τέσσερις περιπτώσεις, **Σχήμα 3.1.7(a)-(d)**, προκύπτουν οι εξής εξισώσεις:

$$\begin{aligned}
 \gamma &= \tan^{-1}(\text{Arg}) , & (a) \ U_x > 0, U_y > 0 \\
 \gamma &= -\tan^{-1}(-\text{Arg}) , & (b) \ U_x < 0, U_y > 0 \\
 \gamma &= \pi - \tan^{-1}(-\text{Arg}) , & (c) \ U_x > 0, U_y < 0 \\
 \gamma &= \pi + \tan^{-1}(\text{Arg}) , & (d) \ U_x < 0, U_y < 0
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Το μέτρο του διανύσματος της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου U_{ws} προκύπτει από την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{aligned}
 U_{ws}^2 &= U_x^2 + U_y^2 \Rightarrow U_{ws}^2 = (U_a \sin \psi)^2 + (U_b \sin \theta + U_a \cos \psi)^2 \Rightarrow \\
 U_{ws} &= \sqrt{U_a^2 \sin^2 \psi + U_b^2 \sin^2 \theta + 2U_a U_b \sin \theta \cos \psi + U_a^2 \cos^2 \psi} \Rightarrow \\
 U_{ws} &= \sqrt{U_b^2 \left(\frac{U_a^2}{U_b^2} \sin^2 \psi + \sin^2 \theta + 2 \frac{U_a}{U_b} \sin \theta \cos \psi + \frac{U_a^2}{U_b^2} \cos^2 \psi \right)} \Rightarrow \\
 U_{ws} &= U_b \sqrt{\frac{U_a^2}{U_b^2} (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi) + 2 \frac{U_a}{U_b} \sin \theta \cos \psi + \sin^2 \theta} \Rightarrow \\
 U_{ws} &= U_b \sqrt{\frac{U_a^2}{U_b^2} + 2 \frac{U_a}{U_b} \sin \theta \cos \psi + \sin^2 \theta}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Συγκεντρωτικά το μέτρο και η διεύθυνση του διανύσματος της ισοδύναμης ταχύτητας προσδιορίζονται από τις σχέσεις **(3.9)** και **(3.6)** αντίστοιχα.

$$\begin{aligned}
 U_{ws} &= U_b \left[\frac{U_a^2}{U_b^2} + 2 \frac{U_a}{U_b} \sin \theta \cos \psi + \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \\
 \gamma &= \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\sin \theta + \frac{U_a}{U_b} \cos \psi} \right)
 \end{aligned}$$

Η μαθηματική εξίσωση **(3.9)** καταδεικνύει την κοινή συνεισφορά της ταχύτητας του ανέμου U_a και της κλίσης του εδάφους (γωνία θ με το οριζόντιο έδαφος), όπως υποθέτει η μοντελοποίηση του Ralph M. Nelson. Ο όρος $(2 \frac{U_a}{U_b} \sin\theta \cos\psi)$ ενσωματώνει την ταυτόχρονη συνεισφορά των δύο παραγόντων.

$$U_{ws} = U_b \left[\frac{U_a^2}{U_b^2} + 2 \frac{U_a}{U_b} \sin\theta \cos\psi + \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}}$$

Κοινή συνεισφορά της ταχύτητας του ανέμου και της κλίσης του εδάφους.

Είναι σημαντικό να διερευνηθεί η μορφή της εξίσωσης για την ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου U_{ws} [εξίσωση **(3.9)**] κάτω από ορισμένες περιπτώσεις τιμών της ταχύτητας ανέμου U_a και της διεύθυνσής της (γωνία ψ), αλλά και της κλίσης του εδάφους (γωνία θ). Αρχικά εξετάζεται η μονοδιάστατη προσέγγιση του προβλήματος, πάνω την οποία στηρίζεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Στην συνέχεια εξετάζονται κάποιες ειδικές περιπτώσεις

3.1.1 Μονοδιάστατη προσέγγιση

Ο όρος μονοδιάστατη προσέγγιση αναφέρεται στην περίπτωση όπου η διεύθυνση της ταχύτητας του ανέμου συμπίπτει με την διεύθυνση του κεκλιμένου εδάφους. Στην περίπτωση αυτή $\psi=0$ και ο άνεμος φυσάει στην διεύθυνση του ανηφορικού εδάφους (**Σχήμα 3.1.1**). Συνεπώς το μέτρο και η διεύθυνση της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου απλοποιούνται. Η μονοδιάστατη προσέγγιση αποτελεί σημαντική περίπτωση, καθώς συνιστά το κεντρικό σημείο μελέτης και εξαγωγής συμπερασμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η μορφή της εξίσωσης **(3.9)** γίνεται :

$$U_{ws} = U_b \left[\frac{U_a^2}{U_b^2} + 2 \frac{U_a}{U_b} \sin\theta \cos\psi + \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \xrightarrow{\psi=0}$$

$$U_{ws} = U_b \left[\frac{U_a^2}{U_b^2} + 2 \frac{U_a}{U_b} \sin\theta + \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$U_{ws} = U_b \left[\left(\frac{U_a}{U_b} + \sin\theta \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$U_{ws} = U_a + U_b \sin\theta \quad (3.10)$$

Άρα στην περίπτωση που ο άνεμος φυσάει κατά την διεύθυνση της ανηφόρας :

$$U_{ws} = U_a + U_b \sin\theta$$

Από την εξίσωση (3.6) προκύπτει πως η δασική πυρκαγιά θα διαδοθεί μόνο στην διεύθυνση της ανηφόρας.

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin\psi}{\sin\theta + \frac{U_a}{U_b} \cos\psi} \right) \xrightarrow{\psi=0} \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\cancel{\frac{U_a}{U_b}} \sin\psi}{\sin\theta + \cancel{\frac{U_a}{U_b}} \cos\psi} \right) \Rightarrow$$

$$\gamma = \tan^{-1}(0) \Rightarrow \gamma = 0 \quad (3.11)$$

3.1.2 Μηδενική ταχύτητα ανέμου

Εξετάζεται η περίπτωση μηδενικής ταχύτητας ανέμου ($U_a = 0$) και μη μηδενικής κλίσης ($\theta \neq 0$). Με την απλοποίηση αυτή, το μέτρο της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου είναι :

$$U_{ws} = U_b \left[\frac{U_a^2}{U_b^2} + 2 \frac{U_a}{U_b} \sin\theta \cos\psi + \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \xrightarrow{U_a=0}$$

$$U_{ws} = U_b \left[\cancel{\frac{U_a^2}{U_b^2}} + 2 \cancel{\frac{U_a}{U_b}} \sin\theta \cos\psi + \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$U_{ws} = U_b \sin\theta \quad (3.12)$$

Όσον αφορά την διεύθυνση της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου :

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\sin \theta + \frac{U_a}{U_b} \cos \psi} \right) \xrightarrow{U_a=0} \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\cancel{\frac{U_a}{U_b}} \sin \psi}{\sin \theta + \cancel{\frac{U_a}{U_b}} \cos \psi} \right) \Rightarrow$$

$$\gamma = \tan^{-1}(0) \Rightarrow \gamma = 0 \quad (3.13)$$

Όπως διαπιστώνεται από τις σχέσεις **(3.12)** και **(3.13)**, απουσία ανέμου, η διάδοση της φλόγας οφείλεται μόνο στην ανωστική ταχύτητα των καυσαερίων με διεύθυνση την ανηφόρα. Από την φυσική σκοπιά, η ύπαρξη της κλίσης κάνει αποδοτικότερη την προανάφλεξη της καύσιμης ύλης προκαλώντας την διάδοσή της. Στο Κεφάλαιο «Αποτελέσματα» θα εξεταστεί η ισχύς της παραπάνω θέσης μέσω των υπολογιστικών προσομοιώσεων.

3.2 Οριζόντιο έδαφος

Στην περίπτωση οριζοντίου εδάφους ($\theta=0$), η ανωστική ταχύτητα των καυσαερίων δεν επηρεάζει την διάδοσή της δασικής πυρκαγιάς [σχέση **(3.14)**]. Απλοποιώντας την γενικότερη σχέση **(3.9)** για $\theta=0$ προκύπτει :

$$U_{ws} = U_b \left[\frac{U_a^2}{U_b^2} + 2 \frac{U_a}{U_b} \sin \theta \cos \psi + \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}} \xrightarrow{\theta=0}$$

$$U_{ws} = U_b \left[\frac{U_a^2}{U_b^2} + 2 \cancel{\frac{U_a}{U_b} \sin \theta} \cos \psi + \cancel{\sin^2 \theta} \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow U_{ws} = U_a \quad (3.14)$$

Η διεύθυνση διάδοσης της φλόγας προκύπτει ως εξής :

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\sin \theta + \frac{U_a}{U_b} \cos \psi} \right) \xrightarrow{\theta=0} \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\cancel{\sin \theta} + \frac{U_a}{U_b} \cos \psi} \right) \Rightarrow$$

$$\gamma = \tan^{-1}(\tan \psi) \Rightarrow \gamma = \psi \quad (3.15)$$

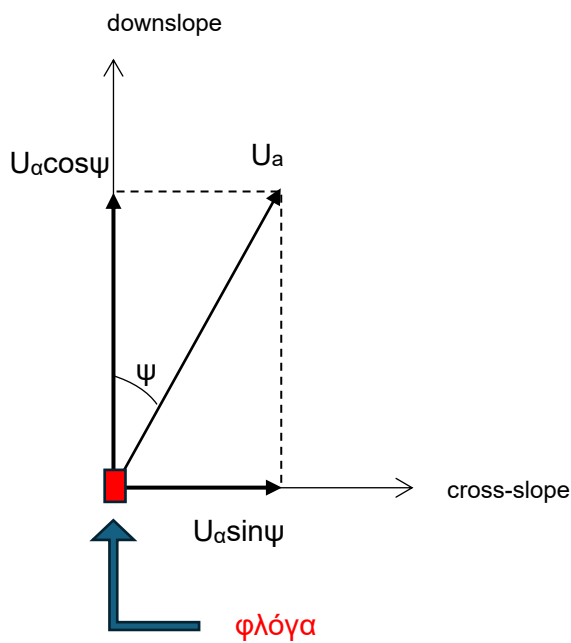
Συνεπώς, όταν πρόκειται για οριζόντιο έδαφος, όπως είναι λογικό, η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου ανάγεται στην πραγματική ταχύτητα ανέμου [σχέση **(3.14)**] και η

διεύθυνση διάδοσης της φωτιάς συμπίπτει με την διεύθυνση που φυσάει ο άνεμος [σχέση (3.15)].

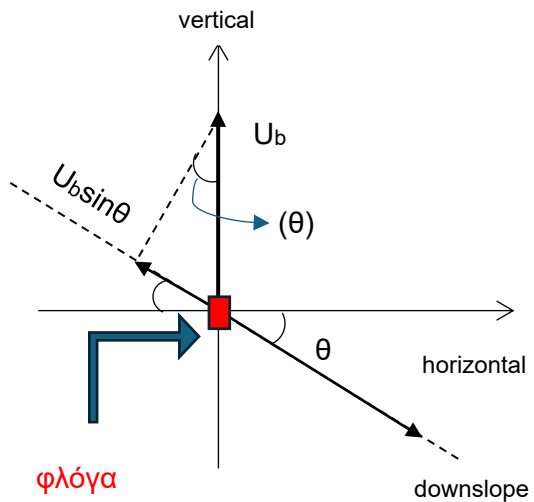
3.3 Κατηφόρα

Στο κατηφορικό έδαφος η φλόγα επιβραδύνεται και εμποδίζεται η ταχεία εξάπλωσή της. Αυτό οφείλεται στην αντίθετη φορά που έχει το διάνυσμα της προβολής της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων U_b σε σχέση με το διάνυσμα της συνιστώσας $U_a \cos \psi$, όπως απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.3.3**. Η διεύθυνση της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και η ανάλυση του διανύσματος στις επιμέρους συνιστώσες, απεικονίζεται στο **Σχήμα 3.3.1**. Πρόκειται για την κάτοψη, με τον όρο «downslope» να υποδηλώνεται η κατηφόρα και με τον όρο «cross-slope» να εννοείται η διεύθυνση που είναι κάθετη στην διεύθυνση του κατηφορικού εδάφους. Σε αντίθεση με την ανηφόρα, η προβολή της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων έχει αντίθετη φορά από τον θετικό ημιάξονα «downslope» που συμβολίζει την αύξηση της απόστασης στην κατηφόρα (**Σχήμα 3.3.2**). Για την εύρεση του μέτρου και της διεύθυνσης της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου U_{ws} , μεταβάλλεται η φορά του διανύσματος της προβολής $U_b \sin \theta$ προκειμένου να γίνει ευκολότερη η διανυσματική άθροιση των συνιστωσών στην διεύθυνση της κατηφόρας (**Σχήμα 3.3.4**). Για την μαθηματική ορθότητα, με την αλλαγή στην φορά του διανύσματος η ποσότητα $U_b \sin \theta$ μεταβάλλεται σε $-U_b \sin \theta$. Συνεπώς, από το **Σχήμα 3.3.4** προκύπτει η εξής σχέση :

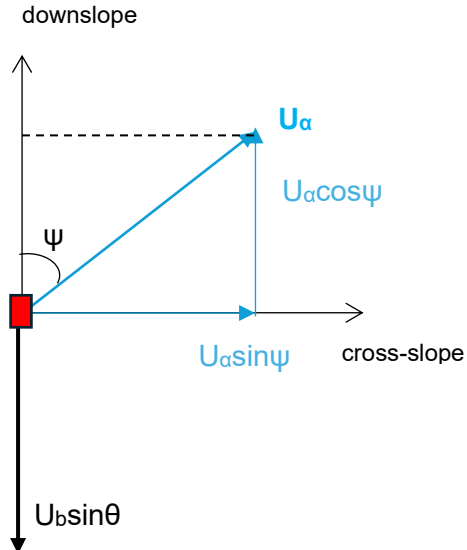
$$\vec{U}_{ws} = \vec{U}_a - \vec{U}_b \sin \theta \quad (3.16)$$



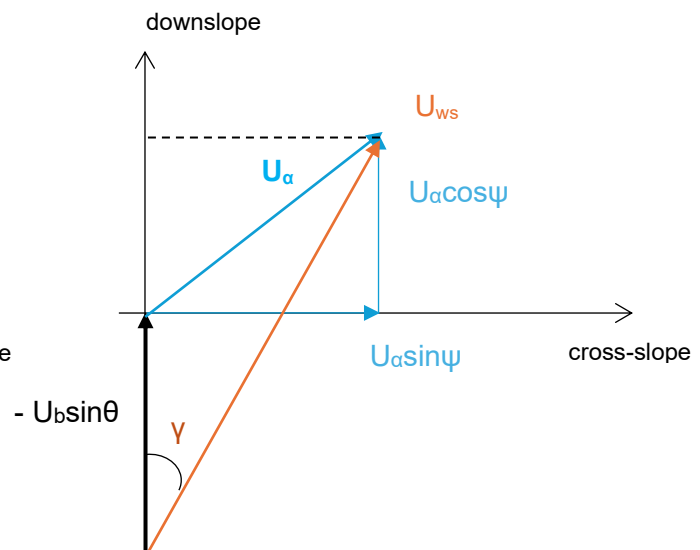
Σχήμα 3.3.1: Διεύθυνση ταχύτητας ανέμου σχετικά με την διεύθυνση του κατηφορικού εδάφους (Κάτοψη).



Σχήμα 3.3.2: Προβολή της ανωστικής ταχύτητας της φλόγας στην διεύθυνση του κατηφορικού εδάφους.



Σχήμα 3.3.3: Η συνιστώσα $U_a \cos \psi$ και η προβολή $U_b \sin \theta$ έχουν αντίθετη φορά στην περίπτωση του κατηφορικού εδάφους.



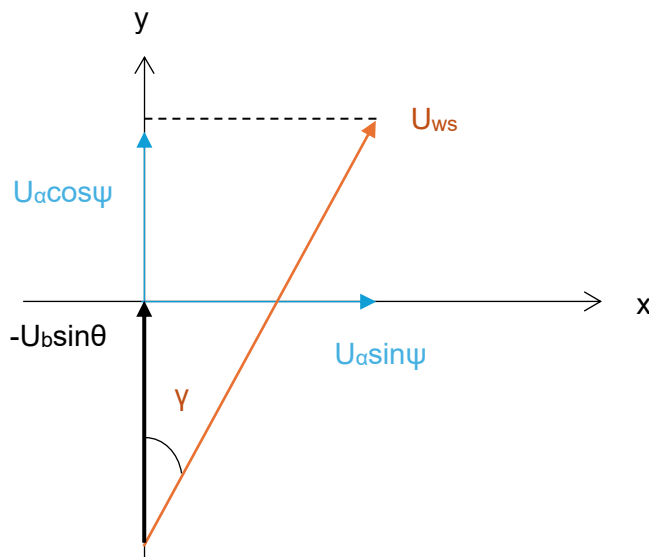
Σχήμα 3.3.4: Διεύθυνση της U_{ws} στην κατηφόρα, αφού αλλάξει η φορά του διανύσματος $U_b \sin \theta$.

Για ευκολία ορίζουμε, όπως και στην περίπτωση της ανηφόρας, ως y την διεύθυνση της κατηφόρας (downslope) και ως x την κάθετη διεύθυνση στην κατηφόρα (cross-slope). Κατ' επέκταση, η U_y συμβολίζει την συνιστώσα της ισοδύναμης ταχύτητας U_{ws} στην διεύθυνση του κατηφορικού εδάφους, ενώ η U_x συμβολίζει την αντίστοιχη συνιστώσα στην κάθετη διεύθυνση ως προς το κατηφορικό έδαφος (**Σχήμα 3.1.6** με την διαφορά ότι τώρα ο ημιάξονας y συμβολίζει την κατηφόρα). Είναι προφανές, όπως και στην περίπτωση της ανηφόρας, ότι η διανυσματική άθροιση των ταχυτήτων U_x και U_y πρέπει να ισούται με την ισοδύναμη ταχύτητα U_{ws} [σχέση (3.3)]. Από την ανάλυση των συνιστωσών της ταχύτητας ανέμου U_a και της προβολής της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων $U_b \sin \theta$ στις διευθύνσεις x και y , όπως παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.3.5**, σε συνδυασμό με το **Σχήμα 3.1.6**, προκύπτουν οι σχέσεις για τις συνιστώσες U_x και U_y .

Συνιστώσα της ισοδύναμης ταχύτητας στην διεύθυνση της κατηφόρας :

$$U_y = U_a \cos \psi - U_b \sin \theta \quad (3.17)$$

Αντίστοιχα η συνιστώσα της ισοδύναμης ταχύτητας στην κάθετη διεύθυνση ως προς την κατηφόρα δίνεται από την σχέση (3.5).



Σχήμα 3.3.5: Απεικόνιση των συνιστωσών $U_a \cos \psi$, $U_a \sin \psi$ και της προβολής $U_b \sin \theta$ στις διευθύνσεις x και y στην περίπτωση της κατηφόρας.

Συνεπώς, από το **Σχήμα 3.3.5** εξάγονται οι σχέσεις για το μέτρο και την διεύθυνση της ισοδύναμης ταχύτητας U_{ws} .

Μέτρο του διανύσματος U_{ws} :

$$\vec{U}_{ws} = \vec{U}_x + \vec{U}_y$$

$$U_{ws}^2 = U_x^2 + U_y^2 \Rightarrow U_{ws}^2 = (U_a \sin \psi)^2 + (U_a \cos \psi - U_b \sin \theta)^2 \Rightarrow$$

$$U_{ws} = \sqrt{U_a^2 \sin^2 \psi + U_a^2 \cos^2 \psi - 2U_a U_b \sin \theta \cos \psi + U_b^2 \sin^2 \theta} \Rightarrow$$

$$U_{ws} = \sqrt{U_b^2 \left(\frac{U_a^2}{U_b^2} \sin^2 \psi + \sin^2 \theta - 2 \frac{U_a}{U_b} \sin \theta \cos \psi + \frac{U_a^2}{U_b^2} \cos^2 \psi \right)} \Rightarrow$$

$$U_{ws} = U_b \sqrt{\frac{U_a^2}{U_b^2} (\sin^2 \psi + \cos^2 \psi) - 2 \frac{U_a}{U_b} \sin \theta \cos \psi + \sin^2 \theta} \Rightarrow$$

$$U_{ws} = U_b \sqrt{\frac{U_a^2}{U_b^2} - 2 \frac{U_a}{U_b} \sin \theta \cos \psi + \sin^2 \theta} \quad (3.18)$$

Κοινή συνεισφορά της ταχύτητας του ανέμου και της κλίσης του εδάφους.

Διεύθυνση του διανύσματος U_{ws} :

$$\tan \gamma = \frac{U_x}{U_y} = \frac{U_a \sin \psi}{U_a \cos \psi - U_b \sin \theta} = \frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\frac{U_a}{U_b} \cos \psi - \sin \theta} \Rightarrow \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\frac{U_a}{U_b} \cos \psi - \sin \theta} \right). \quad (3.19)$$

Συγκεντρωτικά για την ισοδύναμη ταχύτητα U_{ws} στην κατηφόρα :

$$U_{ws} = U_b \left[\frac{U_a^2}{U_b^2} - 2 \frac{U_a}{U_b} \sin \theta \cos \psi + \sin^2 \theta \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\frac{U_a}{U_b} \cos \psi - \sin \theta} \right)$$

Είναι χρήσιμη η διερεύνηση ορισμένων ειδικών περιπτώσεων, όπως ακριβώς πραγματοποιήθηκε και στην ενότητα της ανηφόρας. Στην μονοδιάστατη προσέγγιση η γωνία της ταχύτητας του ανέμου είναι μηδενική ($\psi=0$) και η πυρκαγιά διαδίδεται μόνο στην διεύθυνση της κατηφόρας. Στην περίπτωση της μηδενικής ταχύτητας ανέμου ($U_a=0$), η διάδοση οφείλεται μόνο στην ανωστική ταχύτητα των αερίων της καύσης.

3.3.1 Μονοδιάστατη προσέγγιση

Οι σχέσεις για το μέτρο και την διεύθυνση της ισοδύναμης ταχύτητας U_{ws} στην μονοδιάστατη προσέγγιση προκύπτουν εάν θεωρηθεί μηδενική γωνία ανέμου στις εξισώσεις (3.18) και (3.19) αντίστοιχα.

Μέτρο διανύσματος U_{ws} :

$$U_{ws} = U_b \sqrt{\frac{U_a^2}{U_b^2} - 2 \frac{U_a}{U_b} \sin\theta \cos\psi + \sin^2\theta} \xrightarrow{\psi=0}$$

$$U_{ws} = U_b \sqrt{\frac{U_a^2}{U_b^2} - 2 \frac{U_a}{U_b} \sin\theta + \sin^2\theta} \Rightarrow$$

$$U_{ws} = U_b \left[\sqrt{\left(\frac{U_a}{U_b} - \sin\theta\right)^2} \right]^{\frac{1}{2}} \Rightarrow$$

$$U_{ws} = U_a - U_b \sin\theta \quad (3.20)$$

Άρα στην περίπτωση που ο άνεμος φυσάει κατά την διεύθυνση της κατηφόρας :

$$U_{ws} = U_a - U_b \sin\theta$$

Από την εξίσωση (3.19) προκύπτει πως η δασική πυρκαγιά θα διαδοθεί μόνο στην διεύθυνση της κατηφόρας.

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\frac{U_a}{U_b} \cos \psi - \sin \theta} \right) \xrightarrow{\psi=0} \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\frac{U_a}{U_b} \cos \psi - \sin \theta} \right) \Rightarrow$$

$$\gamma = \tan^{-1}(0) \Rightarrow \gamma = 0 \quad (3.21)$$

3.3.2 Μηδενική ταχύτητα ανέμου

Στην περίπτωση της μηδενικής ταχύτητας ανέμου ($U_a=0$) στην διάδοση της φλόγας συνεισφέρει μόνο η ανωστική ταχύτητα των καυσαερίων. Ωστόσο, θα πρέπει να δοθεί προσοχή στην κατεύθυνση του διανύσματος της ισοδύναμης ταχύτητας U_{ws} , όπως περιγράφεται παρακάτω :

Μέτρο διανύσματος U_{ws} :

$$U_{ws} = U_b \sqrt{\frac{U_a^2}{U_b^2} - 2 \frac{U_a}{U_b} \sin \theta \cos \psi + \sin^2 \theta} \xrightarrow{U_a=0} U_{ws} = U_b \sin \theta$$

Το μέτρο του διανύσματος είναι ακριβώς αυτό που προκύπτει και στην περίπτωση της ανηφορικής κλίσης [σχέση (3.12)].

Διεύθυνση του διανύσματος U_{ws} :

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{U_a}{U_b} \sin \psi}{\frac{U_a}{U_b} \cos \psi - \sin \theta} \right) \xrightarrow{U_a=0} \gamma = \tan^{-1} \left(\frac{\cancel{U_a} \sin \psi}{\cancel{U_a} \cos \psi - \sin \theta} \right) \Rightarrow$$

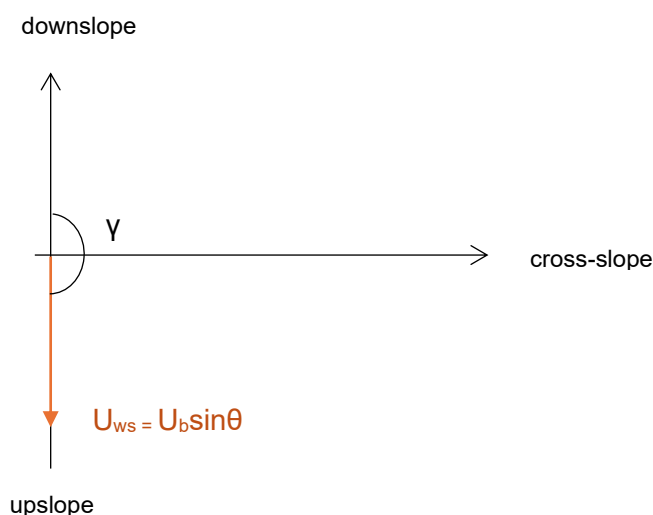
$$\gamma = \tan^{-1}(0) \Rightarrow \gamma = \pi \quad (U_x=0, U_y<0) \quad (3.22)$$

Η σχέση (3.22) προκύπτει είτε από την περίπτωση **Σχήμα 3.1.7(c)**, είτε από την περίπτωση **Σχήμα 3.1.7(d)**, καθώς $U_x=0$, $U_y<0$.

$$U_y = U_a \cos \psi - U_b \sin \theta \xrightarrow{U_a=0} U_y = -U_b \sin \theta \Rightarrow U_y < 0$$

$$U_x = U_a \sin \psi \xrightarrow{U_a=0} U_x = 0$$

Η διεύθυνση του διανύσματος της ισοδύναμης ταχύτητας σχηματίζει γωνία $\gamma=\pi$ με τον θετικό ημιάξονα των τεταγμένων που συμβολίζει την κατηφόρα (**Σχήμα 3.3.2.1**). Άρα η κατεύθυνση διάδοσης της φλόγας είναι η ανηφόρα. Το συμπέρασμα αυτό είναι απόλυτα λογικό και συμβαδίζει με την εξίσωση (3.13), η οποία εκφράζει την κατεύθυνση διάδοσης της φλόγας υπό μηδενική ταχύτητα ανέμου στην περίπτωση που εξετάζεται η ανηφόρα.



Σχήμα 3.3.2.1: Στην περίπτωση μηδενικής ταχύτητας ανέμου, η κατεύθυνση διάδοσης της πυρκαγιάς είναι η ανηφόρα.

3.4 Οριακή περίπτωση για την μονοδιάστατη διάδοση φλόγας

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση της οριακής τιμής της ταχύτητας ανέμου, στην μονοδιάστατη προσέγγιση, κατά την οποία υπάρχει διάδοση της φλόγας. Στην περίπτωση της κατηφόρας, η ταχύτητα του ανέμου έχει αντίθετη φορά από την προβολή της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων (**Σχήμα 3.3.3**, για $\psi=0$). Ο άνεμος φυσάει κατά την φορά της κατηφόρας, ενώ όπως απεικονίζεται και στο **Σχήμα 3.2.2**, η προβολή U_b έχει φορά προς την κατεύθυνση της ανηφόρας. Η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου για αυτήν την περίπτωση δίνεται από την εξίσωση (3.20).

- i). Η φλόγα δεν διαδίδεται σε καμία κατεύθυνση, όταν η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου είναι μηδενική.

$$U_{ws} = 0 \Rightarrow U_a - U_b \sin \theta = 0 \Rightarrow U_a = U_b \sin \theta \Rightarrow \left(\frac{U_a}{U_b} \right)_0 = \sin \theta \quad (3.24)$$

- ii). Η φλόγα διαδίδεται στην κατεύθυνση της κατηφόρας, όταν η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου είναι θετική.

$$U_{ws} > 0 \Rightarrow U_a - U_b \sin \theta > 0 \Rightarrow U_a > U_b \sin \theta \Rightarrow \frac{U_a}{U_b} > \sin \theta \quad (3.25)$$

- iii). Η φλόγα διαδίδεται στην κατεύθυνση της ανηφόρας, όταν η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου είναι αρνητική.

$$U_{ws} < 0 \Rightarrow U_a - U_b \sin \theta < 0 \Rightarrow U_a < U_b \sin \theta \Rightarrow \frac{U_a}{U_b} < \sin \theta \quad (3.26)$$

Να σημειωθεί οι σχέσεις (3.24) – (3.26) διατυπώνουν την θεωρητική κατεύθυνση της φλόγας. Στην πραγματικότητα, όταν οι ποσότητες U_a και $U_b \sin \theta$ είναι αριθμητικά κοντά, για την πρόβλεψη της κατεύθυνσης διάδοσης λαμβάνονται και άλλες παράμετροι υπόψιν. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να αφορούν την ανομοιογένεια της καύσιμης ύλης γύρω από το μέτωπο, την υγρασία της καύσιμης ύλης και τις συνθήκες του περιβάλλοντος (σχετική υγρασία, θερμοκρασία). Συνεπώς, οι σχέσεις (3.24), (3.25), (3.26) στηρίζονται μόνο στην θεώρηση της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου.

3.5 Τοπικό φαινόμενο της ανωστικής ταχύτητας της φλόγας

Έπειτα από την ανάλυση του μοντέλου του Ralph M. Nelson, είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί μια τροποποίηση στην σχέση για την ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου. Η τροποποίηση αυτή πηγάζει από το φαινόμενο της ανωστικής κίνησης των θερμών καυσαερίων της φλόγας. Στο μοντέλο για τον υπολογισμό της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων λαμβάνεται υπόψιν η μέγιστη ποσότητα ύλης που έχει καεί την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως η φλόγα δεν έχει κάψει την ίδια ποσότητα ύλης σε όλα τα χωρικά σημεία μια δεδομένη χρονική στιγμή. Με άλλα λόγια, όπως διαπιστώνεται και από τα προφίλ του εξώθερμου μέρους της ύλης στο κεφάλαιο «Αποτελέσματα», υπάρχει χωρική διακύμανση της ποσότητας S_2 κάθε

χρονική στιγμή. Συνεπώς, στον υπολογισμό της ποσότητας W_a λαμβάνεται η μέγιστη ποσότητα ύλης που έχει καεί:

$$W_{a,max} = W_{a,0} \left(1 - \frac{S_{2,min}}{S_{2,0}} \right) \left(\frac{Kg}{m^2} \right) \quad (3.27)$$

Κατ' επέκταση, λοιπόν, υπολογίζεται η μέγιστη τιμή της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων [σχέση (2.18)]. Όμως, η ταχύτητα U_b δεν μπορεί να λαμβάνεται ως μέγιστη σε όλα τα σημεία, καθώς εξαρτάται από τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες. Όσο πιο ζεστά είναι τα καυσαέρια, τόσο μεγαλύτερη είναι η ανωστική τους τάση. Για να συμπεριληφθεί η παραπάνω διαπίστωση αρκεί να τροποποιηθεί η σχέση (3.10) ως εξής:

$$U_{ws} = U_a + U_b \sin \theta \left(\frac{T - T_a}{T_{max} - T_a} \right) \quad (3.28)$$

Με την τροποποίηση αυτή η ανωστική ταχύτητα των καυσαερίων έχει την μέγιστη τιμή της μόνο στο σημείο όπου εμφανίζεται η T_{max} την δεδομένη χρονική στιγμή. Στα υπόλοιπα σημεία η τιμή της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων έχουν μικρότερη τιμή. Μάλιστα το πόσο μικρότερη είναι η U_b καθορίζεται από το πόσο απέχει η T από την T_{max} στα δεδομένα σημεία.

Κεφάλαιο 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Κεφάλαιο των «Αποτελεσμάτων» διερευνάται η επίδραση της κλίσης του εδάφους και των άλλων παραμέτρων στην συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η ταχύτητα και η συμπεριφορά της φλόγας στην μονοδιάστατη προσέγγιση με την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, της κλίσης του εδάφους, της υγρασίας και της πυκνότητας της καύσιμης ύλης. Παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα, με την χρήση του MATLAB, για τα προφίλ θερμοκρασίας, της καύσιμης ύλης και την χωροχρονική εξέλιξη του μετώπου της φλόγας υπό την επίδραση των παραπάνω παραμέτρων. Γίνεται σχολιασμός και ερμηνεία των αποτελεσμάτων, ενώ στο τέλος γίνεται προσπάθεια συσχέτισης των δεδομένων από τις προσομοιώσεις με τις αντίστοιχες μαθηματικές εκφράσεις της βιβλιογραφίας. Τα αποτελέσματα αφορούν την περίπτωση της ανηφόρας, καθώς η φλόγα διαδίδεται με μεγαλύτερη ταχύτητα και αποτελεί την πιο δυσμενή περίπτωση. Οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται, στην κάθε υπό εξέταση περίπτωση, αναφέρονται ρητά.

4.1 Σταθεροποίηση του ROS

Η τιμή της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου στην μονοδιάστατη περίπτωση της ανηφόρας δίνεται από την σχέση (3.10). Όταν η ταχύτητα του ανέμου και η κλίση παραμένουν σταθερές, η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου προφανώς παραμένει αμετάβλητη. Συνεπώς, δεδομένου πως οι περιβαλλοντικές συνθήκες δεν μεταβάλλονται και ότι η καύσιμη ύλη έχει ομοιόμορφη κατανομή, αναμένεται η ταχύτητα διάδοσης ή αλλιώς «ROS» (Rate of Spread) να είναι σταθερή.

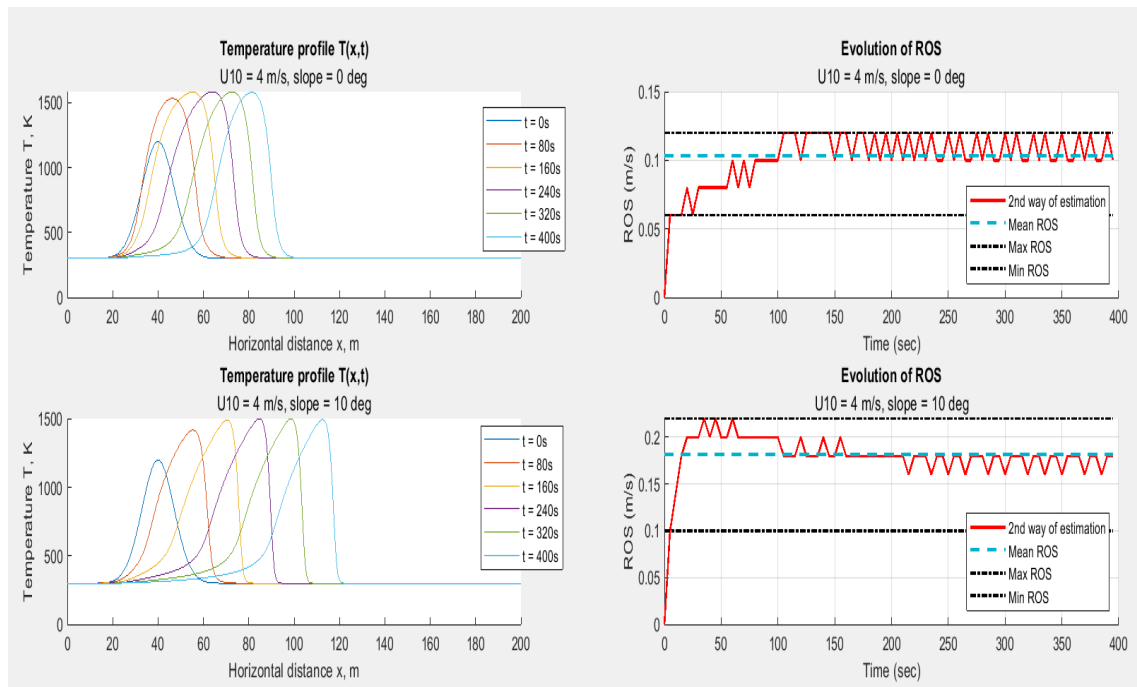
Στην αριστερή στήλη του **Σχήματος 4.1.1** απεικονίζονται τα προφίλ θερμοκρασίας και στην δεξιά στήλη απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη της ταχύτητας διάδοσης της φλόγας για την περίπτωση μέτριας ταχύτητας ανέμου $U_{10} = 4 \text{ m/s}$, σε οριζόντιο και κεκλιμένο έδαφος 10° . Αντίστοιχα, στο **Σχήμα 4.1.2** απεικονίζονται τα προφίλ θερμοκρασίας και η χρονική εξέλιξη του ROS για υψηλή ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ σε οριζόντιο και κεκλιμένο έδαφος 10° .

Η αρχική συνθήκη κατά την έναρξη της φλόγας περιγράφεται από την σχέση (2.39) που προσομοιώνει το προφίλ θερμοκρασίας με κανονική κατανομή. Η έναρξη της φλόγας πραγματοποιείται στην θέση $x_0 = 40 \text{ m}$ την χρονική στιγμή $t = 0 \text{ sec}$. Οι τιμές των υπόλοιπων παραμέτρων είναι:

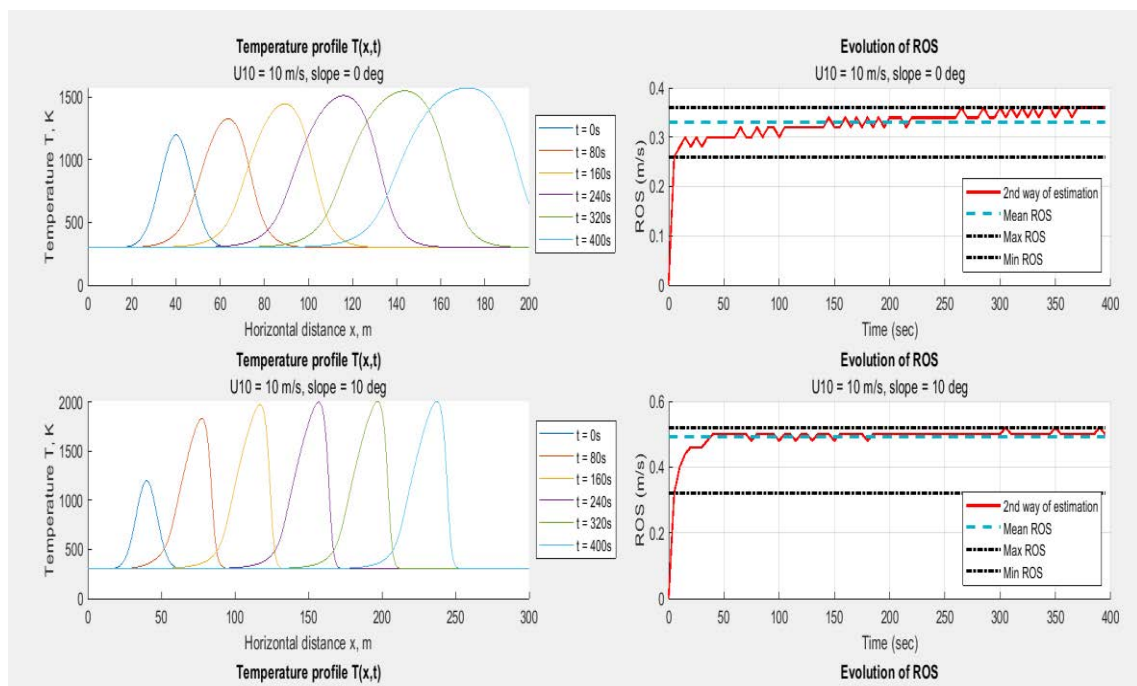
$$\text{Τυπική απόκλιση: } \sigma = 10$$

$$T_{max} = 900 \text{ K}$$

$$T_a = 300 \text{ K}$$



Σχήμα 4.1.1: Σταθεροποίηση του ROS σε οριζόντιο και κεκλιμένο έδαφος 10° για μέτρια ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 4$ m/s.



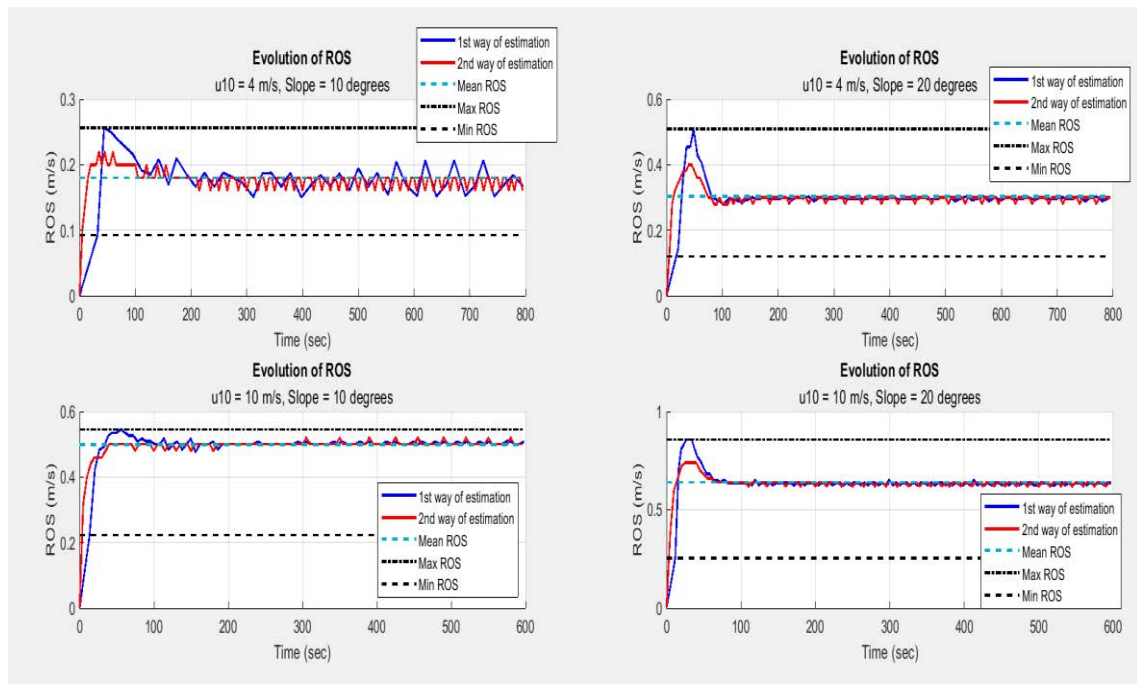
Σχήμα 4.1.2 : Σταθεροποίηση του ROS σε οριζόντιο και κεκλιμένο έδαφος 10° για υψηλή ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 10$ m/s.

Όπως φαίνεται στα **Σχήματα 4.1.1** και **4.1.2**, ο ROS σταθεροποιείται μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα. Το προφίλ θερμοκρασίας εμφανίζει ολοένα και μεγαλύτερα μέγιστα μέχρι το μέτωπο της φλόγας να σταθεροποιηθεί. Η σταθεροποίηση του προφίλ θερμοκρασίας συνεπάγεται σταθεροποίηση και της ταχύτητας διάδοσης της φλόγας. Η πιο γρήγορη σταθεροποίηση φαίνεται να επιτυγχάνεται στην περίπτωση της υψηλής ταχύτητας ανέμου και του κεκλιμένου εδάφους 10° . Θα μπορούσε να ειπωθεί πως στις υψηλές ταχύτητες ανέμου (**Σχήμα 4.1.2**), η ύπαρξη κλίσης επιταχύνει την σταθεροποίηση του μετώπου της φλόγας και του ROS. *Είναι προφανές πως υπό δεδομένη ταχύτητα αέρα, αύξηση της κλίσης του εδάφους οδηγεί σε αύξηση του μέσου ROS (μπλε διακεκομμένη γραμμή).*

4.2 Σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης του ROS

Η ορθότητα της προσέγγισης των δύο τρόπων υπολογισμού του ROS εξετάζεται μέσω της σύγκλισης. Οι δύο τρόποι εκτίμησης στηρίζονται και εκφράζουν την ίδια λογική από διαφορετική οπτική γωνία. Η κοινή λογική των δύο μεθόδων είναι ο τρόπος με τον οποίο προσομοιώνεται η ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς. Η ταχύτητα εκτιμάται από τον εντοπισμό των μεγίστων θερμοκρασιών σε κάποιο χρονικό διάστημα. Στον πρώτο τρόπο υπολογισμού γίνεται εκτίμηση ανά σταθερό χωρικό βήμα x_a . Εντοπίζονται οι μέγιστες τιμές θερμοκρασιών (peaks) των χρονικών διακυμάνσεων σε συγκεκριμένες θέσεις. Για να γίνει πιο κατανοητό, εξετάζεται το πότε θα φτάσει το μέτωπο της φλόγας στις συγκεκριμένες θέσεις. Από την άλλη, στον δεύτερο τρόπο υπολογισμού γίνεται η εκτίμηση ανά σταθερό χρονικό βήμα t_b . Εντοπίζονται οι μέγιστες θερμοκρασίες των προφίλ θερμοκρασίας σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Με άλλα λόγια εξετάζεται η θέση που βρίσκεται το μέτωπο στις χρονικές στιγμές αυτές. Συνεπώς, για την ορθότητα και την εγκυρότητα πρέπει να υπάρχει σύγκλιση των δύο προσεγγίσεων σε μια τιμή του ROS.

Στο **Σχήμα 4.2.1** εξετάζεται η σύγκλιση των δύο μεθόδων υπολογισμού του ROS για ταχύτητες ανέμου $U_{10} = 4 \text{ m/s}$, $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ και κλίσεις εδάφους $\theta = 10^\circ$, 20° . Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του ROS σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο εκτίμησης, ενώ με κόκκινο χρώμα η χρονική εξέλιξη του ROS σύμφωνα με τον δεύτερο τρόπο εκτίμησης. Οι διακεκομμένες μαύρες γραμμές αναπαριστούν την μέγιστη και την ελάχιστη τιμή υπολογισμού του ROS από τις δύο μεθόδους. Η διακεκομμένη γαλάζια γραμμή αναπαριστά την μέση τιμή των δύο μέσων όρων υπολογισμού του ROS από τις δύο εκτιμήσεις.



Σχήμα 4.2.1: Σύγκριση των δύο μεθόδων εκτίμησης του ROS για διάφορες περιπτώσεις τιμών ταχύτητας ανέμου U_{10} και κλίσης εδάφους.

Παρατηρείται πως σε όλες τις περιπτώσεις του **Σχήματος 4.2.1**, οι δύο τρόποι εκτίμησης του ROS συγκλίνουν με γρήγορο ρυθμό σε μια συγκεκριμένη τιμή. Η τιμή αυτή είναι ο μέσος όρος των δύο εκτιμήσεων. Σε όλες τις περιπτώσεις εντοπίζεται πως η μέγιστη τιμή του ROS οφείλεται στον πρώτο τρόπο εκτίμησης.

Οι δύο μέθοδοι υπολογισμού δίνουν ορθά αποτελέσματα και δεν φαίνεται κάποια μέθοδος να υπερτερεί έναντι της άλλης. Παρόλα αυτά, υπό ορισμένες περιπτώσεις η πρώτη μέθοδος υστερεί της δεύτερης. Για παράδειγμα, στις περιπτώσεις που η φλόγα διαδίδεται με γρήγορο ρυθμό και επιλεγεί τιμή χωρικού βήματος $x_a < 3$, η πρώτη μέθοδος μπορεί να μην ανταποκρίνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για μικρή τιμή του x_a , οι τιμές t_i και t_{i+1} να συμπίπτουν, με αποτέλεσμα λόγω της σχέσης (2.25) και $ROS \rightarrow \infty$. Επίσης, στις περιπτώσεις αρκετά αργής διάδοσης η πρώτη μέθοδος στερείται ακρίβεια. Για παράδειγμα τέτοιες περιπτώσεις αποτελεί η κατηφόρα και η εξέταση της συμπεριφοράς της φλόγας για μεγάλες τιμές του «bulk density». Συνεπώς, απαιτείται αρκετά μικρή τιμή του x_a για την αύξηση του αριθμού των υπολογισμών και την επίτευξη ακρίβειας. Έτσι, ο πρώτος τρόπος εκτίμησης μπορεί να μην δίνει ορθά αποτελέσματα. Άρα, στις περιπτώσεις γρήγορης διάδοσης με $x_a < 3$ και στην αργή διάδοση να προτιμάται γενικά ο δεύτερος τρόπος εκτίμησης.

4.3 Επίδραση των παραμέτρων

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνηση της επίδρασης της κλίσης του εδάφους, της ταχύτητας ανέμου, του «bulk density» και της υγρασίας στην *μονοδιάστατη* διάδοση της πυρκαγιάς. Εξετάζεται η επίδραση των παραμέτρων αυτών στον ROS, καθώς και στα προφίλ θερμοκρασίας $T(x,t)$ και στα προφίλ εξώθερμου κλάσματος μάζας $S_2(x,t)$ της καύσιμης ύλης. Τα αποτελέσματα εξάγονται για την περίπτωση της ανηφόρας, όπου η διάδοση είναι γρήγορη και αποτελεί την δυσμενέστερη περίπτωση. Συνεπώς, γίνεται προσπάθεια εξαγωγής συμπερασμάτων για τον τρόπο με τον οποίο οι παράμετροι αλληλοεπιδρούν και επηρεάζουν την συμπεριφορά και την ταχύτητα διάδοσης της φλόγας. Συνεπώς, θα εξεταστεί η συμπεριφορά της φλόγας με την εξής κατηγοριοποίηση:

- Κλίση εδάφους
- Ταχύτητα ανέμου
- Bulk density
- Υγρασία

4.3.1 Κλίση εδάφους

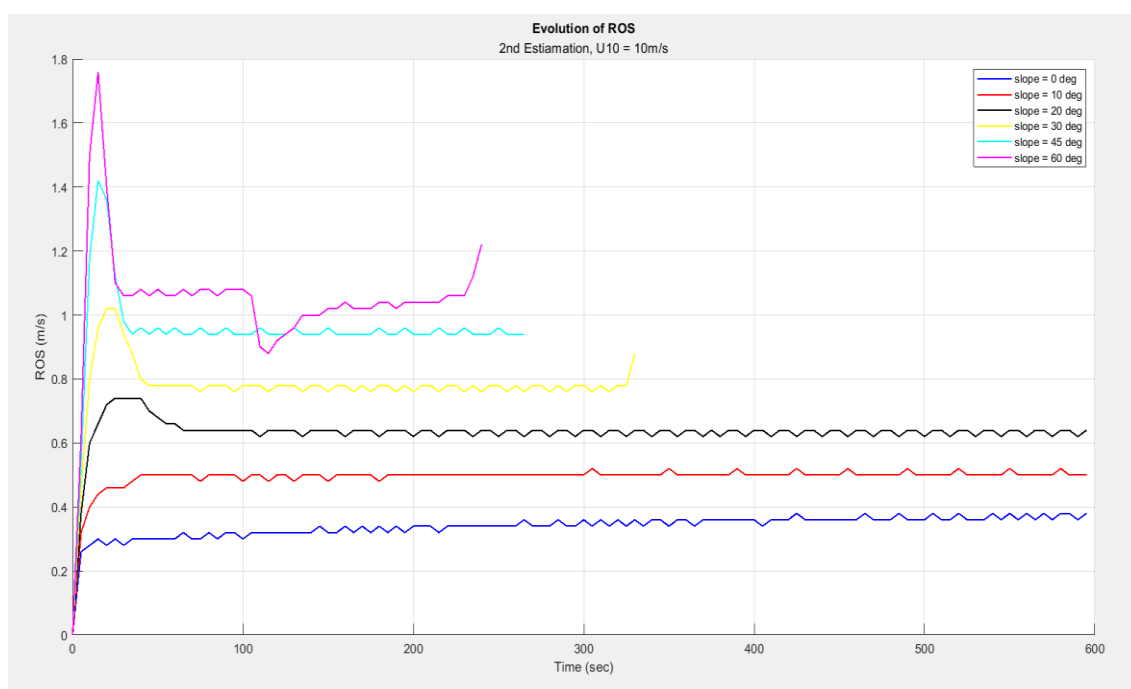
Μια τυπική κατηγοριοποίηση των τιμών της κλίσης του εδάφους από μηδενική κλίση έως την περίπτωση του γκρεμού φαίνεται παρακάτω:

- Πολύ μικρή κλίση: $1^\circ - 5^\circ$ (2% - 9%)
- Ήπια κλίση: $6^\circ - 15^\circ$ (11% - 27%)
- Μέτρια κλίση: $16^\circ - 30^\circ$ (28% - 58%)
- Απότομη κλίση: $31^\circ - 50^\circ$ (60% - 119%)
- Πολύ απότομη κλίση: $51^\circ - 70^\circ$ (123% - 274%)
- Γκρεμός: $71^\circ - 90^\circ$ (> 290%)

Σύμφωνα με την εξίσωση **(3.10)** που αφορά την ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου για την μονοδιάστατη διάδοση της πυρκαγιάς στην ανηφόρα, αύξηση της κλίσης συνεπάγεται αύξηση της τιμής της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου. Κατ' επέκταση, η αύξηση της κλίσης (διατηρώντας τις άλλες παραμέτρους σταθερές) πρέπει να οδηγεί σε αύξηση του ρυθμού διάδοσης της πυρκαγιάς (ROS). Η υπόθεση αυτή επιβεβαιώνεται στο **Σχήμα 4.3.1.1**, όπου απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη της τιμής του ROS για διάφορες τιμές της κλίσης του εδάφους, σύμφωνα με τον δεύτερο τρόπο υπολογισμού. Η τιμή της ταχύτητας του αέρα είναι $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, η τιμή του bulk density είναι $m_{s,0} = 1,4 \text{ Kg/m}^3$ και η τιμή του αδιάστατου εξώθερμου κλάσματος μάζας είναι $S_2 = 0,9$ (άρα η αδιάστατη υγρασία $S_1 = 1 - S_2 = 0,1$). Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του ROS για μηδενική κλίση, με κόκκινο χρώμα η χρονική εξέλιξη για κλίση 10° , με μαύρο η περίπτωση κλίσης 20° , ενώ με κίτρινο, γαλάζιο και μωβ χρώμα οι περιπτώσεις για κλίση 30° , 45° , 60° αντίστοιχα.

Σε όλες τις περιπτώσεις ο ROS μετά από ένα σύντομο χρονικό διάστημα σταθεροποιείται σε μια συγκεκριμένη τιμή. Ωστόσο, πριν την σταθεροποίηση, παρατηρείται στα πρώτα δευτερόλεπτα μια αύξηση του ROS στην μέγιστη τιμή του. Στην συνέχεια, μειώνεται μέχρι την τιμή σταθεροποίησής του. Μετά από αυτό το σημείο η ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς είναι σταθερή. Είναι εύκολα αντιληπτό πως μεγαλύτερη τιμή κλίσης εδάφους οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές του ROS, δηλαδή η φλόγα διαδίδεται ταχύτερα, όπως αναμενόταν.

Στην περίπτωση κλίσης 60° (μωβ χρώμα), παρατηρείται πιο ασταθής συμπεριφορά της φλόγας συγκριτικά με τις άλλες τιμές κλίσης. Γενικά, σε πολύ απότομες κλίσεις, η συμπεριφορά της φλόγας διαφοροποιείται και ενδεχομένως το μοντέλο να μην μπορεί να ερμηνεύσει την αλλαγή αυτή. *Για αυτό εξετάζονται κυρίως οι περιπτώσεις κλίσεων, όπου η φλόγα έχει σχετικά ευσταθή συμπεριφορά.*



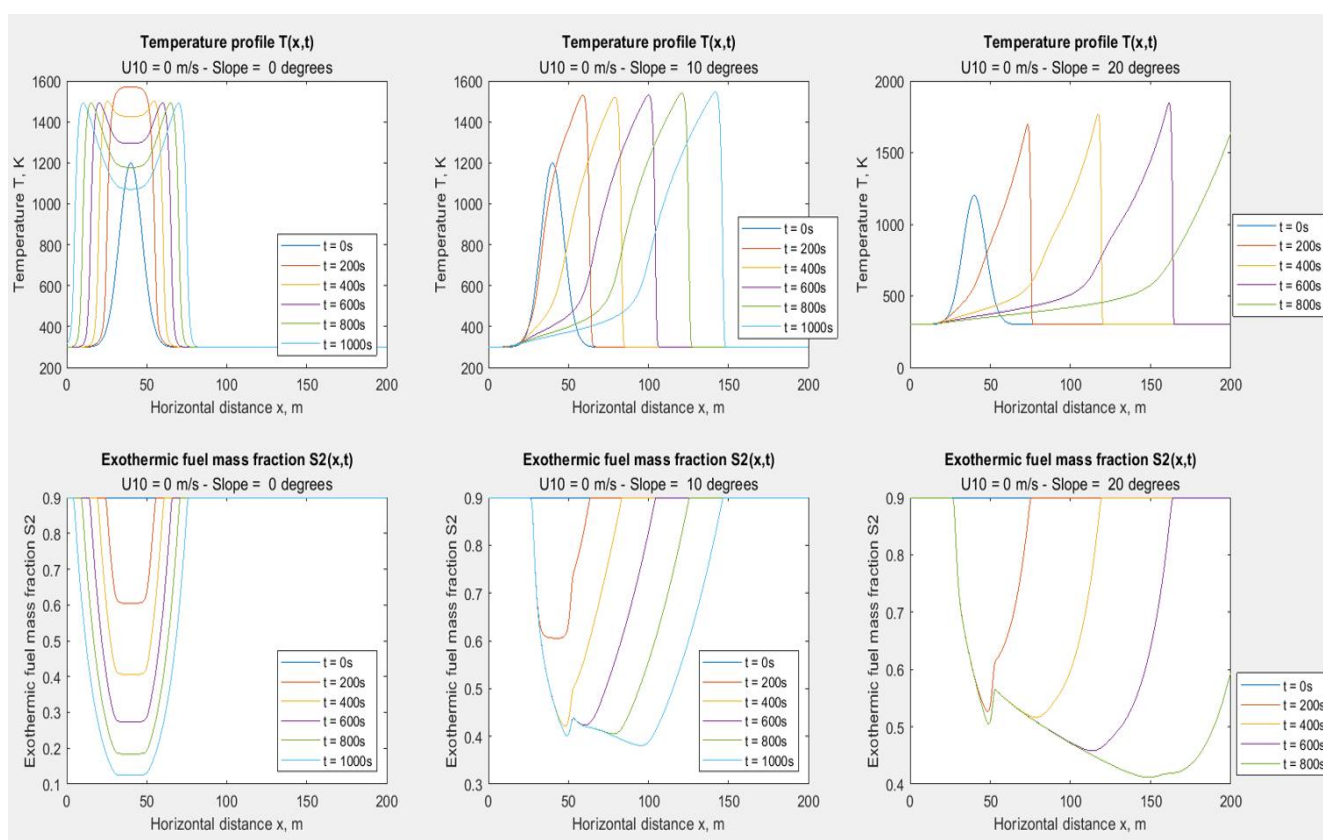
Σχήμα 4.3.1.1: Επίδραση της κλίσης στην ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς. $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, $m_{s,0} = 1,4 \text{ Kg/m}^2$, $S_2=0.9$.

Η κλίση του εδάφους και η ταχύτητα του ανέμου είναι στενά συνδεδεμένες παράμετροι, όπως αναλύεται και στο κεφάλαιο «Το μοντέλο του Ralph M. Nelson». Για αυτό, πρώτα θα μελετηθεί η επίδραση της κλίσης θεωρώντας την ταχύτητα ανέμου σταθερή και στην συνέχεια θα μελετηθεί η επίδραση του ανέμου θεωρώντας σταθερή την κλίση. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων έγιναν για τιμή του bulk density $m_{s,0} = 1,4 \text{ Kg/m}^3$ και για τιμή του αδιάστατου εξώθερμου κλάσματος μάζας είναι $S_2 = 0,9$.

Στα **Σχήματα 4.3.1.2, 4.3.1.3 και 4.3.1.4** παρουσιάζονται τα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου κλάσματος μάζας για ταχύτητες ανέμου $U_{10} = 0 \text{ m/s}$, 4 m/s και 10 m/s αντίστοιχα, για τιμές κλίσης 0° , 10° , 20° . Σκοπός της παρουσίασης των διαγραμμάτων είναι η μελέτη της συνεισφοράς της κλίσης στην συμπεριφορά της φλόγας και πως αυτή διαφοροποιείται για διαφορετικές τιμές ταχύτητας ανέμου. Η πρώτη γραμμή των σχημάτων περιλαμβάνει τα προφίλ θερμοκρασίας, ενώ η δεύτερη περιλαμβάνει τα

προφίλ εξώθερμου κλάσματος μάζας. Σε κάθε σχήμα διατηρείται σταθερή η ταχύτητα ανέμου, ενώ μεταβάλλεται η κλίση του εδάφους από στήλη σε στήλη.

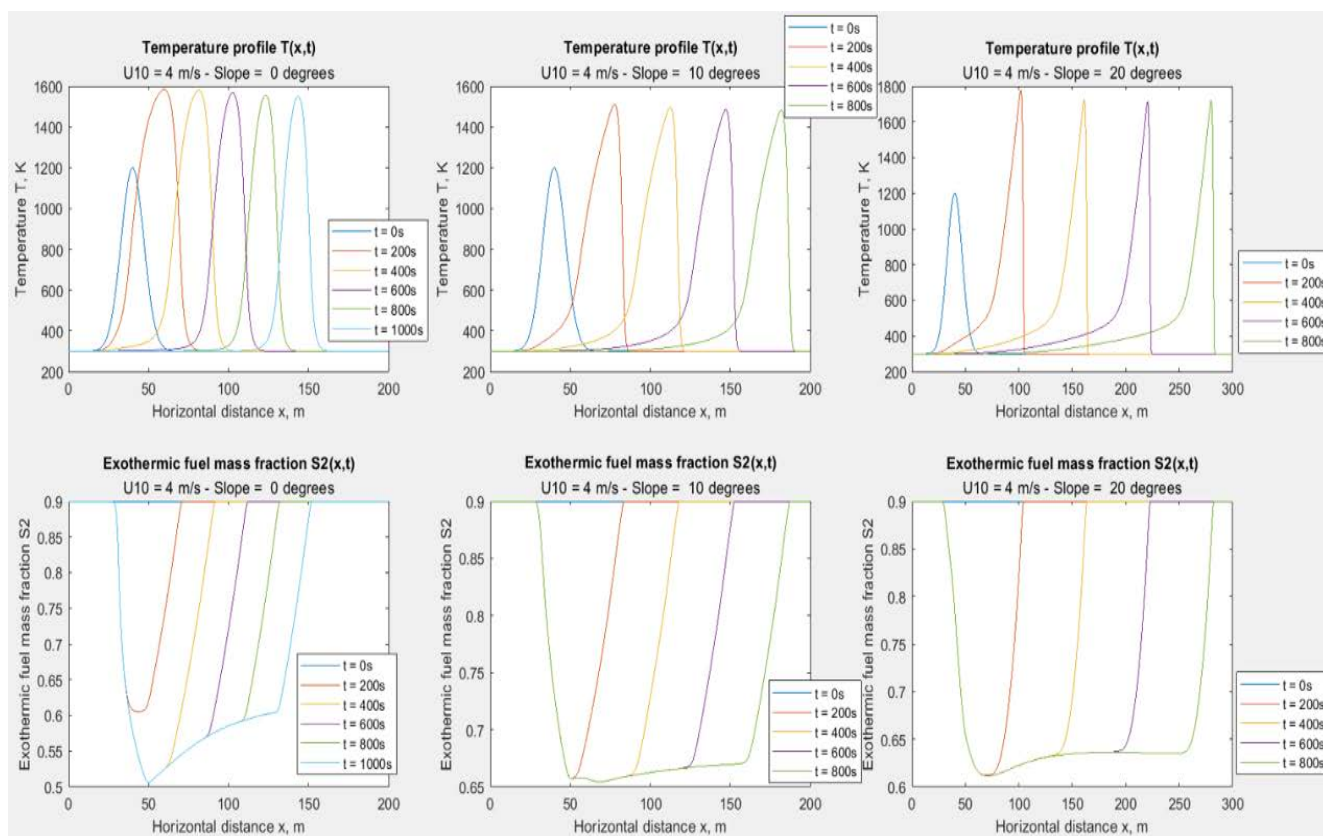
Στο **Σχήμα 4.3.1.2** η ταχύτητα του αέρα είναι μηδενική. Στην πρώτη στήλη απεικονίζεται το προφίλ θερμοκρασίας και το προφίλ εξώθερμου μέρους για μηδενική κλίση. Λόγω απουσίας ανέμου και κλίσης, η διάδοση της φλόγας γίνεται μόνο με ακτινοβολία και φυσική συναγωγή. Για αυτό και τα προφίλ είναι συμμετρικά ως προς τις δύο κατευθύνσεις. Παρατηρώντας την δεύτερη και την τρίτη στήλη του σχήματος, διαπιστώνεται πως η ύπαρξη κλίσης είναι ικανή να αυξήσει σημαντικά την ταχύτητα διάδοσης. Για παράδειγμα σε έναν χρονικό ορίζοντα $t = 1000$ s, στην περίπτωση μηδενικής κλίσης το μέτωπο έχει φτάσει περίπου στα 80 m, στο κεκλιμένο έδαφος 10° έχει φτάσει περίπου στα 150 m και στην περίπτωση κεκλιμένου εδάφους 20° έχει ξεπεράσει κατά πολύ το πλέγμα των 200 m.



Σχήμα 4.3.1.2: Επίδραση της κλίσης για μηδενική ταχύτητα ανέμου.

Όσον αφορά τα προφίλ εξώθερμου μέρους, η μεγαλύτερη ποσότητα καύσιμης ύλης που καταναλώθηκε, αφορά την περίπτωση μηδενικής κλίσης, καθώς έχει απομείνει η λιγότερη ποσότητα στερεού καυσίμου με τιμή $S_2 \approx 0,1$. Στις περιπτώσεις κεκλιμένου εδάφους 10° και 20° , η φλόγα καίει λιγότερη καύσιμη ύλη. Το γεγονός αυτό είναι λογικό, καθώς η ύπαρξη κλίσης προκαλεί διάδοση προς μια κατεύθυνση με αποτέλεσμα η καύσιμη ύλη να μην προλαβαίνει να καεί εντελώς. Παρατηρείται πως ανεξάρτητα της κλίσης, όταν η ταχύτητα ανέμου είναι μηδενική, η ποσότητα S_2 συνεχώς μειώνεται με τον χρόνο, δηλαδή η φλόγα καίει περισσότερη καύσιμη ύλη με την διάδοσή της.

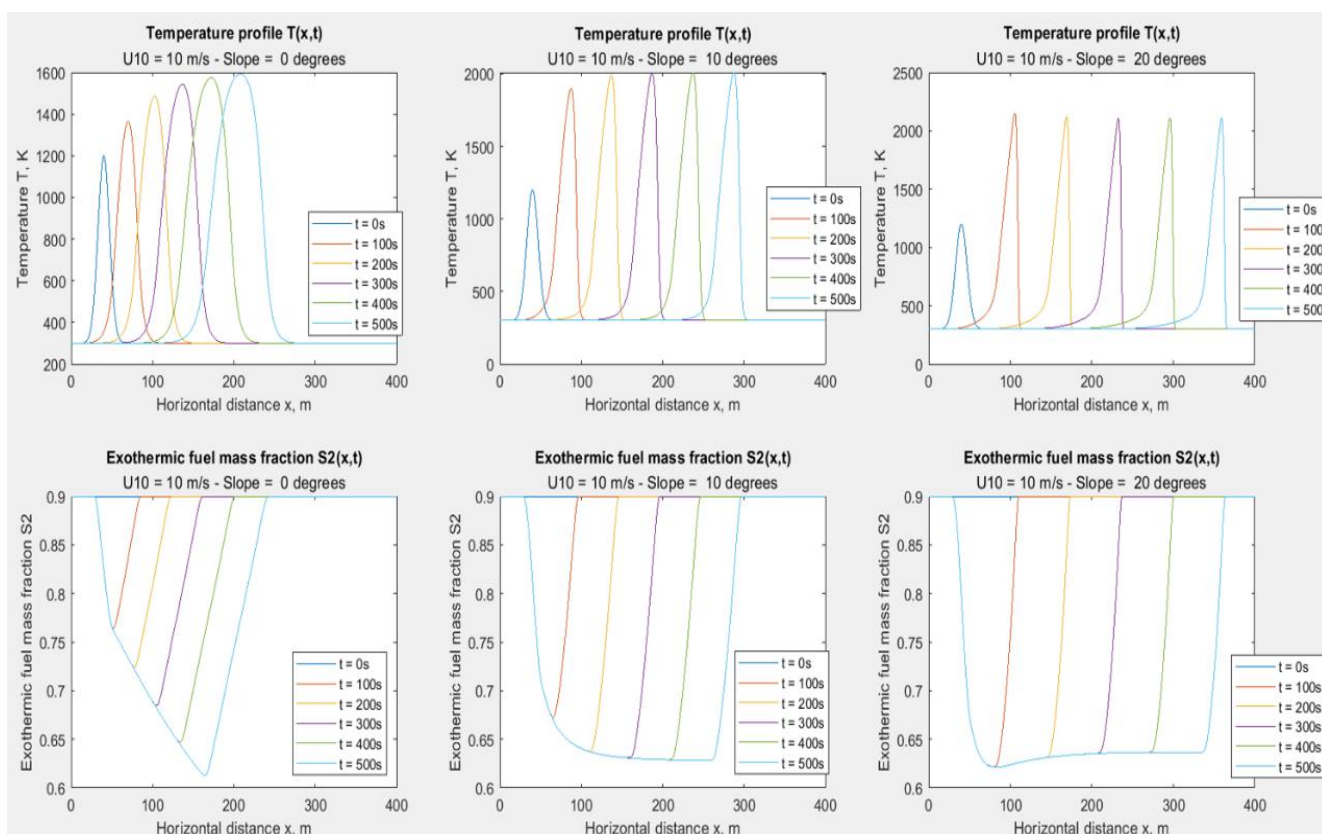
Σε όλα τα σχήματα παρατηρείται πως η αύξηση της κλίσης μεταβάλλει το σχήμα του μετώπου. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται το προφίλ θερμοκρασίας να κλίνει προς την κατεύθυνση διάδοσης, ιδιαίτερα στην περίπτωση χαμηλών ταχυτήτων. Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά έντονο, όταν η ταχύτητα ανέμου είναι μηδενική (**Σχήμα 4.3.1.2**). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στην περίπτωση πολύ χαμηλών ταχυτήτων η διάδοση της φλόγας ενισχύεται σημαντικά με την αύξηση της κλίσης.



Σχήμα 4.3.1.3: Επίδραση της κλίσης για ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 4$ m/s.

Η κλίση του εδάφους συμβάλλει ακόμη και στην αύξηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών του μετώπου της φλόγας. Αύξηση της κλίσης υπό σταθερή ταχύτητα ανέμου συνεπάγεται και αύξηση των μεγίστων θερμοκρασιών (peaks) σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 4.3.1.4**, την χρονική στιγμή $t = 500$ s, η μέγιστη θερμοκρασία είναι 1600 K για το οριζόντιο έδαφος, ενώ στο κεκλιμένο έδαφος 20° , η μέγιστη θερμοκρασία ξεπερνάει τα 2000 K.

Μια σημαντική διαπίστωση σχετίζεται με την σταθεροποίηση του μετώπου. Με τον όρο σταθεροποίηση εννοείται η σταθεροποίηση των μεγίστων θερμοκρασιών (peaks) στα προφίλ θερμοκρασίας με το πέρασμα του χρόνου. Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 4.3.1.4**, στην περίπτωση του οριζοντίου εδάφους, το μέτωπο φλόγας στον χρονικό ορίζοντα $t = 500$ s δεν έχει σταθεροποιηθεί ακόμη. Αντίθετα, στην περίπτωση του κεκλιμένου εδάφους 20° , το μέτωπο φαίνεται να έχει σταθεροποιηθεί ήδη από την χρονική $t = 100$ s. Παρατηρείται λοιπόν πως η ύπαρξη κλίσης γενικά επιταχύνει την σταθεροποίηση του μετώπου. Η μόνη περίπτωση που φαίνεται να μην συμπεριλαμβάνεται στην παραπάνω διαπίστωση είναι η περίπτωση μηδενικής ταχύτητας ανέμου και κλίσης εδάφους 20° (**Σχήμα 4.3.1.2**).



Σχήμα 4.3.1.4: Επίδραση της κλίσης για ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 10$ m/s.

Η συμπεριφορά του εξώθερμου προφίλ S_2 έχει άμεση σχέση με την συμπεριφορά του μετώπου της φλόγας. Η ποσότητα της καύσιμης ύλης που καίγεται εξαρτάται από τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες. Τα **Σχήματα 4.3.1.2 – 4.3.1.4** καταδεικνύουν πως αύξηση των θερμοκρασιών οδηγούν σε αύξηση της ποσότητας της ύλης που καίγεται (μείωση του S_2), ενώ μείωση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών οδηγούν σε μείωση της ποσότητας που καίγεται (αύξηση του S_2). Για να γίνει πιο σαφές το εξώθερμο προφίλ S_2 ακολουθεί την συμπεριφορά του προφίλ θερμοκρασίας. Για παράδειγμα στο **Σχήμα 4.3.1.3**, στην περίπτωση του οριζόντιου εδάφους, παρατηρείται μια μικρή πτώση την μεγίστων θερμοκρασιών μετά την χρονική στιγμή $t = 400$ s, κάτι το οποίο προκαλεί μείωση της καύσιμης ύλης (αύξηση του S_2) με το πέρασμα του χρόνου. Αντίθετα, στο **Σχήμα 4.3.1.4**, πάλι για την περίπτωση μηδενικής κλίσης, υπάρχει μια αύξηση των μέγιστων θερμοκρασιών γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της καύσιμης ύλης με τον χρόνο. Τέλος, όταν το μέτωπο της φλόγας σταθεροποιείται, τότε υπάρχει και σταθεροποίηση στο εξώθερμο προφίλ, δηλαδή η πυρκαγιά καίει την ίδια ποσότητα καύσιμης ύλης με τον χρόνο (σταθερό S_2).

4.3.2 Ταχύτητα ανέμου

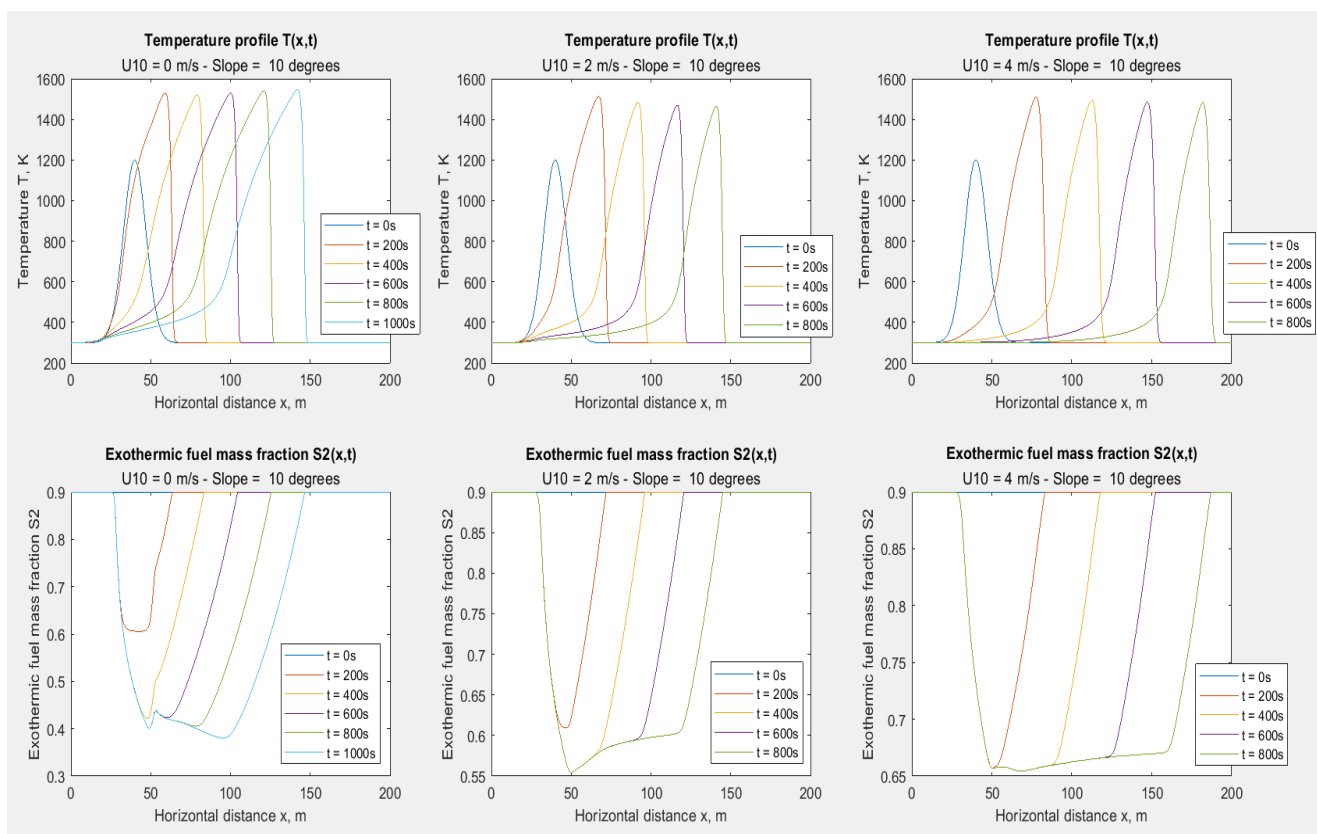
Η ταχύτητα του ανέμου κατέχει αναμφισβήτητα πρωταρχικό ρόλο στην ταχύτητα και στην διεύθυνση διάδοσης της πυρκαγιάς. Είναι γνωστό πως η φλόγα μπορεί να γίνει εξαιρετικά επικίνδυνη σε μεγάλες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και απρόβλεπτη με την διακύμανσή της σε πραγματικό χρόνο. Επιπλέον, συνδέεται στενά με την κλίση του εδάφους, το οποίο αναλύεται εκτενώς στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Συνεπώς, η κατανόηση της επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου στην συμπεριφορά της φλόγας κρίνεται απαραίτητη.

Μέχρι αυτό το σημείο μελετήθηκε η επίδραση της κλίσης υπό σταθερή ταχύτητα ανέμου στα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου κλάσματος μάζας. Τώρα μελετάται η συνεισφορά της ταχύτητας ανέμου στην συμπεριφορά της φλόγας αν διατηρηθεί η κλίση του εδάφους σταθερή. Εξετάζεται η επίδραση της ταχύτητας του αέρα στην ποσότητα της καύσιμης ύλης που καίγεται, στις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες και στην σταθεροποίηση του μετώπου της φλόγας.

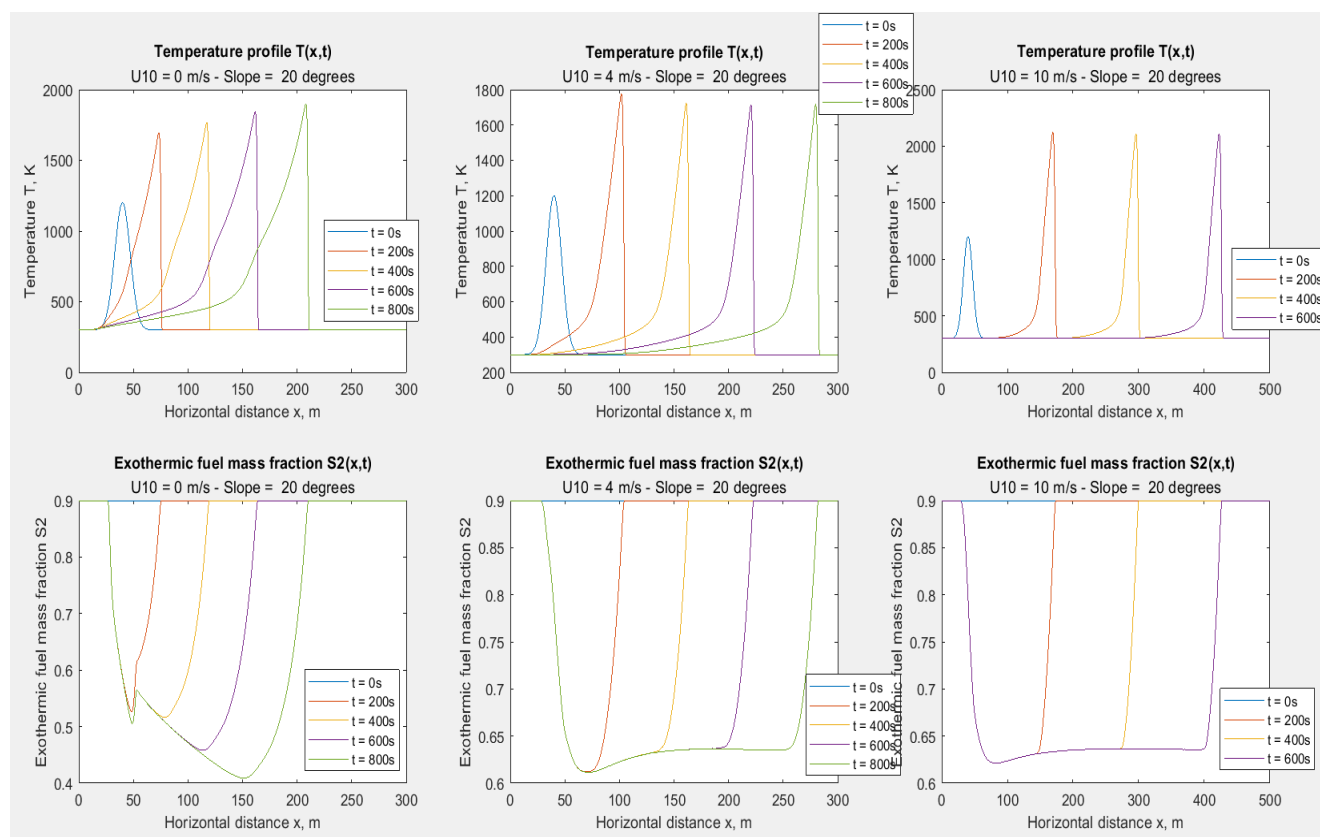
Στο **Σχήμα 4.3.2.1** παρουσιάζονται τα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου κλάσματος μάζας για κεκλιμένο έδαφος 10° και για μικρές ταχύτητες ανέμου. Στην πρώτη γραμμή παρουσιάζονται τα προφίλ θερμοκρασίας, ενώ στην δεύτερη γραμμή τα προφίλ εξώθερμου μέρους. Η πρώτη στήλη αφορά την περίπτωση μηδενικής ταχύτητας ανέμου, ενώ η δεύτερη και η τρίτη στήλη αφορούν τις περιπτώσεις ταχύτητας ανέμου $U_{10} = 2 \text{ m/s}$ και $U_{10} = 4 \text{ m/s}$ αντίστοιχα. Φαίνεται πως στην περίπτωση χαμηλών ταχυτήτων, αύξηση στην ταχύτητα του αέρα υπό δεδομένη κλίση να οδηγεί σε μείωση της ύλης που καίγεται (αύξηση του S_2). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, αυτό οφείλεται στο ότι η φλόγα διαδίδεται προς μία κατεύθυνση και δεν παραμένει στο ίδιο σημείο, ώστε να καεί πλήρως το καύσιμο. Επίσης, η ποσότητα S_2 εμφανίζεται να έχει μεγαλύτερη χρονική διακύμανση στην περίπτωση μηδενικής ταχύτητας ανέμου (πρώτη στήλη) και όταν $U_{10} = 2 \text{ m/s}$ (δεύτερη στήλη) από ότι στην περίπτωση $U_{10} = 4 \text{ m/s}$ (τρίτη στήλη). Όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες του μετώπου της φλόγας δεν φαίνεται να επηρεάζονται ιδιαίτερα.

Στο **Σχήμα 4.3.2.2** απεικονίζονται τα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου μέρους για έδαφος με κλίση 20° και για ταχύτητες ανέμου $U_{10} = 0 \text{ m/s}$, 4 m/s , 10 m/s . Σε αντίθεση με την περίπτωση πολύ χαμηλών ταχυτήτων, η ποσότητα της καύσιμης ύλης που καίγεται φαίνεται να είναι περίπου ίση για ταχύτητες ανέμου $U_{10} = 4 \text{ m/s}$ και $U_{10} = 10 \text{ m/s}$. Συνεπώς, θα μπορούσε να ειπωθεί πως για ταχύτητες ανέμου $U_{10} \geq 4 \text{ m/s}$, υπό μέτρια κλίση εδάφους, η ποσότητα της ύλης που καίγεται είναι περίπου ίση. Επίσης, παρατηρείται πως υπάρχει πολύ μικρή χρονική διακύμανση της ποσότητας S_2 , ενώ υπό μηδενική ταχύτητα αέρα η διακύμανση είναι αρκετά έντονη.

Όσον αφορά την σταθεροποίηση του μετώπου της φλόγας παρατηρείται και στα δύο σχήματα πως η αύξηση στην ταχύτητα του ανέμου συμβάλλει στην ταχύτερη σταθεροποίησή της. Για παράδειγμα στο **Σχήμα 4.3.2.2**, υπό μηδενική ταχύτητα ανέμου οι μέγιστες θερμοκρασίες συνεχώς αυξάνονται, ενώ υπό ταχύτητα $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ η φλόγα σταθεροποιείται μόλις από τη χρονική στιγμή $t = 200 \text{ s}$. Για το εύρος τιμών $U_{10} \geq 4 \text{ m/s}$, με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες, γεγονός που μπορεί να οφείλεται στην αύξηση της παροχής του οξυγόνου στην καύση.



Σχήμα 4.3.2.1: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου για κεκλιμένο έδαφος 10° .

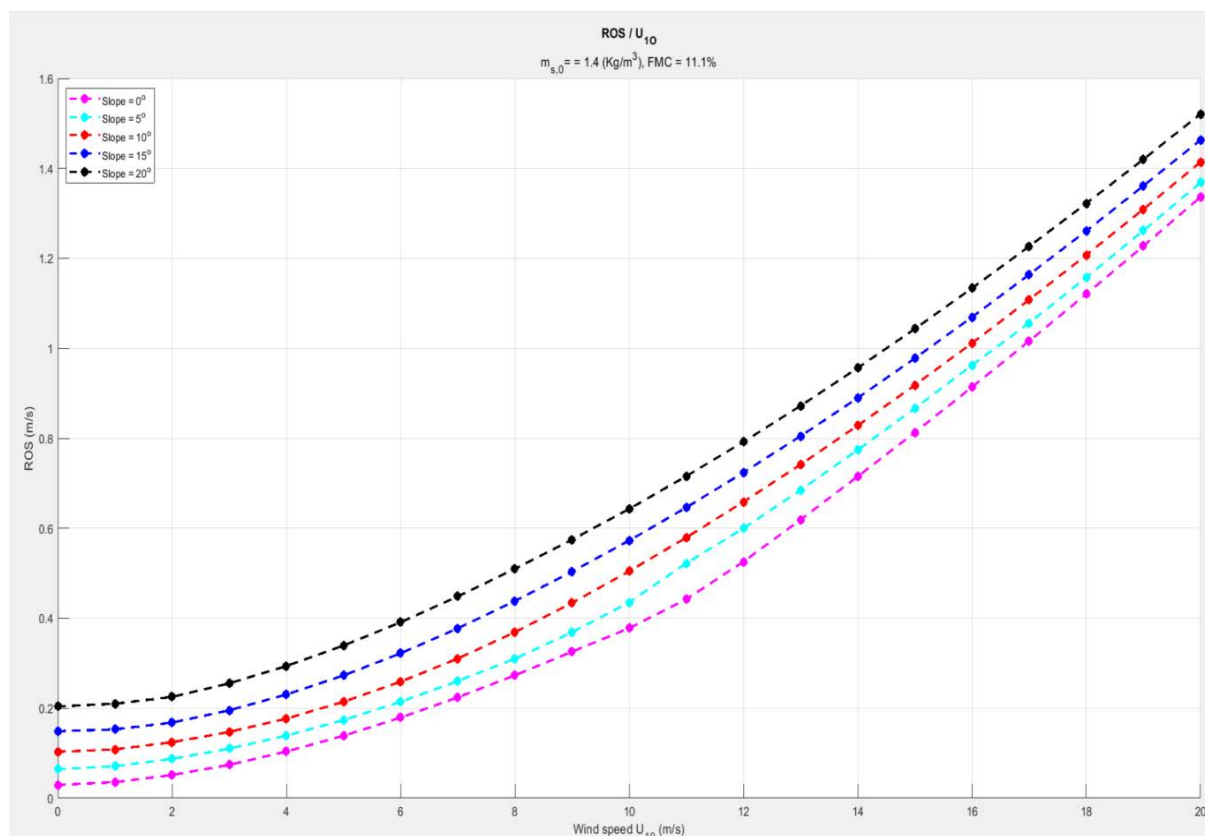


Σχήμα 4.3.2.2: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου για κεκλιμένο έδαφος 20° .

4.3.3 Εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα ανέμου

Προηγουμένως εξετάστηκε η επίδραση της ταχύτητας ανέμου U_{10} στο προφίλ θερμοκρασίας του μετώπου και στο προφίλ του εξώθερμου μέρους της ύλης. Στο υποκεφάλαιο αυτό μελετάται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου στην ταχύτητα διάδοσης της δασικής πυρκαγιάς για διάφορες τιμές κλίσης εδάφους. Στο τέλος, γίνεται εύρεση των κατάλληλων συναρτήσεων που να περιγράφουν καλύτερα την εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα U_{10} . Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για ένα εύρος τιμών της ταχύτητας ανέμου $[0, 20]$ m/s και για σταθερές τιμές του bulk density $m_{s,0} = 1,4 \text{ Kg/m}^3$ και του περιεχομένου σε υγρασία $\text{FMC} = 11,1 \%$.

Στο **Σχήμα 4.3.3.1** γίνεται η απεικόνιση των δεδομένων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις για διάφορες τιμές κλίσης του εδάφους. Με ροζ χρώμα απεικονίζεται η εξάρτηση του ROS για οριζόντιο έδαφος, με γαλάζιο η εξάρτηση του ROS για κεκλιμένο έδαφος 5° , με κόκκινο χρώμα για κεκλιμένο έδαφος 10° και τέλος με σκούρο μπλε και μαύρο χρώμα οι περιπτώσεις για κλίσεις εδάφους 15° και 20° , αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3.3.1: Εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα ανέμου U_{10} για διάφορες τιμές της κλίσης εδάφους.

Είναι εμφανές πως για οποιαδήποτε τιμή της κλίσης, αύξηση της ταχύτητας του ανέμου συνεπάγεται αύξηση του ROS. Για παράδειγμα, στην περίπτωση κεκλιμένου εδάφους 20° (μαύρη καμπύλη), όταν η ταχύτητα ανέμου είναι $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, η φλόγα

διαδίδεται περίπου με ταχύτητα 0,64 m/s, ενώ όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι $U_{10} = 15$ m/s, η φλόγα διαδίδεται περίπου με 1,04 m/s.

Στο σχήμα φαίνεται επίσης και η συνεισφορά της κλίσης στην ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς. Εάν διατηρηθεί η ταχύτητα του ανέμου σταθερή, μεγαλύτερη τιμή της κλίσης οδηγεί σε μεγαλύτερη τιμή της ταχύτητας διάδοσης της φωτιάς. Φέρνοντας μια κάθετη στον άξονα των τετμημένων σε μια συγκεκριμένη τιμή, τα σημεία τομής της κάθετης με τις καμπύλες του σχήματος αναπαριστούν τις τιμές του ROS για τις αντίστοιχες τιμές κλίσεων εδάφους. Για παράδειγμα, για μια δεδομένη τιμή ταχύτητας ανέμου $U_{10} = 12$ m/s, η τιμή του ROS για οριζόντιο έδαφος είναι $ROS = 0,53$ m/s, για κεκλιμένο έδαφος 10° είναι $ROS = 0,66$ m/s και για κεκλιμένο έδαφος 20° είναι $ROS = 0,79$ m/s. Ομοίως, τα σημεία τομής των καμπυλών με τον άξονα των τεταγμένων αναπαριστούν την ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς υπό μηδενική ταχύτητα ανέμου.

Θα ήταν αρκετά χρήσιμη η εύρεση μιας συνάρτησης που να περιγράφει με ικανοποιητικό τρόπο την εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα του αέρα. Η εξάρτηση αναφέρεται να είναι παραβολική [5] και να ακολουθεί την εξής μορφή:

$$ROS = (ROS)_0 + \varphi U_{10}^2 \quad (4.1)$$

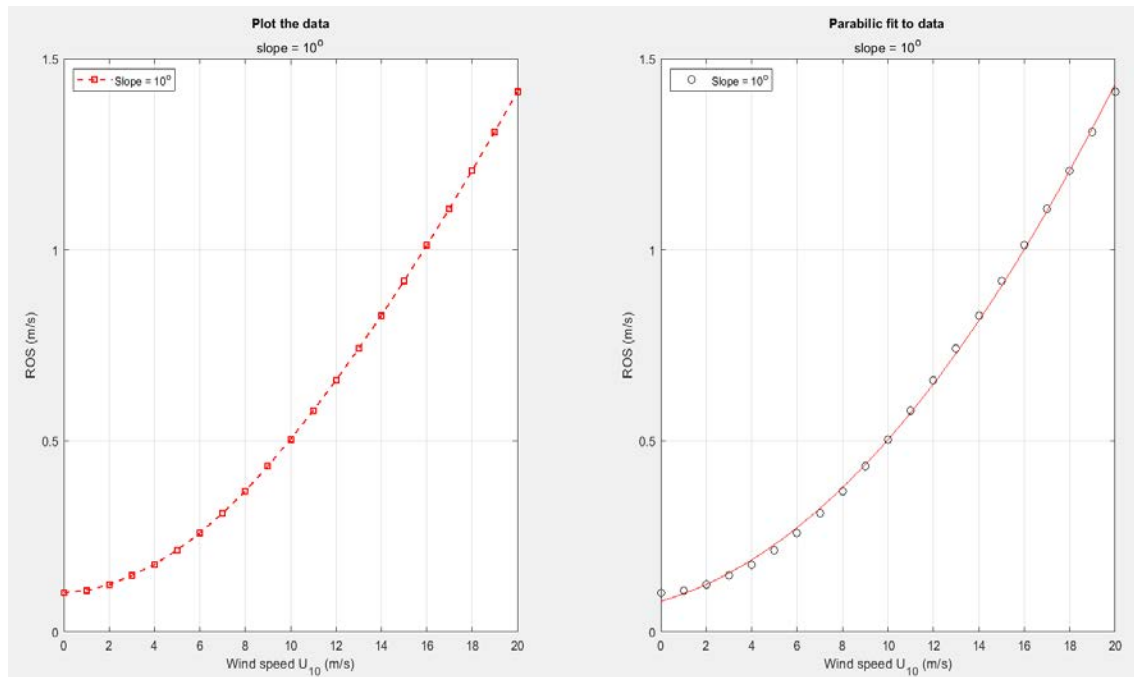
Με $(ROS)_0$ συμβολίζεται η ταχύτητα διάδοσης της δασικής πυρκαγιάς υπό μηδενική ταχύτητα ανέμου και ο όρος φ είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τις ιδιότητες της καύσιμης ύλης (bulk density, θερμοχωρητικότητα, υγρασία). Ωστόσο, η παραπάνω σχέση δεν λαμβάνει υπόψη την συνεισφορά της κλίσης του εδάφους. Θα μπορούσε να γίνει η επέκταση της σχέσης (4.1), ώστε να συμπεριλαμβάνει και την συνεισφορά της κλίσης. Σε αυτή την περίπτωση ο όρος $(ROS)_0$ θα αναπαριστά την ταχύτητα διάδοσης υπό μηδενική ταχύτητα ανέμου και δεδομένη κλίση και ο συντελεστής φ θα εξαρτάται πλέον και από την κλίση του εδάφους. Για τον σκοπό αυτό έγινε αντιστοίχιση των δεδομένων με πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού.

Η αντίστοιχη των δεδομένων πραγματοποιήθηκε στο MATLAB και η εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα U_{10} φαίνεται να περιγράφεται με πολύ καλή ακρίβεια από πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Η διαφορά με την σχέση (4.1) είναι ότι εμφανίζεται και ο όρος πρώτου βαθμού. Συνεπώς, η αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα ανέμου ακολουθεί την ολοκληρωμένη πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού της μορφής:

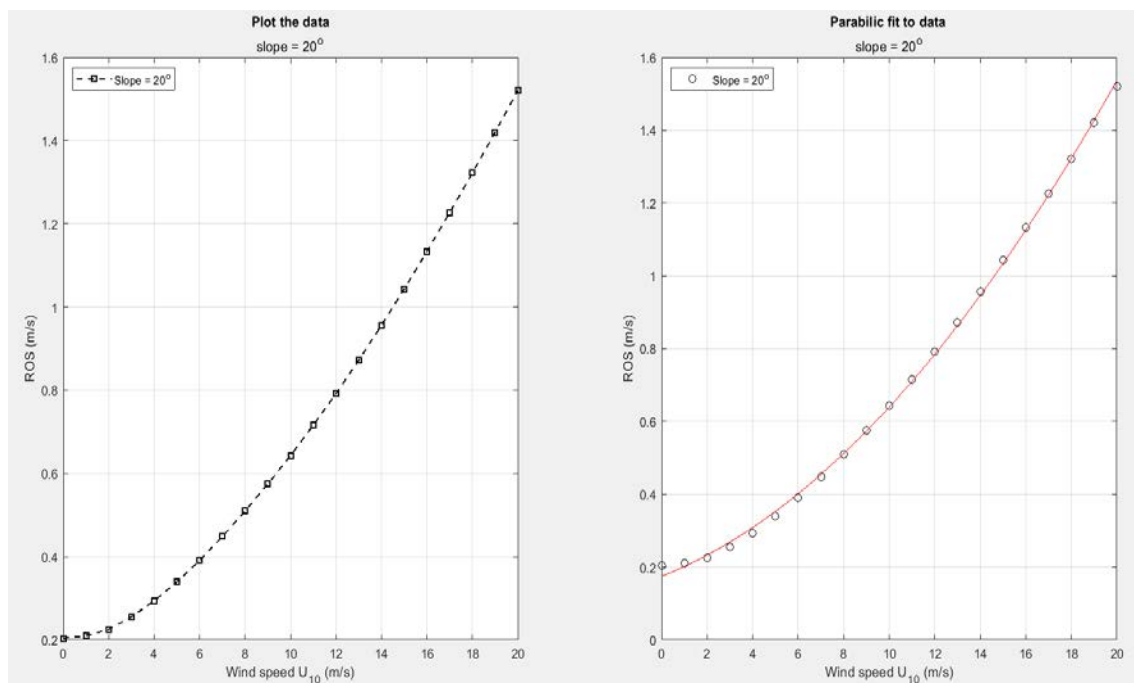
$$y = ax^2 + bx + c \quad (4.2)$$

Η ικανοποιητική αντιστοίχιση των δεδομένων επιβεβαιώνεται από τα **Σχήματα 4.3.3.2 και 4.3.3.3**. Στην αριστερή στήλη του **Σχήματος 4.3.3.2** γίνεται η γραφική απεικόνιση των σημείων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις για κεκλιμένο έδαφος 10° , ενώ στην δεξιά στήλη πραγματοποιείται η αντιστοίχιση των σημείων αυτών με πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Ομοίως, στην αριστερή στήλη του **Σχήματος 4.3.3.3** παρουσιάζονται τα σημεία των προσομοιώσεων για κεκλιμένο έδαφος 20° και στην δεξιά στήλη γίνεται η αντιστοίχισή τους με πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Παρατηρείται πως και στις δύο περιπτώσεις η πολυωνυμική συνάρτηση

περιγράφει με πολύ καλή ακρίβεια την εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα του ανέμου.



Σχήμα 4.3.3.2: Αντιστοίχιση των δεδομένων με πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Κλίση εδάφους 10°.



Σχήμα 4.3.3.3: Αντιστοίχιση των δεδομένων με πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Κλίση εδάφους 20°.

Παρακάτω παρατίθενται οι συντελεστές της πολυωνυμικής συνάρτησης **(4.2)** που περιγράφουν καλύτερα την εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα ανέμου U_{10} για όλες τις καμπύλες του **Σχήματος 4.3.3.1**.

$$\text{Μηδενική κλίση – Μωβ καμπύλη: } ROS = 0.002989U_{10}^2 + 0.006625U_{10} + 0,02729$$

$$\text{Κλίση } 5^\circ \text{ – Γαλάζια καμπύλη: } ROS = 0,002735U_{10}^2 + 0,01231U_{10} + 0,0502$$

$$\text{Κλίση } 10^\circ \text{ – Κόκκινη καμπύλη: } ROS = 0,002541U_{10}^2 + 0,01687U_{10} + 0,08052$$

$$\text{Κλίση } 15^\circ \text{ – Μπλε καμπύλη: } ROS = 0,002312U_{10}^2 + 0,02177U_{10} + 0,1208$$

$$\text{Κλίση } 20^\circ \text{ – Μαύρη καμπύλη: } ROS = 0,002161U_{10}^2 + 0,02489U_{10} + 0,1747 \quad \mathbf{(4.3)}$$

Όπως φαίνεται στις σχέσεις **(4.3)** ο πρωτοβάθμιος όρος δεν είναι μηδενικός, σε αντίθεση με την σχέση **(4.1)**. Μερικές από τις παρατηρήσεις συνοψίζονται ως εξής:

- Ο σταθερός όρος για όλες τις καμπύλες είναι πολύ κοντά αριθμητικά με τις τιμή του ROS για μηδενική ταχύτητα ανέμου, υπό δεδομένη κλίση. Συνεπώς, ο σταθερός όρος εκφράζει κατά προσέγγιση την τιμή αυτή, επιβεβαιώνοντας τον όρο $(ROS)_0$ στην σχέση **(4.1)**.
- Ο συντελεστής του δευτεροβάθμιου όρου φαίνεται να έχει μια πτωτική τάση με την αύξηση της κλίσης. Ωστόσο, η διακύμανση αυτή είναι μικρή. Επομένως, θα μπορούσε να ειπωθεί πως ο συγκεκριμένος συντελεστής αναπαριστά τον όρο φ της σχέσης **(4.1)**. Εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες της καύσιμης ύλης και σε μικρότερο βαθμό από την κλίση του εδάφους.
- Ο συντελεστής του πρωτοβάθμιου όρου φαίνεται να έχει μια αυξητική τάση με την αύξηση της κλίσης.
- Η σχέση **(4.1)** φαίνεται να έχει ισχύ για την περιγραφή της εξάρτησης του ROS από την ταχύτητα του αέρα. Ωστόσο, αποτελεί απλοποιητική προσέγγιση της πιο αναλυτικής σχέσης **(4.2)**. Η χρήση των δύο σχέσεων εξαρτάται από την επιθυμητή ακρίβεια.

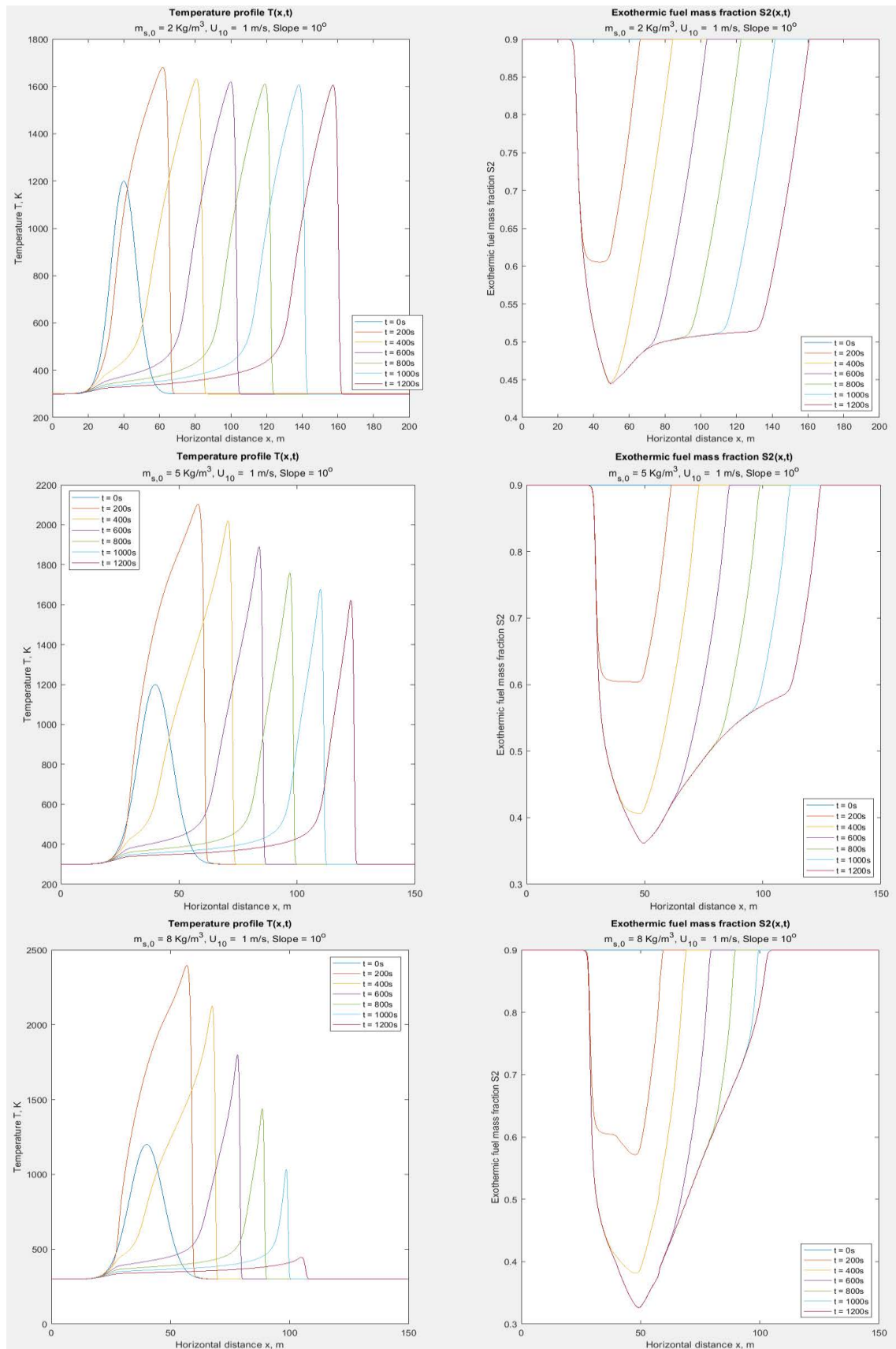
4.3.4 Bulk density

Μια άλλη παράμετρος που επιδρά σημαντικά στην συμπεριφορά και την ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς είναι το «bulk density». Όπως έχει ήδη αναφερθεί το «bulk density» αποτελεί ιδιότητα της ύλης και εκφράζει την μάζα της καύσιμης ύλης διαιρεμένη με τον συνολικό όγκο που καταλαμβάνει η ύλη μαζί με τον αέρα. Ο όρος αυτός ουσιαστικά εκφράζει πυκνότητα και έχει μονάδες Kg/m^3 . Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η επίδραση του «bulk density» στα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου μέρους της καύσιμης ύλης και στην ταχύτητα διάδοσης της φλόγας. Στο τέλος, γίνεται η αντιστοίχιση των δεδομένων, που προέρχονται από τις προσομοιώσεις στο MATLAB, με κατάλληλη συνάρτηση που να περιγράφει την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» για διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου και κλίσης εδάφους.

Το «bulk density» αποτελεί το γινόμενο της πυκνότητας του καυσίμου και του κλάσματος όγκου και ορίζει το πόσο «αραιή» είναι η καύσιμη ύλη. Μικρή τιμή του κλάσματος όγκου (packing ratio) υποδηλώνει πως η καύσιμη ύλη είναι γενικά αραιή και υπάρχει αρκετός κενός χώρος ανάμεσα. Αντίστοιχα, μια μεγάλη τιμή του κλάσματος όγκου υποδηλώνει πως η καύσιμη ύλη είναι σχετικά πυκνή και υπάρχει λιγότερος κενός χώρος. Οι τιμές του κλάσματος όγκου κυμαίνονται $[0,00106, 0,04878]$ και οι τιμές του «bulk density» κυμαίνονται $[0,5, 25] \text{ Kg/m}^3$ [6]. Συνεπώς, μικρές τιμές του «bulk density» αντιστοιχούν σε καύσιμη ύλη με μικρή πυκνότητα όπως φύλλα, κλαδιά και μεγάλες τιμές αντιστοιχούν σε καύσιμη ύλη με μεγάλη πυκνότητα, όπως είναι οι κορμοί των δέντρων.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τιμές του «bulk density» $[0,5, 10] \text{ Kg/m}^3$. Για την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων εξετάστηκε η επίδραση του «bulk density» στην συμπεριφορά της φλόγας για διάφορες τιμές ταχύτητας ανέμου και κλίσης εδάφους, διατηρώντας το περιεχόμενο σε υγρασία σταθερό ($S_1 = 0,1$). Στο **Σχήμα 4.3.4.1** απεικονίζεται η επίδραση του «bulk density» στα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου μέρους της καύσιμης ύλης για τιμές $m_{s,0} = 2 \text{ Kg/m}^3$, 5 Kg/m^3 και 8 Kg/m^3 . Σε κάθε γραμμή η τιμή του «bulk density» παραμένει σταθερή, στην αριστερή στήλη φαίνονται τα προφίλ θερμοκρασίας $T(x,t)$ και στην δεξιά στήλη τα προφίλ του εξώθερμου μέρους της καύσιμης ύλης $S_2(x,t)$. Η τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι $U_{10} = 1 \text{ m/s}$, η τιμή του περιεχομένου σε υγρασία είναι $\text{FMC} = 11,1\%$ και η τιμή της κλίσης είναι 10° .

Παρατηρώντας την πρώτη γραμμή όπου $m_{s,0} = 2 \text{ Kg/m}^3$ το μέτωπο της φλόγας φαίνεται να διαδίδεται ομαλά στον χρονικό ορίζοντα $t = 1200 \text{ s}$. Οι μέγιστες θερμοκρασίες του μετώπου φαίνεται να είναι περίπου στα 1600 K και η φλόγα καίει περίπου την ίδια ποσότητα ύλης με το πέρασμα του χρόνου. Οπότε, το μέτωπο της φωτιάς φαίνεται σταθεροποιημένο. Ωστόσο, στην δεύτερη γραμμή όπου $m_{s,0} = 5 \text{ Kg/m}^3$ παρατηρείται μια πτώση των μεγίστων θερμοκρασιών στον χρονικό ορίζοντα $t = 1400 \text{ s}$. Αυτό αποτυπώνεται και στην έντονη διακύμανση της ποσότητας S_2 με το πέρασμα του χρόνου. Στην τρίτη γραμμή η πτώση των μεγίστων θερμοκρασιών είναι ταχύτερη, με αποτέλεσμα η φλόγα να σβήσει την χρονική στιγμή $t = 1200 \text{ s}$. Συνεπώς, φαίνεται πως μεγάλες τιμές του «bulk density» να οδηγούν σε σβήσιμο της φλόγας.



Σχήμα 4.3.4.1: Επίδραση του bulk density στα προφίλ $T(x,t)$ και $S_2(x,t)$ για $U_{10} = 1$ m/s και κλίση 10° .

Μερικές από τις παρατηρήσεις από τα προφίλ του **Σχήματος 4.3.4.1** διατυπώνονται ως εξής:

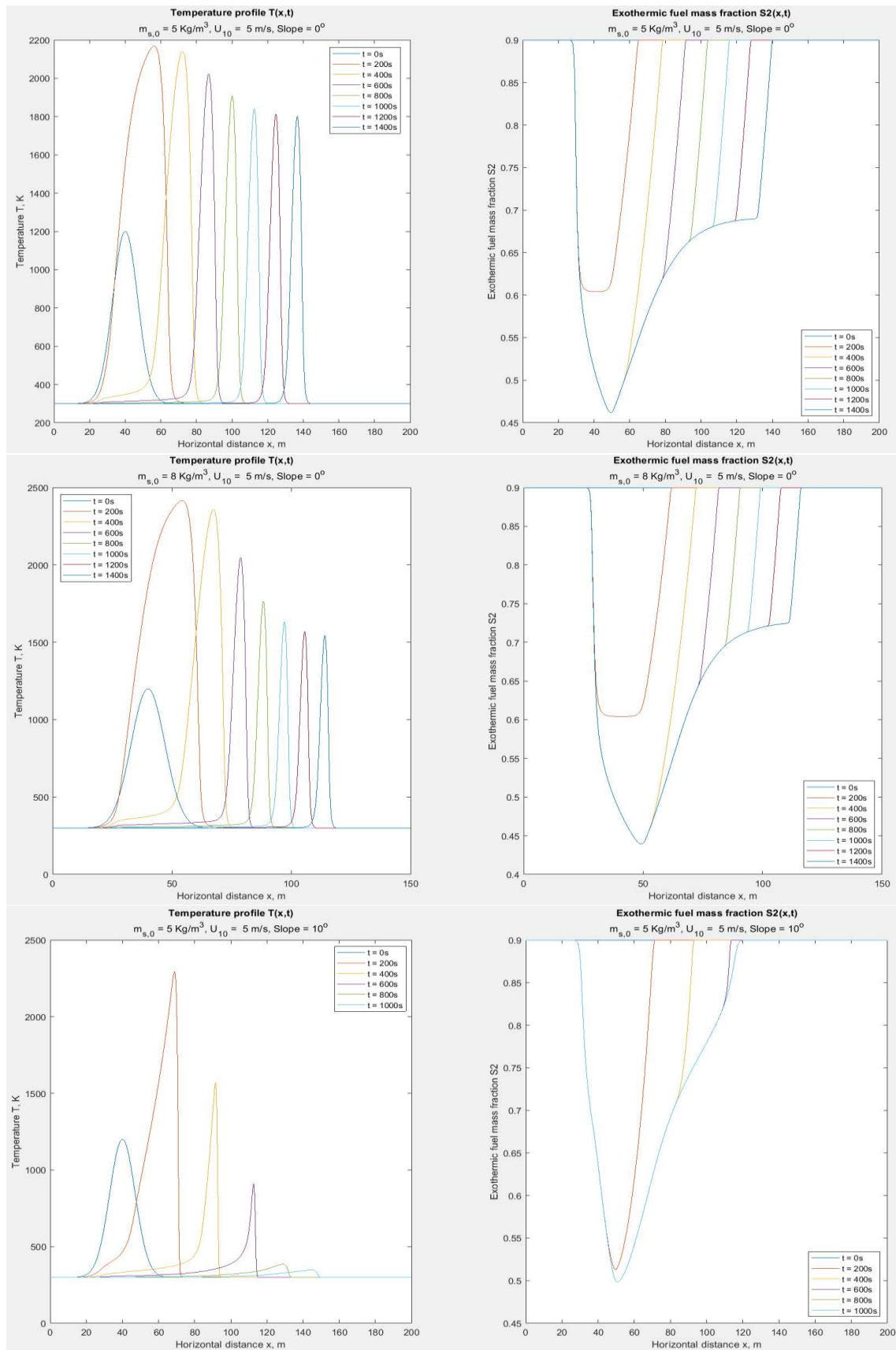
- Αύξηση του «bulk density» πέρα από μια τιμή, οδηγεί σε εξασθένηση της φλόγας με το πέρασμα του χρόνου.
- Αύξηση του «bulk density» στην τιμή $m_{s,0} = 8 \text{ Kg/m}^3$, υπό χαμηλή ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 1 \text{ m/s}$, συνεπάγεται σβήσιμο της φλόγας.
- Η εξασθένηση της φλόγας φέρνει έντονη διακύμανση της ποσότητας S_2 .
- Αύξηση του «bulk density» οδηγεί σε αύξηση των μεγίστων θερμοκρασιών και της ποσότητας που καίγεται από την φλόγα (μείωση S_2).

Στο **Σχήμα 4.3.4.2** παρουσιάζεται η επίδραση του «bulk density» στην συμπεριφορά του προφίλ θερμοκρασίας και του εξώθερμου μέρους της καύσιμης ύλης για μέτρια ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 5 \text{ m/s}$. Εξετάζεται επίσης η επίδραση της κλίσης, εάν διατηρηθούν οι τιμές του «bulk density» και της ταχύτητας του αέρα σταθερές.

Στην πρώτη γραμμή του σχήματος απεικονίζονται τα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου μέρους της ύλης για τις τιμές $m_{s,0} = 5 \text{ Kg/m}^3$, $U_{10} = 5 \text{ m/s}$ και μηδενική κλίση. Φαίνεται πως το μέτωπο της φλόγας έχει διαδοθεί περίπου έως την θέση $x = 140 \text{ m}$ σε χρονικό διάστημα $t = 1400 \text{ s}$. Παρατηρείται μια σχετική πτώση των μεγίστων θερμοκρασιών, ιδιαίτερα έως την χρονική στιγμή $t = 800 \text{ s}$, κάτι που αποτυπώνεται επίσης και στην διακύμανση της ποσότητας S_2 . Μετά την χρονική στιγμή $t = 800 \text{ s}$, το μέτωπο φαίνεται να σταθεροποιείται.

Στην δεύτερη γραμμή του σχήματος η τιμή του «bulk density» αυξάνεται στην τιμή $m_{s,0} = 8 \text{ Kg/m}^3$, ενώ όλες οι άλλες παράμετροι διατηρούνται σταθερές. Παρατηρείται εντονότερη πτώση των μεγίστων θερμοκρασιών και διακύμανσης της ποσότητας S_2 , συγκριτικά με την προηγούμενη περίπτωση. Το μέτωπο της φλόγας έχει διαδοθεί περίπου έως την θέση $x = 120 \text{ m}$. Προκύπτει ότι *η αύξηση της τιμής του «bulk density» στις ίδιες συνθήκες, προκαλεί πιο αργή διάδοση της φλόγας*. Όσον αφορά τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, υπάρχει μια αύξηση των μεγίστων θερμοκρασιών έως την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ s}$, συγκριτικά με την περίπτωση $m_{s,0} = 5 \text{ Kg/m}^3$. Μετά την χρονική στιγμή αυτή, φαίνεται πως οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα για τις δύο περιπτώσεις.

Στην τρίτη γραμμή του σχήματος η τιμή του «bulk density» είναι $m_{s,0} = 5 \text{ Kg/m}^3$ και η κλίση του εδάφους είναι 10° . Παρατηρείται ταχύτερη πτώση των μεγίστων θερμοκρασιών, έως ότου η φλόγα να εξασθενήσει σχεδόν πλήρως την χρονική στιγμή $t = 800 \text{ s}$. Σε αντιδιαστολή με την περίπτωση του οριζοντίου εδάφους (πρώτη γραμμή του σχήματος), *η ύπαρξη κλίσης για δεδομένη τιμή του «bulk density» και ταχύτητας ανέμου προκαλεί εξασθένηση της φλόγας*. Θα ήταν παράλειψη να μην αναφερθεί πως για κεκλιμένο έδαφος 10° , ενώ η φλόγα σβήνει στην τιμή του «bulk density» $m_{s,0} = 5 \text{ Kg/m}^3$, υπό ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 5 \text{ m/s}$, για τις ίδιες τιμές κλίσης εδάφους και του «bulk density», η φλόγα δεν σβήνει υπό ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 1 \text{ m/s}$ (δεύτερη γραμμή του **Σχήματος 4.3.4.1**). Άρα θα μπορούσε να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι *υπό δεδομένη κλίση εδάφους, όσο αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου, η φλόγα σβήνει για μικρότερες τιμές του «bulk density»*.



Σχήμα 4.3.4.2: Επίδραση του bulk density στα προφίλ $T(x,t)$ και $S_2(x,t)$ για $U_{10} = 5 \text{ m/s}$ και για μεταβολή της κλίσης του εδάφους.

Μερικές παρατηρήσεις, που προκύπτουν από την μελέτη της επίδρασης του «bulk density» στα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου μέρους του καυσίμου, είναι οι εξής:

- Η φλόγα έχει την τάση να σβήνει μετά από ένα χρονικό διάστημα για μεγάλες τιμές του «bulk density», υπό δεδομένες συνθήκες.
- Η φλόγα διανύει μικρότερη απόσταση όσο αυξάνεται το «bulk density», υπό δεδομένες συνθήκες.
- Με την αύξηση του «bulk density» αυξάνονται γενικά οι μέγιστες θερμοκρασίες του μετώπου. Για μεγάλες τιμές όμως του «bulk density», η αύξηση αυτή είναι έντονη κυρίως στις θέσεις κοντά στο σημείο έναρξης της πυρκαγιάς.
- Η ύπαρξη κλίσης στις περιπτώσεις σχετικά μεγάλων τιμών του «bulk density» επιταχύνει την εξασθένιση της φλόγας.
- Για δεδομένη τιμή της κλίσης του εδάφους, όσο αυξάνεται η ταχύτητα ανέμου U_{10} η φλόγα εξασθενεί για μικρότερες τιμές του «bulk density».

4.3.5 Εξάρτηση του ROS από το bulk density

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσης της πυρκαγιάς από το «bulk density» ακολουθεί την εξής μορφή:

$$ROS \sim m_{s,0}^{-\zeta} \quad [5] \quad (4.4)$$

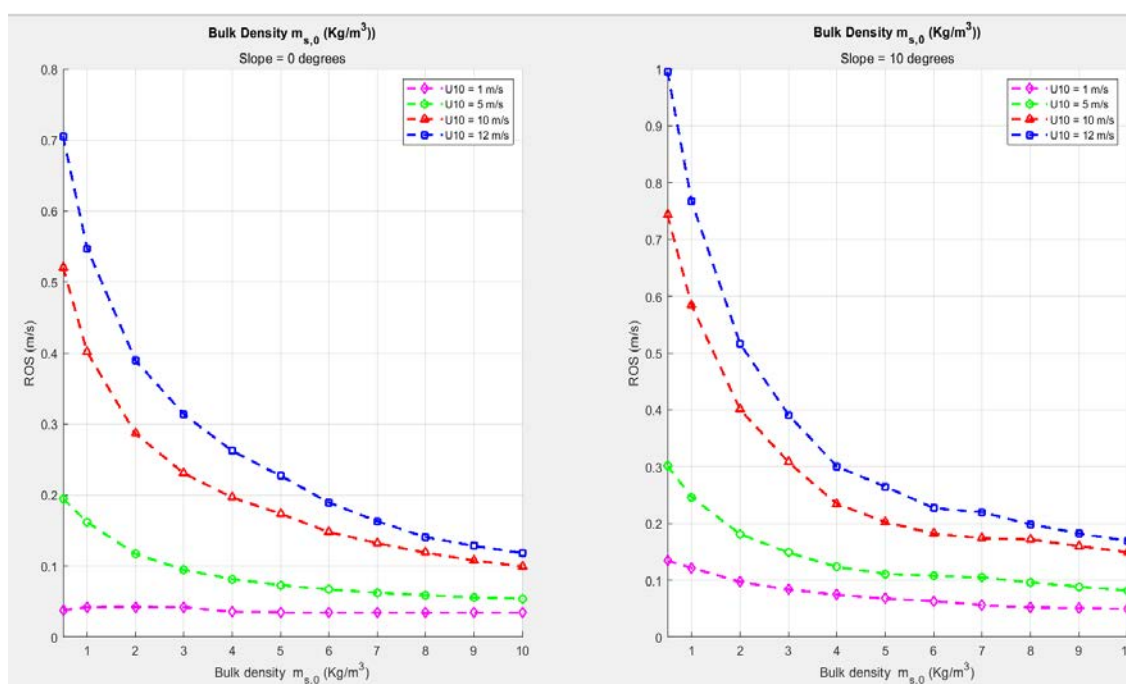
περιγράφοντας ικανοποιητικά τόσο πειραματικά, όσο και πραγματικά δεδομένα. Η σχέση (4.4) εκφράζει υπερβολική συμπεριφορά, με τον εκθέτη ζ να παίρνει τιμές [0,23, 0,74]. Ο εκθέτης ζ εμφανίζεται να είναι αύξουσα συνάρτηση της ταχύτητας ανέμου U_{10} και μπορεί να υπολογιστεί αναλυτικά με την εξής εμπειρική σχέση:

$$\zeta = 0,04(1 + U_{10}) \quad [5] \quad (4.5)$$

Στο παρόν υποκεφάλαιο εξετάζεται η ισχύς της σχέσης (4.4) και εάν η ύπαρξη κλίσης του εδάφους επηρεάζει την υπερβολική συμπεριφορά. Τέλος, γίνεται η αντιστοίχιση των δεδομένων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις με κατάλληλες συναρτήσεις, που να περιγράφουν ικανοποιητικά την υπερβολική εξάρτηση του ROS από το «bulk density».

Στο **Σχήμα 4.3.5.1** απεικονίζονται τα δεδομένα για την εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσης της φλόγας από το «bulk density» για τιμές ταχύτητας ανέμου $U_{10} = 1 \text{ m/s}$, 5 m/s , 10 m/s και 12 m/s , για τις περιπτώσεις οριζοντίου εδάφους και κεκλιμένου εδάφους 10° . Με ροζ χρώμα παρουσιάζεται η καμπύλη για την περίπτωση χαμηλής ταχύτητας ανέμου $U_{10} = 1 \text{ m/s}$, με πράσινο χρώμα η καμπύλη για μέτρια ταχύτητα

ανέμου $U_{10} = 5$ m/s και τέλος με κόκκινο και μπλε χρώμα οι καμπύλες για την περίπτωση υψηλών ταχυτήτων $U_{10} = 10$ m/s και $U_{10} = 12$ m/s, αντίστοιχα. Η αριστερή στήλη αφορά το οριζόντιο έδαφος, ενώ η δεξιά στήλη αφορά κεκλιμένο έδαφος 10° . Γίνεται εύκολα αντιληπτό, πως όσο αυξάνεται η τιμή του «bulk density» υπό δεδομένη κλίση εδάφους και ταχύτητα ανέμου ο ROS μειώνεται. Μάλιστα, φαίνεται πως η μείωση αυτή να περιγράφει την υπερβολική συμπεριφορά της σχέσης (4.4). Εξάιρεση ίσως να αποτελεί η περίπτωση χαμηλής ταχύτητας ανέμου $U_{10} = 1$ m/s (ροζ καμπύλη) στο οριζόντιο έδαφος, όπου ο ROS φαίνεται να είναι περίπου σταθερός. Παρατηρείται πως η ύπαρξη κλίσης (δεξιά στήλη) να εμφανίζει πιο απότομη μείωση συγκριτικά με την περίπτωση οριζοντίου εδάφους (αριστερή στήλη). Η αναλυτική μορφή της συνάρτησης που να αντιστοιχίζεται καλύτερα στα δεδομένα για την κάθε καμπύλη εξετάζεται παρακάτω.

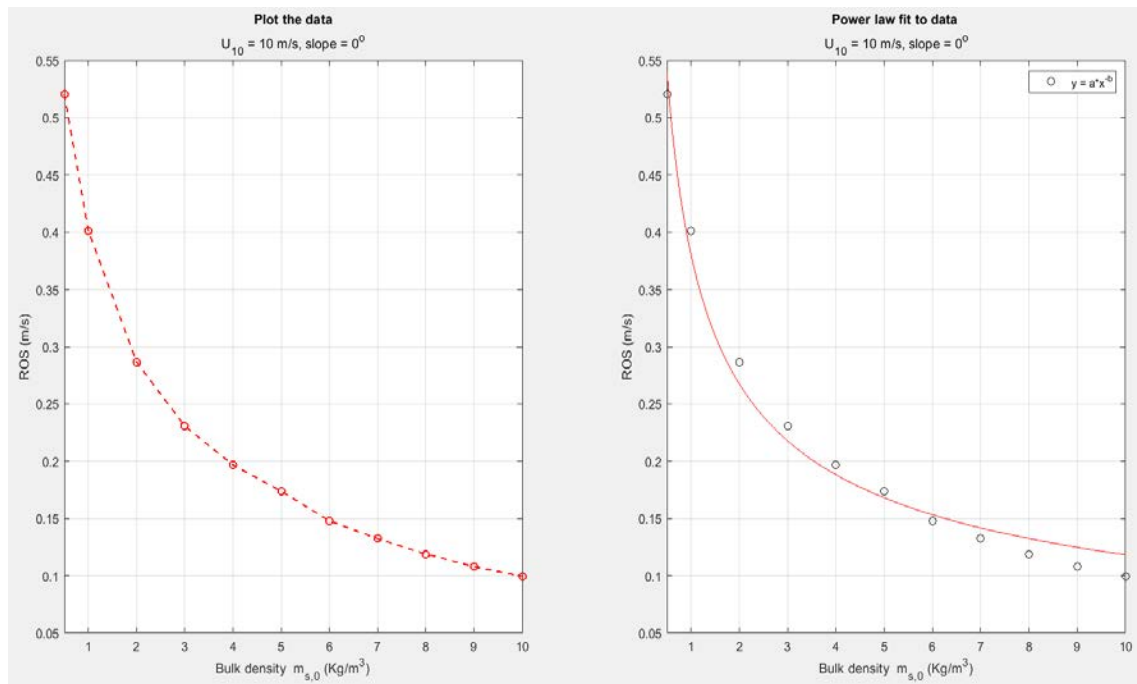


Σχήμα 4.3.5.1: Απεικόνιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density».

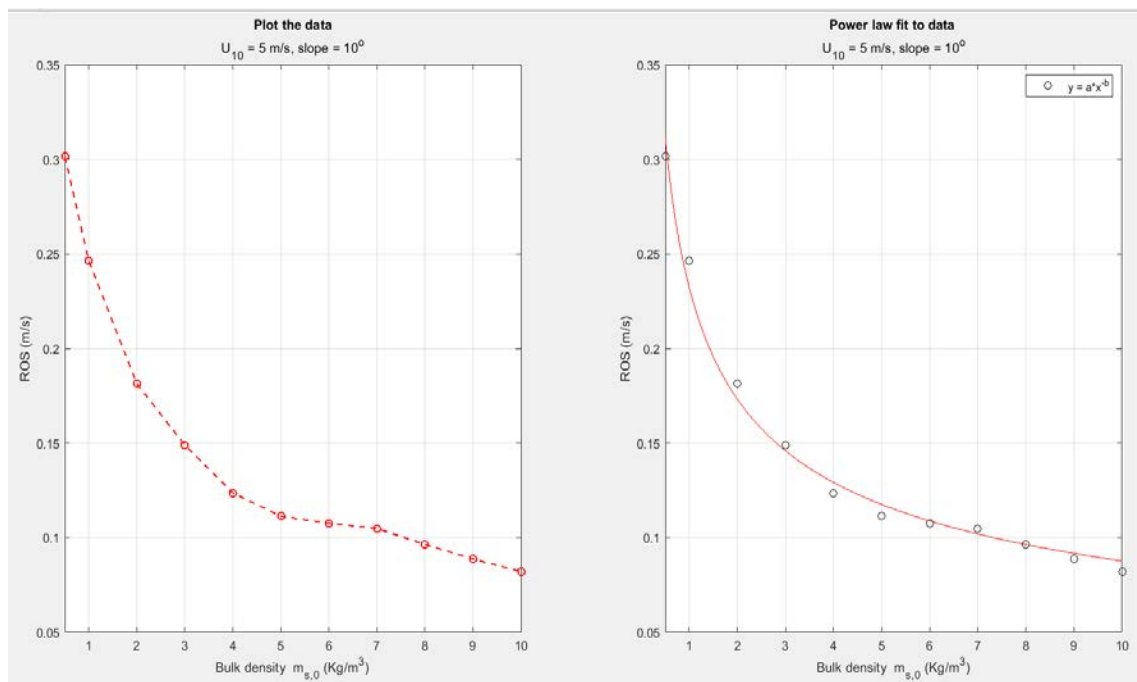
Στο **Σχήμα 4.3.5.2** γίνεται η αντιστοίχιση των δεδομένων για την περίπτωση $U_{10} = 10$ m/s και μηδενική κλίση εδάφους και στο **Σχήμα 4.3.5.3** γίνεται η αντιστοίχιση των δεδομένων για την περίπτωση $U_{10} = 5$ m/s και κεκλιμένο έδαφος 10° . Η μορφή της συνάρτησης υπερβολής που χρησιμοποιείται, προκειμένου να ταιριάζει στην σχέση (4.4), είναι η εξής:

$$y = ax^{-b} \quad (4.6)$$

όπου α και b οι συντελεστές που προσδιορίζονται για την κάθε περίπτωση.



Σχήμα 4.3.5.2: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» με εξίσωση υπερβολής της μορφής $y = ax^{-b}$. $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, $\theta = 0^\circ$.



Σχήμα 4.3.5.3: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» με εξίσωση υπερβολής της μορφής $y = ax^{-b}$. $U_{10} = 5 \text{ m/s}$, $\theta = 10^\circ$.

Παρατηρείται γενικά ότι η χρήση της μορφής **(4.6)** δίνει μια σχετικά καλή προσέγγιση για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density». Οι συντελεστές α , b για όλες τις περιπτώσεις καμπυλών του **Σχήματος 4.3.5.1** δίνονται στον **Πίνακα 4.3.5.1**.

Πίνακας 4.3.5.1: Συντελεστές α , b για την μορφή $y = ax^{-b}$

Κλίση εδάφους Ταχύτητα ανέμου	$\theta = 0^\circ$		$\theta = 10^\circ$	
	α	b	α	b
$U_{10} = 0 \text{ m/s}$	0,03527	0,1681	0,1137	0,3294
$U_{10} = 5 \text{ m/s}$	0,1504	0,4327	0,2322	0,4231
$U_{10} = 10 \text{ m/s}$	0,3799	0,5067	0,5337	0,5390
$U_{10} = 12 \text{ m/s}$	0,5116	0,5292	0,6999	0,5700

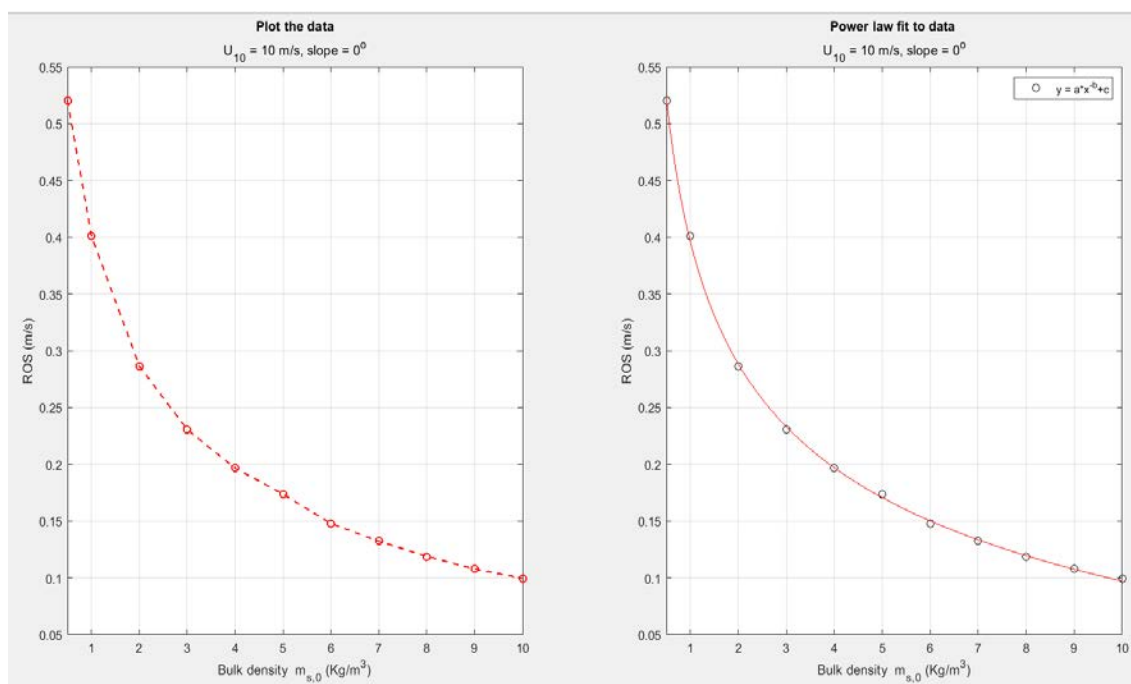
Ο συντελεστής b αναπαριστά ουσιαστικά τον συντελεστή ζ της σχέσης **(4.4)**. Για τα δεδομένα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις παρατηρείται ότι ο εκθέτης λαμβάνει τιμές που ανήκει στο εύρος τιμών που δίνεται από την βιβλιογραφία $\zeta \in [0,23, 0,74]$. Η μόνη περίπτωση που δεν ανήκει στο εύρος αυτό είναι η περίπτωση μηδενικής ταχύτητας ανέμου και μηδενικής κλίσης. Αξίζει να γίνει η υπενθύμιση ότι στην περίπτωση αυτή τα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου μέρους της ύλης είναι συμμετρικά και η φλόγα διαδίδεται με τον ίδιο ρυθμό και προς τις δύο κατευθύνσεις. Ο συντελεστής α φαίνεται να είναι αυξανόμενος με την ταχύτητα του ανέμου, υπό δεδομένη κλίση. Επίσης, για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, η ύπαρξη κλίσης οδηγεί σε μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή α . Όσον αφορά τον συντελεστή b (άρα και τον ζ) φαίνεται να είναι αυξανόμενος με την ταχύτητα του ανέμου υπό σταθερή τιμή της κλίσης. Τέλος, για δεδομένη ταχύτητα ανέμου ο εκθέτης b φαίνεται να λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για μεγαλύτερες τιμές της κλίσης. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση ταχύτητας ανέμου $U_{10} = 5 \text{ m/s}$, όπου για οριζόντιο έδαφος $b = 0,4327$ και για κεκλιμένο έδαφος $10^\circ b = 0,4231$. Παρόλα αυτά οι δύο τιμές είναι πολύ κοντά μεταξύ τους.

Θα μπορούσε να δημιουργηθεί το ερώτημα για το εάν υπάρχει δυνατότητα για καλύτερη αντιστοίχιση των δεδομένων που να περιγράφει την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» σε σχέση με τη μορφή της σχέσης **(4.6)**. Η απάντηση είναι καταφατική. Μπορεί να επιτευχθεί ακόμη καλύτερη αντιστοίχιση των δεδομένων εάν προστεθεί ένας σταθερός όρος στην σχέση **(4.6)**. Έτσι, πλέον η υπερβολική συνάρτηση παίρνει την εξής μορφή:

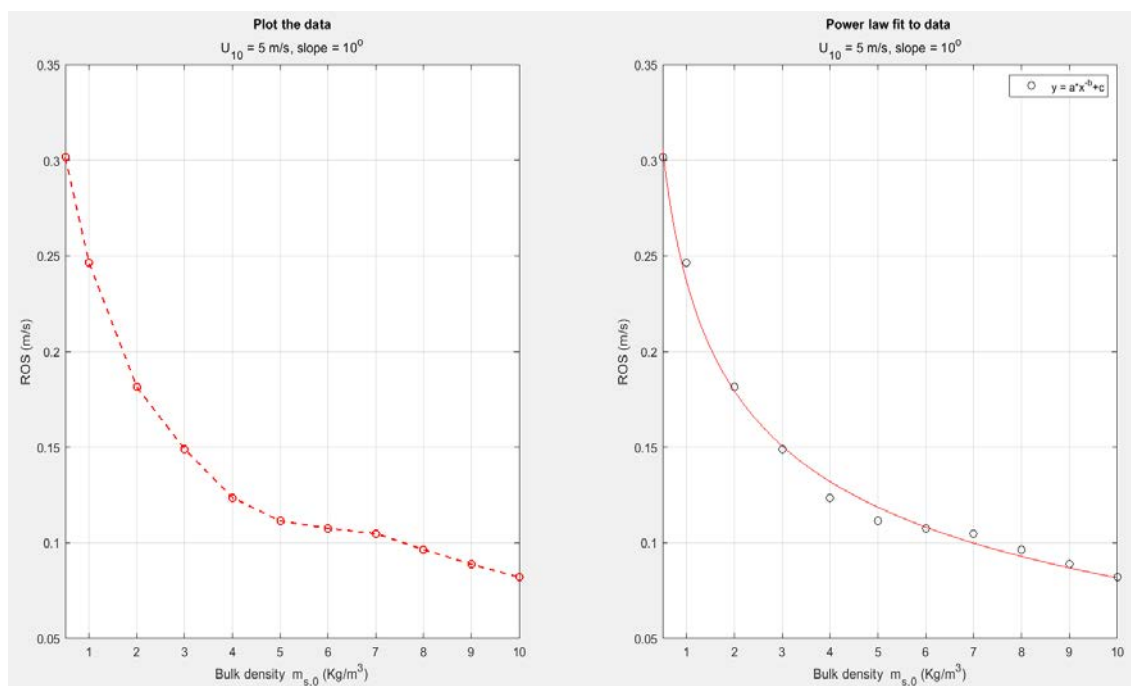
$$y = ax^{-b} + c \quad (4.7)$$

όπου α, b και c οι συντελεστές που προσδιορίζονται για την κάθε περίπτωση.

Στα Σχήματα 4.3.5.4 και 4.3.5.5 γίνεται η αντιστοίχιση των δεδομένων σύμφωνα με την μορφή της υπερβολικής συνάρτησης (4.7) για τις ίδιες περιπτώσεις με αυτές των Σχημάτων 4.3.5.2 και 4.3.5.3, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.3.5.4: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» με εξίσωση υπερβολής της μορφής $y = ax^{-b}+c$. $U_{10} = 10$ m/s, $\theta = 0^\circ$.



Σχήμα 4.3.5.5: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» με εξίσωση υπερβολής της μορφής $y = ax^{-b}+c$. $U_{10} = 5$ m/s, $\theta = 10^\circ$.

Παρατηρείται καλύτερη αντιστοίχιση των δεδομένων με την συνάρτηση της μορφής **(4.7)**, ιδιαίτερα για την περίπτωση ταχύτητας ανέμου $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ και μηδενικής κλίσης εδάφους. Στον **Πίνακα 4.3.5.2** δίνονται αναλυτικά οι συντελεστές α , b , c για όλες τις περιπτώσεις καμπυλών του **Σχήματος 4.3.5.1**.

Πίνακας 4.3.5.2: Συντελεστές α , b για την μορφή $y = \alpha x^{-b} + c$

Κλίση εδάφους Ταχύτητα ανέμου	$\theta = 0^\circ$			$\theta = 10^\circ$		
	α	b	c	α	b	c
$U_{10} = 0 \text{ m/s}$	0,009092	-0,3983	0,04489	-0,623	-0,04664	0,7403
$U_{10} = 5 \text{ m/s}$	0,234	0,2529	-0,08	0,3304	0,275	-0,009368
$U_{10} = 10 \text{ m/s}$	0,7104	0,237	0,3144	0,7617	0,3471	-0,21
$U_{10} = 12 \text{ m/s}$	1,287	0,1762	0,7465	1,061	0,3408	-0,3316

Ωστόσο, παρά την καλύτερη αντιστοίχιση των δεδομένων δεν μπορεί να δοθεί φυσική ερμηνεία για τους συντελεστές α , b , c . Αυτό οφείλεται στην ακανόνιστη συμπεριφορά του προσήματος για τους συντελεστές. Για παράδειγμα ενώ ο συντελεστής α εμφανίζεται γενικά θετικός, στη περίπτωση μηδενικής ταχύτητας ανέμου και κλίσης εδάφους 10° εμφανίζεται με αρνητικό πρόσημο. Ομοίως, ο εκθέτης b εμφανίζει αρνητικό πρόσημο στην περίπτωση μηδενικής ταχύτητας ανέμου. Τέλος, ο συντελεστής c εμφανίζει εντελώς ακανόνιστη συμπεριφορά προσήμου. Συνεπώς, αν και η υπερβολική συνάρτηση της μορφής **(4.7)** ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα συγκριτικά με την πιο απλή μορφή **(4.6)**, δεν έχει φυσική υπόσταση.

Μερικές από τις παρατηρήσεις που προκύπτουν συνοψίζονται ως εξής:

- Η μορφή της σχέσης **(4.6)** εκφράζει ικανοποιητικά την εξάρτηση του ROS από το «bulk density» δίνοντας φυσική σημασία στο πρόβλημα.
- Ο συντελεστής α φαίνεται να είναι αυξανόμενος με την ταχύτητα του ανέμου, υπό δεδομένη κλίση.
- Ο συντελεστής b φαίνεται να είναι αυξανόμενος με την ταχύτητα του ανέμου, υπό δεδομένη κλίση.
- Η ύπαρξη κλίσης οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή α για δεδομένη ταχύτητα ανέμου.
- Η ύπαρξη κλίσης οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές του εκθέτη b για δεδομένη ταχύτητα ανέμου.

4.3.6 Περιεχόμενο σε υγρασία

Η υγρασία, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά της φλόγας. Με τον όρο υγρασία εννοείται η ποσότητα νερού που περιέχεται στην καύσιμη ύλη και εκφράζεται από το ενδόθερμο μέρος της ύλης με S_1 . Στην αγγλική βιβλιογραφία συναντάται και ως FMC (Fuel Moisture Content), δηλώνοντας το περιεχόμενο σε υγρασία, υπολογισμένο σε ξηρή βάση. Στο μοντέλο δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ της ποσότητας υγρασίας σε «νεκρή» ύλη και σε «ζωντανή» βλάστηση. Για την οικονομία, θα γίνεται αναφορά στην πρώτη περίπτωση (dead fuel moisture), χωρίς όμως να επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Στο υποκεφάλαιο αυτό μελετάται η επίδραση της υγρασίας στα προφίλ θερμοκρασιών και εξώθερμου μέρους της καύσιμης ύλης, καθώς και στην ταχύτητα διάδοσης της φλόγας. Στο τέλος, γίνεται προσπάθεια αντιστοίχισης των δεδομένων με συναρτήσεις που να περιγράφουν την εξάρτηση του ROS από την υγρασία.

Η υγρασία, όπως είναι ήδη γνωστό, λειτουργεί ως ανασταλτικός παράγοντας για την διάδοση της φλόγας. Αυτό οφείλεται στο ότι ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας της καύσης καταναλώνεται στην εξάτμιση της υγρασίας (ενδόθερμη αντίδραση), αντί να αξιοποιείται για την προανάφλεξη του καυσίμου. Μάλιστα, υπό ορισμένες περιπτώσεις όπου το περιεχόμενο σε υγρασία είναι αρκετά υψηλό η φλόγα σβήνει, καθώς όλη η διαθέσιμη ενέργεια καταναλώνεται στην εξάτμιση του νερού. Το περιεχόμενο σε υγρασία που οδηγεί σε σβήσιμο της φλόγας συναντάται συχνά στην βιβλιογραφία με τον όρο «dead fuel moisture of extinction». Για τους έντεκα τύπους καύσιμης ύλης στο μοντέλο του Rothermel [9], η ποσότητα που οδηγεί σε σβήσιμο της φλόγας είναι 30%. Αντίθετα, για τους 53 τύπους καυσίμου (standard fuels) που χρησιμοποιούνται έως και σήμερα η ποσότητα αυτή κυμαίνεται από 12% - 40%. Στο έργο των Scott και Burgan [11] παρουσιάζεται ο πίνακας με τους 53 τύπους καυσίμου και με τις αντίστοιχες τιμές του περιεχομένου σε υγρασία που οδηγεί σε σβήσιμο της φλόγας. Στον **Πίνακα 4.3.6.1** παρουσιάζονται οι τιμές αυτές. Η ποσότητα της υγρασίας που οδηγεί σε σβήσιμο της φλόγας είναι δεδομένη για συγκεκριμένο τύπο καυσίμου. Ωστόσο, μπορεί να επηρεάζεται έως έναν βαθμό από την ταχύτητα του ανέμου και από την κλίση του εδάφους. Τα αντικείμενα μελέτης αυτά εξετάζονται αναλυτικά παρακάτω.

Αρχικά, εξετάζεται η επίδραση της υγρασίας στα προφίλ ενδόθερμου και εξώθερμου μέρους για δεδομένη ταχύτητα ανέμου, κλίσης εδάφους και τιμή του «bulk density». Στο **Σχήμα 4.3.6.1** απεικονίζονται τα προφίλ θερμοκρασίας $T(x,t)$ και του εξώθερμου μέρους της καύσιμης ύλης $S_2(x,t)$ για τις περιπτώσεις FMC = 0%, 17,6% και 33,3%, αντίστοιχα. Οι τιμές της ταχύτητας του ανέμου, του «bulk density» και της κλίσης του εδάφους διατηρήθηκαν σταθερές για τρεις περιπτώσεις μεταβολής της υγρασίας. Οι ακριβείς τιμές είναι $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, $m_{s,0} = 1,4 \text{ Kg/m}^3$ και $\theta = 0^\circ$. Στην πρώτη γραμμή το καύσιμο είναι εντελώς ξηρό, δηλαδή η τιμή της υγρασίας είναι 0%, στην δεύτερη γραμμή η καύσιμη ύλη περιέχει ένα σημαντικό ποσό υγρασίας με τιμή 17,6% και στην τρίτη γραμμή η τιμή της υγρασίας είναι αρκετά μεγάλη με τιμή 33,3%. Παρατηρείται πως στην περίπτωση μηδενικής υγρασίας η έκταση του προφίλ θερμοκρασίας αυξάνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου (πρώτη γραμμή). Η έκταση του μετώπου, όταν υπάρχει αρκετή ποσότητα υγρασίας στο καύσιμο δεν αυξάνεται με τον ίδιο ρυθμό, καθώς η πυρκαγιά εξελίσσεται (δεύτερη γραμμή). *Επίσης, φαίνεται πως η έκταση του μετώπου για μια δεδομένη χρονική στιγμή να μειώνεται σημαντικά, όταν το περιεχόμενο σε υγρασία αυξάνεται.* Για παράδειγμα, το μέτωπο της

Πίνακας 4.3.6.1: Τιμές της υγρασίας που οδηγεί σε σβήσιμο της φλόγας για τους 53 τύπους μοντέλων.

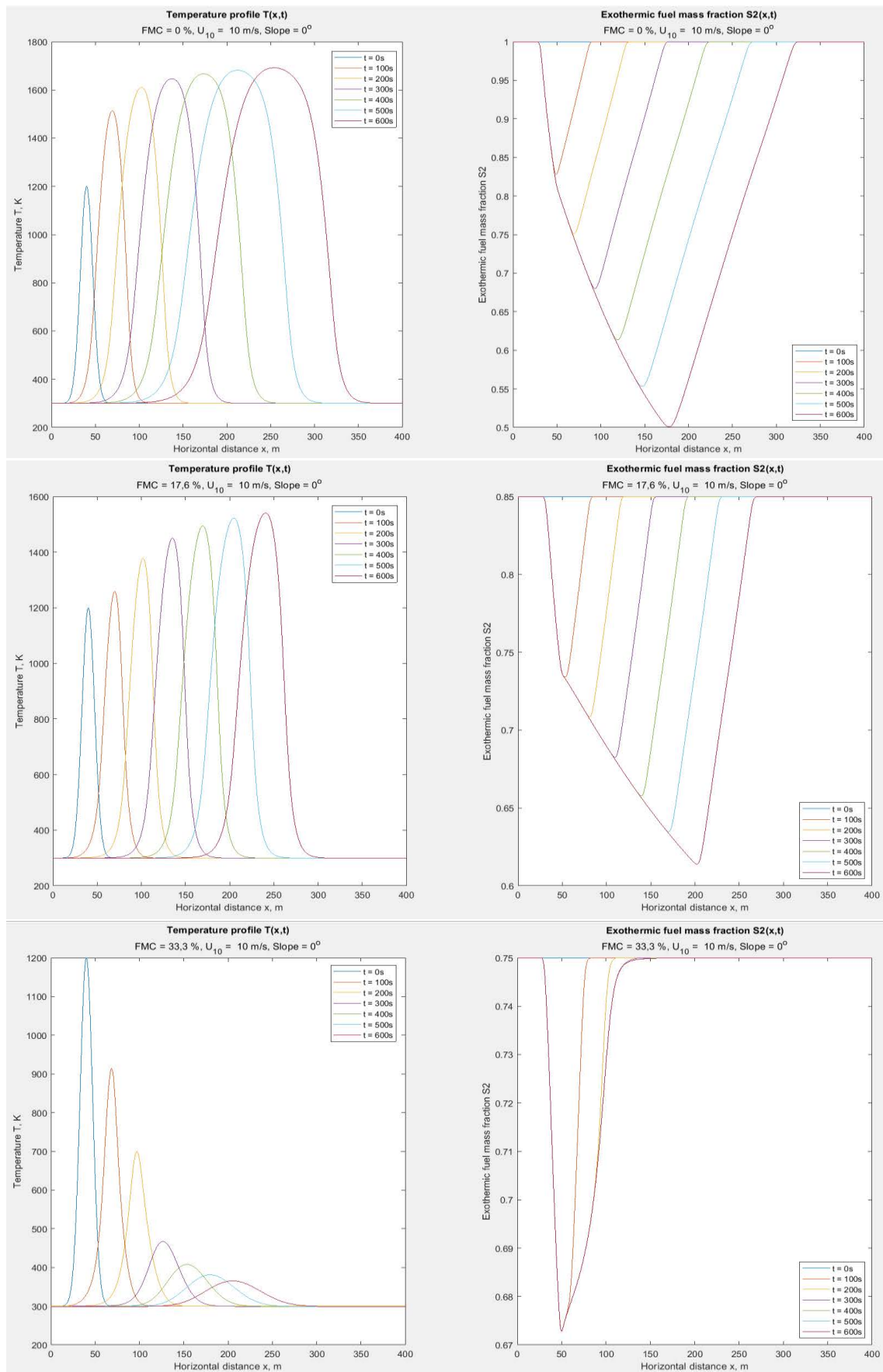
Fuel model code	Fuel load (t/ac)					Fuel model type ^a	SAV ratio (1/ft) ^b			Fuel bed depth (ft)	Dead fuel extinction moisture (percent)	Heat content BTU/lb) ^c
	1-hr	10-hr	100-hr	Live herb	Live woody		Dead	Live herb	Live woody			
GR1	0.10	0.00	0.00	0.30	0.00	dynamic	2200	2000	9999	0.4	15	8000
GR2	0.10	0.00	0.00	1.00	0.00	dynamic	2000	1800	9999	1.0	15	8000
GR3	0.10	0.40	0.00	1.50	0.00	dynamic	1500	1300	9999	2.0	30	8000
GR4	0.25	0.00	0.00	1.90	0.00	dynamic	2000	1800	9999	2.0	15	8000
GR5	0.40	0.00	0.00	2.50	0.00	dynamic	1800	1600	9999	1.5	40	8000
GR6	0.10	0.00	0.00	3.40	0.00	dynamic	2200	2000	9999	1.5	40	9000
GR7	1.00	0.00	0.00	5.40	0.00	dynamic	2000	1800	9999	3.0	15	8000
GR8	0.50	1.00	0.00	7.30	0.00	dynamic	1500	1300	9999	4.0	30	8000
GR9	1.00	1.00	0.00	9.00	0.00	dynamic	1800	1600	9999	5.0	40	8000
GS1	0.20	0.00	0.00	0.50	0.65	dynamic	2000	1800	1800	0.9	15	8000
GS2	0.50	0.50	0.00	0.60	1.00	dynamic	2000	1800	1800	1.5	15	8000
GS3	0.30	0.25	0.00	1.45	1.25	dynamic	1800	1600	1600	1.8	40	8000
GS4	1.90	0.30	0.10	3.40	7.10	dynamic	1800	1600	1600	2.1	40	8000
SH1	0.25	0.25	0.00	0.15	1.30	dynamic	2000	1800	1600	1.0	15	8000
SH2	1.35	2.40	0.75	0.00	3.85	N/A	2000	9999	1600	1.0	15	8000
SH3	0.45	3.00	0.00	0.00	6.20	N/A	1600	9999	1400	2.4	40	8000
SH4	0.85	1.15	0.20	0.00	2.55	N/A	2000	1800	1600	3.0	30	8000
SH5	3.60	2.10	0.00	0.00	2.90	N/A	750	9999	1600	6.0	15	8000
SH6	2.90	1.45	0.00	0.00	1.40	N/A	750	9999	1600	2.0	30	8000
SH7	3.50	5.30	2.20	0.00	3.40	N/A	750	9999	1600	6.0	15	8000
SH8	2.05	3.40	0.85	0.00	4.35	N/A	750	9999	1600	3.0	40	8000
SH9	4.50	2.45	0.00	1.55	7.00	dynamic	750	1800	1500	4.4	40	8000
TU1	0.20	0.90	1.50	0.20	0.90	dynamic	2000	1800	1600	0.6	20	8000
TU2	0.95	1.80	1.25	0.00	0.20	N/A	2000	9999	1600	1.0	30	8000
TU3	1.10	0.15	0.25	0.65	1.10	dynamic	1800	1600	1400	1.3	30	8000
TU4	4.50	0.00	0.00	0.00	2.00	N/A	2300	9999	2000	0.5	12	8000
TU5	4.00	4.00	3.00	0.00	3.00	N/A	1500	9999	750	1.0	25	8000
TL1	1.00	2.20	3.60	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.2	30	8000
TL2	1.40	2.30	2.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.2	25	8000
TL3	0.50	2.20	2.80	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.3	20	8000
TL4	0.50	1.50	4.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.4	25	8000
TL5	1.15	2.50	4.40	0.00	0.00	N/A	2000	9999	1600	0.6	25	8000
TL6	2.40	1.20	1.20	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.3	25	8000
TL7	0.30	1.40	8.10	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	0.4	25	8000
TL8	5.80	1.40	1.10	0.00	0.00	N/A	1800	9999	9999	0.3	35	8000
TL9	6.65	3.30	4.15	0.00	0.00	N/A	1800	9999	1600	0.6	35	8000
SB1	1.50	3.00	11.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.0	25	8000
SB2	4.50	4.25	4.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.0	25	8000
SB3	5.50	2.75	3.00	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	1.2	25	8000
SB4	5.25	3.50	5.25	0.00	0.00	N/A	2000	9999	9999	2.7	25	8000

Πηγή: Scott and Burgan (2005) [11]

φλόγας, στην περίπτωση μηδενικής υγρασίας, την χρονική στιγμή $t = 600$ s εκτείνεται περίπου από την θέση $x = 150$ m έως την θέση $x = 340$ m (περίπου 190 m έκταση). Από την άλλη, στην περίπτωση περιεχομένου υγρασίας 17,6%, για την ίδια χρονική στιγμή $t = 600$ s, το μέτωπο εκτείνεται περίπου από την θέση $x = 180$ m έως την θέση $x = 280$ m (περίπου 100 m έκταση). Τέλος, διαπιστώνεται πως όταν το περιεχόμενο σε υγρασία είναι $FMC = 33,3\%$, η πυρκαγιά σβήνει άμεσα. Αυτό ουσιαστικά σημαίνει πως είτε η τιμή $FMC = 33,3\%$ αποτελεί την τιμή «dead fuel moisture of extinction», είτε την ξεπερνά. Άρα, όταν το περιεχόμενο σε υγρασία ξεπερνά την τιμή «dead fuel moisture of extinction» η φωτιά σβήνει. Το παραπάνω συμπέρασμα μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά ως εξής:

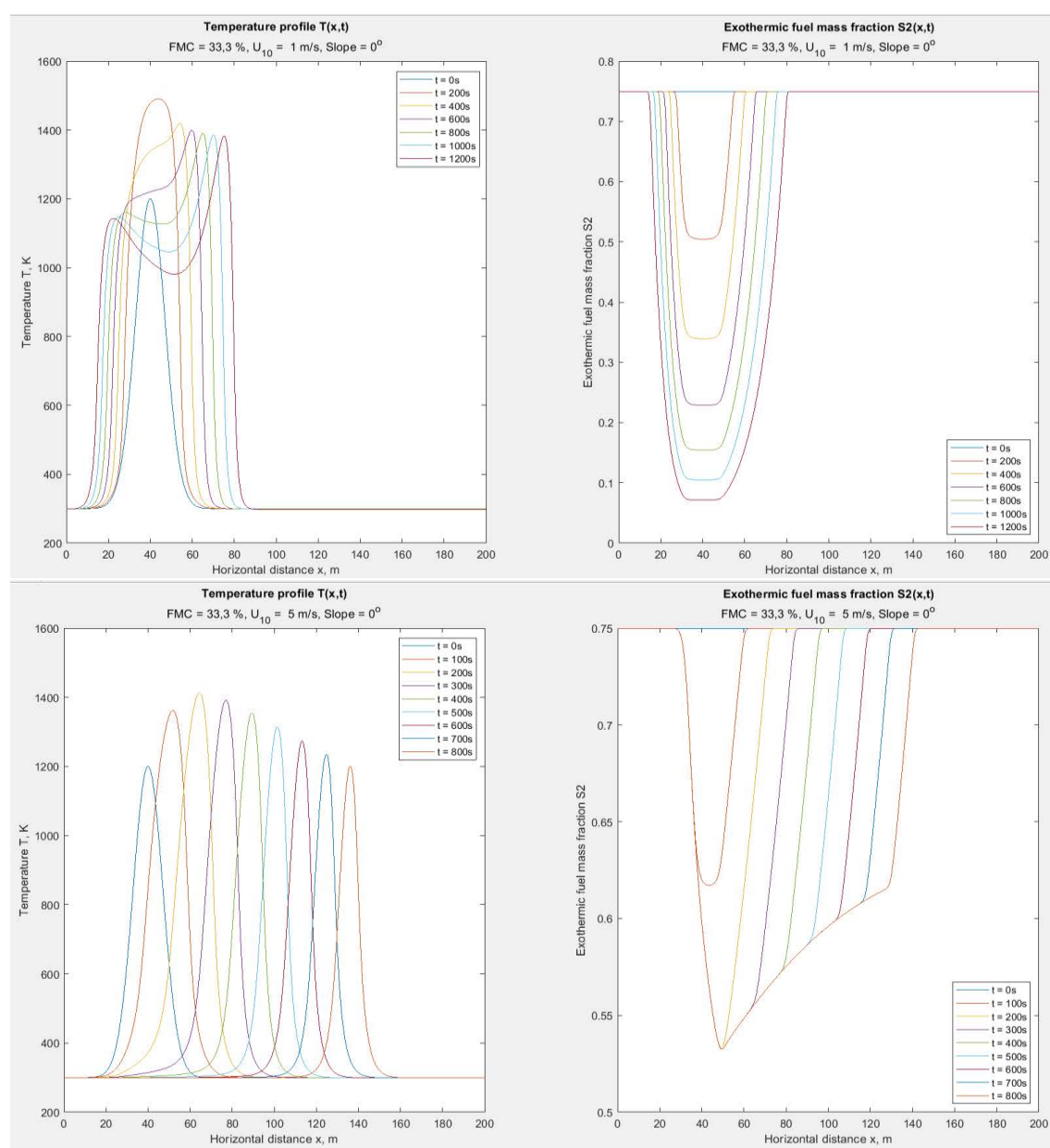
$$FMC \geq DFME \Rightarrow \text{η φλόγα σβήνει} \quad (4.8)$$

όπου με DFME συμβολίζεται η τιμή της «dead fuel moisture of extinction».



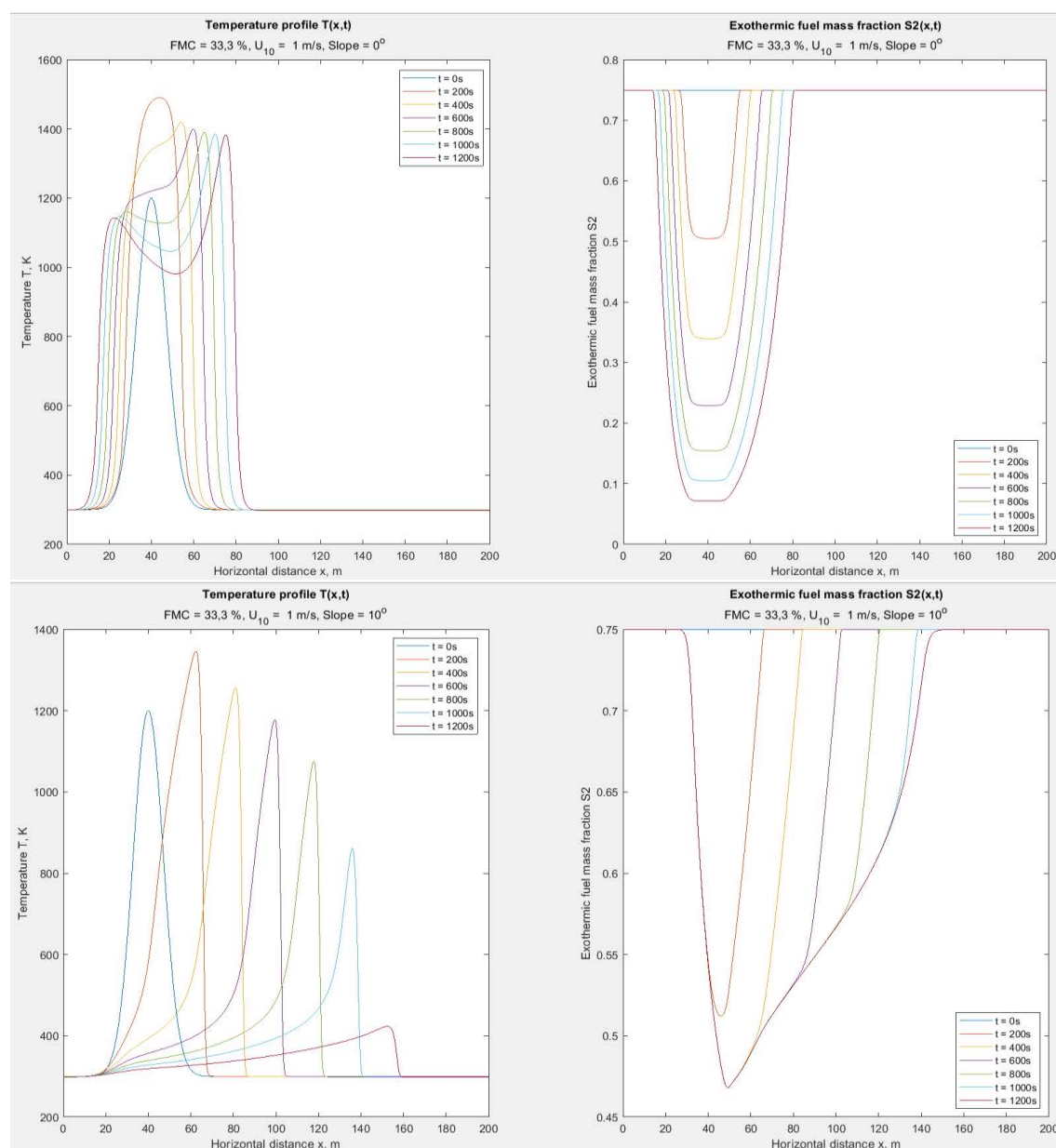
Σχήμα 4.3.6.1: Επίδραση της υγρασίας στην συμπεριφορά του μετώπου της φλόγας.

Δημιουργείται εύλογα η απορία εάν η τιμή DFME είναι σταθερή για δεδομένο τύπο καυσίμου ή μεταβάλλεται με τις συνθήκες. Γενικά, η τιμή αυτή παραμένει περίπου σταθερή για δεδομένο τύπο καυσίμου, αλλά παράγοντες όπως είναι η ταχύτητα του ανέμου και η κλίση του εδάφους επηρεάζουν την τιμή αυτή. Πρώτα εξετάζεται η επίδραση της ταχύτητας του ανέμου για δεδομένη τιμή της υγρασίας. Έστω η περίπτωση του οριζοντίου εδάφους και η ποσότητα της υγρασίας είναι σταθερή $FMC = 33,3\%$. Στο **Σχήμα 4.3.6.2** απεικονίζονται τα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου μέρους για τις περιπτώσεις ταχύτητας ανέμου $U_{10} = 1$ m/s και $U_{10} = 5$ m/s, αντίστοιχα. Παρατηρείται πως σε καμία από τις δύο περιπτώσεις η φλόγα δεν σβήνει. Αντίθετα, στην τρίτη περίπτωση του **Σχήματος 4.3.6.1**, όπου η τιμή της υγρασίας έχει την ίδια τιμή $FMC = 33,3\%$ η φλόγα σβήνει, καθώς η ταχύτητα του ανέμου είναι $U_{10} = 10$ m/s. Άρα εξάγεται το συμπέρασμα πως όταν αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, η τιμή DFME μειώνεται, διατηρώντας τις άλλες παραμέτρους σταθερές.



Σχήμα 4.3.6.2: Επίδραση της ταχύτητας ανέμου στην τιμή DFME.

Στην συνέχεια εξετάζεται η επίδραση της κλίσης του εδάφους στην τιμή DFME. Στο **Σχήμα 4.3.6.3** παρουσιάζονται τα προφίλ θερμοκρασίας και εξώθερμου μέρους για δεδομένη ταχύτητα ανέμου $U_{10} = 1$ m/s και τιμή της υγρασίας $FMC = 33,3\%$. Η πρώτη γραμμή πρόκειται για την περίπτωση του οριζοντίου εδάφους, όπου η φλόγα υπό αυτές τις συνθήκες δεν σβήνει. Αντίθετα στην δεύτερη γραμμή το έδαφος έχει μια κλίση 10° και η φλόγα φαίνεται να σβήνει σε αυτήν την τιμή της υγρασίας. *Συνεπώς, η κλίση του εδάφους οδηγεί σε μείωση της τιμής DFME, όταν διατηρούνται οι άλλες παράμετροι σταθερές.*



Σχήμα 4.3.6.3: Επίδραση της κλίσης του εδάφους στην τιμή DFME.

Μερικές από τις παρατηρήσεις συνοψίζονται ως εξής:

- Η έκταση του μετώπου αυξάνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου για χαμηλές τιμές της υγρασίας.
- Η έκταση του μετώπου μειώνεται με την αύξηση της ποσότητας υγρασίας.
- Όταν το περιεχόμενο σε υγρασία ξεπερνά την τιμή DFME η φωτιά σβήνει.
- Όταν αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου, η τιμή DFME μειώνεται, διατηρώντας τις άλλες παραμέτρους σταθερές.
- Η κλίση του εδάφους οδηγεί σε μείωση της τιμής DFME, όταν διατηρούνται οι άλλες παράμετροι σταθερές.

4.3.7 Εξάρτηση του ROS από την υγρασία

Στο σημείο αυτό μελετάται η εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσης της πυρκαγιάς από την ποσότητα υγρασίας που περιέχεται στην καύσιμη ύλη. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η υγρασία εμποδίζει την προανάφλεξη του καυσίμου, λόγω κατανάλωσης σημαντικής ποσότητας ενέργειας για την εξάτμιση του νερού. Συνεπώς, αναμένεται ο ROS να έχει πτωτική τάση με την αύξηση του περιεχομένου σε υγρασία. Μια σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση για την σχέση μεταξύ της ταχύτητας διάδοσης της φλόγας και του περιεχομένου σε υγρασία είναι αρκετά χρήσιμη. Στην βιβλιογραφία υποστηρίζεται σε μεγάλο βαθμό η εκθετική εξάρτηση του ROS από το περιεχόμενο σε υγρασία ([12], [13], [14], [15]). Παρά τις διαφορές μεταξύ των σχέσεων, σε όλες γίνεται σαφής η εκθετική μείωση του ROS. Η μαθηματική διατύπωση εκφράζεται ως εξής:

$$ROS \sim e^{-\mu(FMC)}, \mu \geq 0 \quad (4.9)$$

Μάλιστα σε πολλές περιπτώσεις εισάγεται και η ταχύτητα διάδοσης υπό μηδενική υγρασία ([13], [14], [15]), έτσι ώστε:

$$ROS \sim ROS(0\%) e^{-\mu(FMC)}, \mu \geq 0 \quad (4.10)$$

όπου $ROS(0\%)$ η ταχύτητα διάδοσης για μηδενική ποσότητα υγρασίας $FMC = 0\%$.

Ακολουθεί η αντιστοίχιση των δεδομένων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις για την εξάρτηση του ROS από την υγρασία. Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε είναι εκθετικής μορφής προκειμένου να ταιριάζει με την σχέση (4.9) της βιβλιογραφίας. Η ακριβής σχέση είναι η εξής:

$$y = ae^{-bx}, b \geq 0 \quad (4.11)$$

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για τιμές της ταχύτητας ανέμου $U_{10} = 1 \text{ m/s}$, 5 m/s , 10 m/s και 12 m/s για τις περιπτώσεις οριζοντίου εδάφους και κεκλιμένου εδάφους 10° . Η τιμή του «bulk density» διατηρήθηκε σταθερή $m_{s,0} = 1,4 \text{ Kg/m}^3$. Οι τιμές της υγρασίας που χρησιμοποιήθηκαν είναι αντίστοιχα $\text{FMC} = 0\%$, $5,3\%$, $11,1\%$, $17,6\%$, 25% , $33,3\%$ και $42,9\%$.

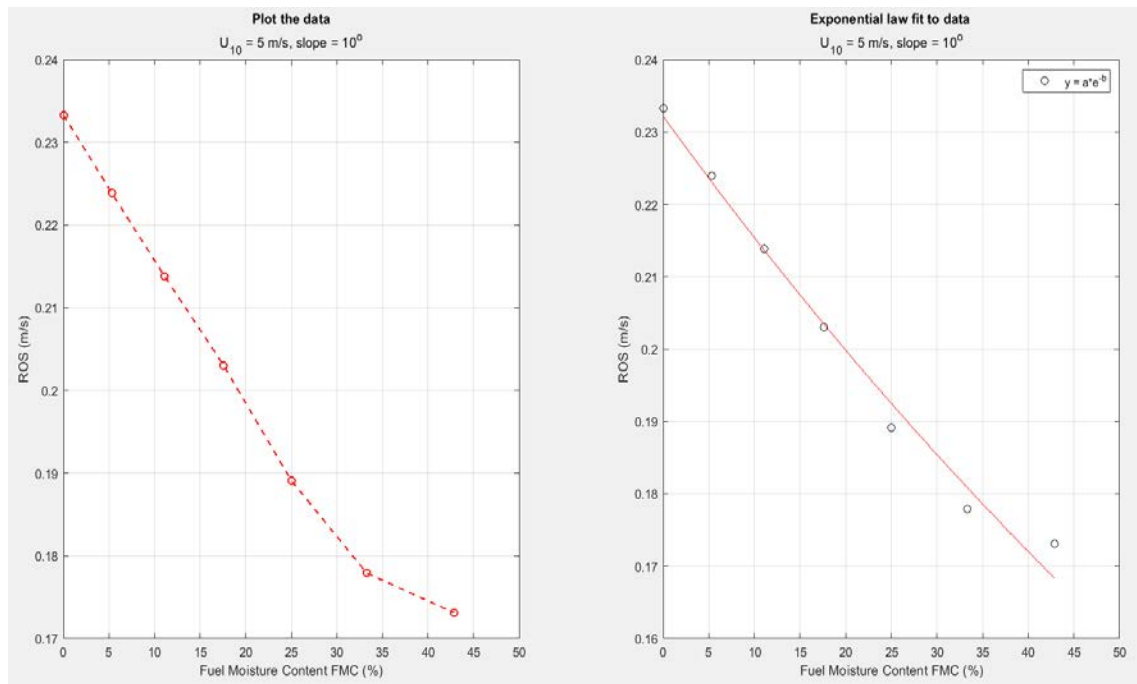
Στο **Σχήμα 4.3.7.1** απεικονίζεται η αντιστοίχιση των δεδομένων για την περίπτωση $U_{10} = 5 \text{ m/s}$ και κλίσης εδάφους 10° και στο **Σχήμα 4.3.7.2** γίνεται η αντιστοίχιση για την περίπτωση $U_{10} = 10 \text{ m/s}$ και μηδενικής κλίσης εδάφους. Στην αριστερή στήλη των σχημάτων παρουσιάζονται τα δεδομένα των προσομοιώσεων και στην δεξιά στήλη γίνεται η αντιστοίχιση των δεδομένων αυτών σύμφωνα με την εκθετική συνάρτηση της μορφής **(4.11)**. Παρατηρείται πως στην περίπτωση $U_{10} = 5 \text{ m/s}$ και κλίσης εδάφους 10° επιτυγχάνεται καλή αντιστοίχιση των δεδομένων. Αντίθετα, στην περίπτωση του οριζοντίου εδάφους και $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, η εξάρτηση του ROS από το FMC δεν εκφράζεται ικανοποιητικά με την εκθετική συνάρτηση.

Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις διαπιστώθηκε πως η αντιστοίχιση γενικά είναι ικανοποιητική για χαμηλές και μέτριες τιμές της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο, με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου τα δεδομένα δεν φαίνεται ακολουθούν την εκθετική συμπεριφορά και η ακρίβεια μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο ότι η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί σε μείωση της τιμής της DFME . Οπότε είναι λογικό σε υψηλές τιμές ταχυτήτων αέρα, να μην εμφανίζεται η εκθετική συμπεριφορά, ιδιαίτερα για τις τιμές της υγρασίας που ξεπερνούν την τιμή DFME . Για παράδειγμα, στο **Σχήμα 4.3.7.2** παρατηρείται μια ασυνήθιστη πτώση στην τιμή $\text{FMC} = 33,3\%$ σε αντίθεση με την συμπεριφορά του ROS για τις τιμές υγρασίας $\text{FMC} < 33,3\%$. Όμως, ανατρέχοντας στην τρίτη γραμμή του **Σχήματος 4.3.6.1** διαπιστώνεται πως στην τιμή της υγρασίας $\text{FMC} = 33,3\%$, η φλόγα σβήνει. Συμπερασματικά, η εκθετική εξάρτηση του ROS από το περιεχόμενο σε υγρασία FMC ισχύει για τιμές $\text{FMC} < \text{DFME}$.

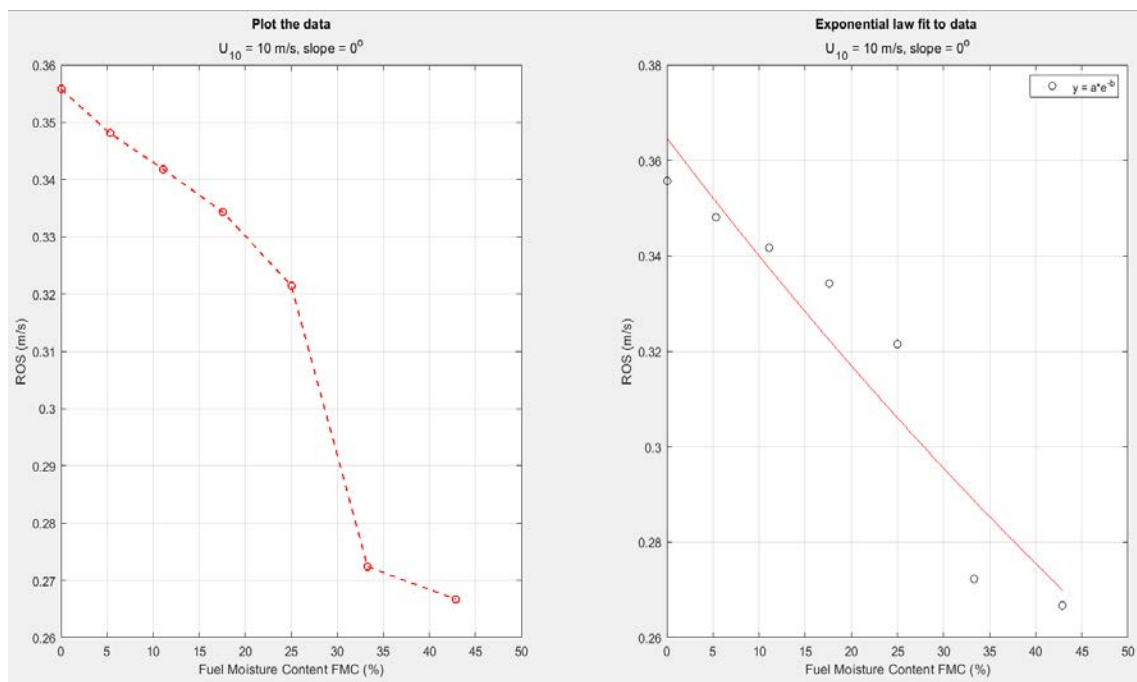
Στον **Πίνακα 4.3.7.1** παρουσιάζονται οι συντελεστές α , b της εκθετικής συνάρτησης **(4.11)** για όλες τις περιπτώσεις των προσομοιώσεων. Στην στήλη DFME καταγράφονται τα άνω όρια της τιμής της υγρασίας που η φλόγα σβήνει.

Πίνακας 4.3.7.1: Συντελεστές α , b για την μορφή $y = ae^{-bx}$

Κλίση εδάφους Ταχύτητα ανέμου	$\theta = 0^\circ$			$\theta = 10^\circ$		
	α	b	DFME	α	b	DFME
$U_{10} = 0 \text{ m/s}$	0,04033	0,009124	$> 42,9\%$	0,1186	0,007168	$\leq 33,3\%$
$U_{10} = 5 \text{ m/s}$	0,1491	0,00676	$\leq 42,9\%$	0,2322	0,007495	$\leq 33,3\%$
$U_{10} = 10 \text{ m/s}$	0,3647	0,007009	$\leq 33,3\%$	0,5401	0,008432	$\leq 33,3\%$
$U_{10} = 12 \text{ m/s}$	0,5319	0,009528	$\leq 33,3\%$	0,7057	0,008928	$\leq 33,3\%$



Σχήμα 4.3.7.1: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από την υγρασία FMC με εξίσωση της μορφής $y = a e^{-bx}$. $U_{10} = 5 \text{ m/s}$, $\theta = 10^\circ$.



Σχήμα 4.7.3.2: Αντιστοίχιση των δεδομένων για την εξάρτηση του ROS από την υγρασία με εξίσωση της μορφής $y = a e^{-bx}$. $U_{10} = 10 \text{ m/s}$, $\theta = 0^\circ$.

Στον **Πίνακα 4.3.7.2** καταγράφονται οι συντελεστές «α» των σχέσεων **(4.6)** και **(4.11)** για τις τιμές των ταχυτήτων και των κλίσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις. Για να μην υπάρχει σύγχυση, ως «α₁» συμβολίζεται ο συντελεστής «α» της σχέσης **(4.6)** και ως «α₂» συμβολίζεται ο συντελεστής «α» της σχέσης **(4.11)**. Η στήλη με το πορτοκαλί χρώμα περιλαμβάνει τους συντελεστές α₁, η μπλε στήλη περιλαμβάνει τους συντελεστές α₂ και η κίτρινη στήλη περιλαμβάνει τις τιμές του ROS για μηδενική υγρασία στην τιμή του «bulk density» m_{s,0} = 1,4 Kg/m³. Παρατηρείται πως οι τιμές των συντελεστών α₁, α₂ και ROS(0%) είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Γεννάται το ερώτημα για το εάν αυτό είναι τυχαίο ή εάν μπορεί να θεωρηθεί ότι οι τιμές αυτές θα είναι υπό όλες τις περιπτώσεις ίσες μεταξύ τους. Πριν απαντηθεί το ερώτημα να τονιστεί πως οι συντελεστές α₁ προέκυψαν για τιμή της υγρασίας FMC = 11,1% και οι συντελεστές α₂ προέκυψαν για τιμή τιμή του «bulk density» m_{s,0} = 1,4 Kg/m³. Από την σχέση **(4.6)** προκύπτει πως:

$$\alpha_1 = \text{ROS}(m_{s,0} = 1 \text{ Kg/m}^3) \quad (4.12)$$

και από την σχέση **(4.11)**:

$$\alpha_2 = \text{ROS}(FMC = 0\%) \quad (4.13)$$

επαληθεύοντας την σχέση **(4.10)**.

Συνεπώς, οι τιμές της μπλε και της κίτρινης στήλης θα είναι πάντα κοντά για όλες τις τιμές του «bulk density». Προκειμένου να είναι κοντά και με τις τιμές της πορτοκαλί στήλης θα πρέπει οι τιμές α₁ να έχουν υπολογιστεί για μηδενική ή χαμηλή τιμή της υγρασίας και οι τιμές α₂ να έχουν υπολογιστεί για τιμή του «bulk density» m_{s,0} → 1 Kg/m³. Συμπερασματικά, για τύπο καυσίμου με m_{s,0} → 1 Kg/m³ με μηδενική ή αρκετά χαμηλή τιμή της υγρασίας FMC ≤ 11,1%, οι τιμές α₁ και α₂ συγκλίνουν. Τέλος, για την εξάρτηση των συντελεστών ισχύουν:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= f(U_{10}, \theta, FMC) \\ \alpha_2 &= f(U_{10}, \theta, m_{s,0}) \end{aligned} \quad (4.14)$$

Πίνακας 4.3.7.2: Ομοιότητα των συντελεστών

Κλίση εδάφους Ταχύτητα ανέμου	$\theta = 0^\circ$			$\theta = 10^\circ$		
	α_1	α_2	ROS(0%)	α_1	α_2	ROS(0%)
$U_{10} = 0 \text{ m/s}$	0,03527	0,04033	0,0409	0,1137	0,1186	0,1174
$U_{10} = 5 \text{ m/s}$	0,1504	0,1491	0,01504	0,2322	0,2322	0,2333
$U_{10} = 10 \text{ m/s}$	0,3799	0,3647	0,3558	0,5337	0,5401	0,5347
$U_{10} = 12 \text{ m/s}$	0,5116	0,5319	0,5254	0,6999	0,7057	0,6962

Κεφάλαιο 5. ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ – ΒΕΛΤΙΩΣΕΙΣ

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται συγκεντρωτικά οι σημαντικότερες παραδοχές του μοντέλου για την πρόβλεψη των δασικών πυρκαγιών. Προτείνονται ακόμη κάποιες μελλοντικές βελτιώσεις προκειμένου να επιτευχθεί ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια για την πρόβλεψη της διάδοσης δασικής πυρκαγιάς.

- Για την κατάσταση του ισοζυγίου ενέργειας θεωρήθηκε η υπόθεση της τοπικής ισορροπίας, δηλαδή η θερμοκρασία της στερεής και της αέριας φάσης είναι ίσες.
- Η εξίσωση για το ισοζύγιο μάζας προέκυψε από την θεώρηση ενός κλειστού συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην λαμβάνεται υπόψιν η εισροή παροχής οξυγόνου από τον αέρα.
- Δεν γίνεται διάκριση μεταξύ του περιεχομένου σε υγρασία σε «νεκρή» και σε «ζωντανή» βλάστηση. Δίνεται η δυνατότητα να ενταχθεί η διαφοροποίηση του όρου «dead fuel moisture» και του όρου «live fuel moisture» στο κώδικα του μοντέλου.
- Δεν λαμβάνεται υπόψιν ένα αρκετά σημαντικό μέγεθος που εκφράζει την επιφάνεια της καύσιμης ύλης προς τον όγκο της ($[=] \frac{m^2}{m^3}$). Μεγαλύτερες τιμές του λόγου συναντάται σε καύσιμη ύλη όπως είναι τα φύλλα και τα κλαδιά, ενώ μικρότερες τιμές σε καύσιμη ύλη με που έχει μεγάλη διάμετρο (κορμοί δέντρων). Γενικά όσο αυξάνεται ο λόγος αυτός η φλόγα διαδίδεται πιο γρήγορα [6].
- Στον υπολογισμό της έντασης της φλόγας υπολογίζεται η μέγιστη ποσότητα καύσιμης ύλης που έχει καεί σε δεδομένη χρονική στιγμή. Η συνθήκη που χρησιμοποιείται είναι η $\min(S_2)$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, στις περιπτώσεις που η ποσότητα S_2 αρχίζει να αυξάνεται με τον χρόνο, λόγω της συνθήκης, για τις επόμενες χρονικές στιγμές να λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή που έχει υπολογιστεί γενικά. Συνεπώς, γίνεται μια μικρή υπερεκτίμηση της έντασης της φλόγας.
- Η καύση προσομοιώνεται ότι αποτελείται από μια ενδόθερμη αντίδραση (εξάτμιση υγρασίας) και μια εξώθερμη (κατανάλωση στερεής φάσης). Οι ρυθμοί εξάτμισης και κατανάλωσης ακολουθούν κινητική νόμου Arrhenius. Προτείνεται να μελετηθεί η σταθερότητα των συντελεστών c_{s1} , b_1 , c_{s2} , b_2 ως προς τις περιβαλλοντικές συνθήκες και ιδιαίτερα ως προς την διαφοροποίηση της υγρασίας σε «νεκρή» οργανική ύλη και σε «ζωντανή» βλάστηση.
- Μια επιπλέον βελτίωση αποτελεί η μελέτη της επίδρασης της σχετικής υγρασίας του αέρα στην διάδοση της φλόγας και του τρόπου με τον οποίο μπορεί να ενσωματωθεί στο μοντέλο.
- Η έναρξη της φλόγας προσομοιώνεται με κανονική κατανομή της μορφής **(2.39)**. Θα μπορούσε να μελετηθεί η επίδραση στην εξέλιξη της φλόγας αν μεταβληθούν οι σταθερές της σχέσης.
- Στο μοντέλο δεν έχει ληφθεί υπόψιν ο αδιάστατος αριθμός Byram N_c που καθορίζει εάν η φλόγα καθοδηγείται κυρίως από τον άνεμο ή την άνωση των καυσαερίων. Στην περίπτωση που καθοδηγείται από τον άνεμο, η φλόγα κλίνει προς το έδαφος και η μεταφορά θερμότητας γίνεται κυρίως

μέσω συναγωγής. Αντίθετα, όταν η φλόγα καθοδηγείται από την άνωση του καπνού, η φλόγα είναι πιο κάθετη στο έδαφος και η μεταφορά θερμότητας γίνεται κυρίως μέσω ακτινοβολίας. Προτείνεται η ένταξη του αδιάστατου αριθμού N_c στο μοντέλο και η μελέτη για το πως επηρεάζεται από την κλίση του εδάφους.

- Για την αναπαράσταση του τοπικού φαινομένου της ανωστικής ταχύτητας των καυσαερίων γίνεται χρήση της εξίσωσης **(3.28)**, έτσι ώστε η διακύμανσή της να είναι ανάλογη με την διαφορά της τοπικής θερμοκρασίας από την μέγιστη θερμοκρασία που εμφανίζεται μια δεδομένη χρονική στιγμή.
- Γίνεται παρότρυνση για την σύγκριση των αποτελεσμάτων του παρόντος μοντέλου με το μοντέλο του Rothermel για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων.
- Επόμενο στάδιο του μοντέλου αποτελεί η επέκταση του κώδικα, που αφορά την κλίση του εδάφους, στο δισδιάστατο πρόβλημα διάδοσης της πυρκαγιάς.
- Η περίπτωση της μελέτης του κατηφορικού εδάφους παρουσίασε αρκετά μεγαλύτερους χρόνους εκτέλεσης του κώδικα από ότι του ανηφορικού εδάφους. Προτείνεται εκτενέστερη μελέτη για την περίπτωση της κατηφόρας, καθώς μπορεί να υπεισέρχονται παράμετροι που δεν έχουν ληφθεί υπόψιν.

Κεφάλαιο 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διατυπώνονται τα σημαντικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν μέσω των προσομοιώσεων του μοντέλου. Διατυπώνονται τόσο γενικά, όσο και πιο ειδικά συμπεράσματα για την συμπεριφορά της φλόγας και την επίδραση των παραμέτρων στην εξέλιξή της.

- Η κλίση του εδάφους αποτελεί σημαντική παράμετρο για την ταχύτητα διάδοσης της φλόγας. Η ανηφόρα οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές ταχύτητας διάδοσης, ενώ η κατηφόρα οδηγεί σε μικρότερες τιμές. Συνεπώς, η αύξηση της κλίσης του εδάφους αυξάνει τον ρυθμό διάδοσης της πυρκαγιάς.
- Η μοντελοποίηση της συνεισφοράς της κλίσης γίνεται με την χρήση της ισοδύναμης ταχύτητας ανέμου. Η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου ενσωματώνει την κοινή συνεισφορά της ταχύτητας του ανέμου και της κλίσης του εδάφους.
- Η επίδραση της κλίσης λαμβάνεται υπόψιν μέσω της ανωστικής ταχύτητας των θερμών καυσαερίων.
- Στην μονοδιάστατη προσέγγιση η ισοδύναμη ταχύτητα ανέμου απλοποιείται στην σχέση **(3.10)**. Στην σχέση αυτή δεν εμφανίζεται ο όρος της κοινής συνεισφοράς της ταχύτητας ανέμου και της κλίσης, όπως εμφανίζεται στην αναλυτική σχέση **(3.9)**. Η διάδοση πραγματοποιείται στην κατεύθυνση της ανηφόρας.
- Στην περίπτωση της μηδενικής ταχύτητας ανέμου, η ισοδύναμη ταχύτητα αποκτά την απλή μορφή της σχέσης **(3.12)**. Η διάδοση της φλόγας οφείλεται μόνο στην ανωστική ταχύτητα των καυσαερίων και πραγματοποιείται στην κατεύθυνση της ανηφόρας.
- Στην περίπτωση του οριζοντίου εδάφους η ισοδύναμη ταχύτητα είναι ίση με την ταχύτητα του ανέμου και η διάδοση πραγματοποιείται στην κατεύθυνση που φυσάει ο άνεμος.
- Στην μονοδιάστατη προσέγγιση της κατηφόρας η ταχύτητα του ανέμου έχει αντίθετη φορά από την προβολή της ταχύτητας των καυσαερίων, γεγονός που προκαλεί την επιβράδυνσή της.
- Η χρονική διακύμανση του ROS ακολουθεί την συμπεριφορά του προφίλ θερμοκρασίας. Αύξηση στις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες επιφέρει γενικά αύξηση της ταχύτητας διάδοσης, ενώ η μείωση των τιμών επιφέρει μείωση της ταχύτητας.
- Το πρώτο σύντομο χρονικό διάστημα παρατηρείται αύξηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών και στην συνέχεια σταθεροποίηση του προφίλ θερμοκρασίας. Αυτό συνεπάγεται στην αρχή να εμφανίζεται συνεχής αύξηση της ταχύτητας διάδοσης και στην συνέχεια να σταθεροποιείται.
- Αύξηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών γενικά οδηγεί σε αύξηση της ποσότητας της ύλης που καίγεται (μείωση S_2) και αντίστοιχα πτώση των θερμοκρασιών οδηγεί σε μείωση της ποσότητας ύλης που καίγεται (αύξηση S_2).
- Το προφίλ του εξώθερμου κλάσματος $S_2(x,t)$ ακολουθεί γενικά την συμπεριφορά του προφίλ θερμοκρασίας $T(x,t)$.
- Οι δύο τρόποι εκτίμησης του ROS συγκλίνουν γρήγορα σε μια τιμή.

- Γενικά ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού του ROS είναι καλύτερος και να προτιμάται έναντι του πρώτου. Ιδίως σε περιπτώσεις γρήγορης διάδοσης με $x_a < 3$ και σε περιπτώσεις πολύ αργής διάδοσης, όπως είναι η κατηφόρα και οι περιπτώσεις μεγάλης τιμής του «bulk density», ο πρώτος τρόπος στερείται ακρίβεια.
- Στην περίπτωση οριζοντίου εδάφους και μηδενικής ταχύτητας ανέμου τα προφίλ θερμοκρασίας $T(x,t)$ και εξώθερμου κλάσματος μάζας $S_2(x,t)$ είναι συμμετρικά και η φλόγα διαδίδεται ως προς τις δύο κατευθύνσεις.
- Η ύπαρξη κλίσης οδηγεί σε αύξηση των αναπτυσσόμενων θερμοκρασιών, όταν η ταχύτητα ανέμου διατηρείται σταθερή. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο για μικρές τιμές ταχύτητας ανέμου.
- Η κλίση του εδάφους γενικά επιταχύνει την σταθεροποίηση του μετώπου της φλόγας για τις περιπτώσεις μη μηδενικής ταχύτητας ανέμου. Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά έντονο στις υψηλές ταχύτητες ανέμου.
- Αύξηση της ταχύτητας ανέμου συνεπάγεται αύξηση της ταχύτητας διάδοσης της φλόγας.
- Στην περίπτωση χαμηλών ταχυτήτων, αύξηση της ταχύτητας του αέρα οδηγεί σε μείωση της ποσότητας ύλης που καίγεται (αύξηση S_2).
- Για ένα εύρος τιμών $U_{10} \geq 4$ m/s, με την αύξηση της ταχύτητας του αέρα αναπτύσσονται μεγαλύτερες θερμοκρασίες.
- Γενικότερα αύξηση της ταχύτητας ανέμου οδηγεί σε ταχύτερη σταθεροποίηση του μετώπου της φλόγας.
- Η εξάρτηση του ROS από την ταχύτητα του ανέμου U_{10} φαίνεται να έχει παραβολική συμπεριφορά **(4.1)**.
- Ο σταθερός όρος του πολυωνύμου δευτέρου βαθμού για την εξάρτηση του ROS την ταχύτητα U_{10} , αναπαριστά την ταχύτητα διάδοσης για μηδενική ταχύτητα ανέμου, υπό δεδομένη κλίση εδάφους.
- Ο συντελεστής φ της σχέσης **(4.1)** εξαρτάται από τις ιδιότητες της ύλης και έχει μικρή πτωτική τάση με την αύξηση της κλίσης.
- Αρκετά μεγάλες τιμές του «bulk density», υπό δεδομένες συνθήκες, οδηγούν σε σβήσιμο της φλόγας μετά από ένα χρονικό διάστημα.
- Μεγάλες τιμές του «bulk density» περιορίζουν την διάδοση της φλόγας. Παρατηρείται αύξηση των θερμοκρασιών στην περιοχή κοντά στο σημείο έναρξης της φλόγας.
- Με την αύξηση της ταχύτητας ανέμου U_{10} , η φλόγα εξασθενεί για μικρότερες τιμές του «bulk density».
- Η εξάρτηση του ROS από το «bulk density» έχει υπερβολική συμπεριφορά **(4.4)**.
- Ο εκθέτης ζ της σχέσης **(4.4)** είναι αυξανόμενος με την ταχύτητα ανέμου. Επίσης, φαίνεται να παρουσιάζει μια μικρή αύξηση με την κλίση του εδάφους.
- Όταν η τιμή του περιεχομένου σε υγρασία ξεπεράσει μια κρίσιμη τιμή ($FMC \geq DFME$) η φλόγα σβήνει ταχύτατα.
- Η έκταση του μετώπου φλόγας μειώνεται με την αύξηση του περιεχομένου σε υγρασία.
- Αύξηση της ταχύτητας ανέμου οδηγεί σε μείωση της τιμής DFME, όταν οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.
- Αύξηση της κλίσης εδάφους οδηγεί σε μείωση της τιμής DFME, όταν οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρούνται σταθερές.
- Η εξάρτηση του ROS από την υγρασία έχει εκθετική συμπεριφορά **(4.9)**.

Κεφάλαιο 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Wikipedia, 2018 Attica wildfires,[ανακτήθηκε 02/12/2024, https://en.wikipedia.org/wiki/2018_Attica_wildfires#cite_note-fireservice.gr-2].
- [2] Matthew W. Jones et al. (2024). State of Wildfires 2023–2024. *Earth System Science Data*,
[<https://essd.copernicus.org/articles/16/3601/2024/>, ανακτήθηκε 02/12/2024].
- [3] F. Di Giuseppe, J. McNorton, M. Parrington & A. Lombardi, (2024), State of wildfires 2023–24. *ECMWF Newsletter* 181,
[<https://www.ecmwf.int/en/newsletter/181/news/state-wildfires-2023-24>, ανακτήθηκε 03/12/2024].
- [4] R. M. Nelson, An effective wind speed for models of fire spread, *International Journal of Wildland Fire* 11 (2002) 153–161.
- [5] K. Vogiatzoglou, C. Papadimitriou, K. Ampountolas, M. Chatzimanolakis, P. Koumoutsakos, V. Bontozoglou, (2024), An interpretable wildfire spreading model for real-time predictions, *Journal of Computational Science*.
- [6] P. L. Andrews, The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation, General Technical Report RMRS-GTR-371, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO (2018).
- [7] E. Inoue, On the turbulent structure of air flow within crop canopies, *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II* 41 (6) (1963) 317–326.
- [8] G. M. Byram, Combustion of forest fuels. In *Forest Fire: Control and Use*, K. P. Davis (Ed.), McGraw-Hill: New York, 1959, pp. 77–88.
- [9] R. C. Rothermel, A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, Gen. Tech. Rep. INT-115, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT (1972).
- [10] F. Albini, Computer-based models of wildland fire behavior: A user's manual, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT (1976a) 68.
- [11] J. Scott, R. Burgan, Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model, General Technical Report RMRS-GTR-153, USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station (2005) 18.
- [12] E. Marino, J.-L. Dupuy, F. Pimont, M. Guijarro, C. Hernando, R. Linn, Fuel bulk density and fuel moisture content effects on fire rate of spread: a comparison between FIRETEC model predictions and experimental results in shrub fuels, *Journal of Fire Science* (2012) 8-9.
- [13] D. Morvan, S. Meradji, G. Accary, Physical modelling of fire spread in Grasslands, *Fire Safe. J.* 44 (2009) 58–59.
- [14] N.P. Cheney, J.S. Gould, Fire growth in grassland fuels, *Int. J. Wildland Fire* 5 (4) (1995) 237–247.
- [15] J.B. Marsden-Smedley, W.R. Catchpole, Fire behaviour modelling in Tasmanian buttongrass moorlands: II fire behaviour, *Int. J. Wildland Fire* 5 (4) (1995) 215–228.