



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Π.Μ.Σ. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ**

**Μεταπτυχιακή Εργασία**

**«Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην εξάπλωση δασικών πυρκαγιών. Μελέτη περιπτώσεων σε ορεινή περιοχή του νομού Χανίων.**

**«Impacts of climate change on the spread of wild fires. Case study in a mountainous region of the prefecture of Chania.»**

**Ευτύχιος Βαρδουλάκης**

**AM: 2021057565**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βουλγαράκης Απόστολος**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Δρ. Βουλγαράκης Απόστολος**

**Δρ. Κουτρούλης Αριστείδης**

**Δρ. Γρυλλάκης Εμμανουήλ**

**Χανιά, 2024**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη διερεύνηση του πώς η κλιματική κρίση επηρεάζει τη συχνότητα και την ένταση των δασικών πυρκαγιών. Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα FLAMMAP, προσομοιώθηκαν οι πυρκαγιές στις περιοχές "Σκλαβοπούλα" και "Κακοδίκι" με βάση τα υπάρχοντα μετεωρολογικά δεδομένα και τη διαχείριση της καύσιμης ύλης, καθώς και υπό διαφορετικά σενάρια αύξησης της θερμοκρασίας. Στόχος ήταν να αποτυπωθεί η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στην εξάπλωση των πυρκαγιών, ειδικότερα στις περιοχές αυτές, οι οποίες είναι ευάλωτες λόγω της τοπογραφίας και των ιδιαίτερων μετεωρολογικών συνθηκών.

Η μεθοδολογία της εργασίας περιλαμβάνει την ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών, όπως η θερμοκρασία, ο άνεμος και η περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης. Επιπλέον, εξετάζονται τα κλιματικά σενάρια SSP245 και SSP370 από την έκθεση IPCC AR6-WGI, τα οποία αντιπροσωπεύουν διαφορετικές πιθανές πορείες της κλιματικής αλλαγής. Μέσω των προσομοιώσεων, καταγράφηκαν οι αλλαγές στην καμένη έκταση υπό τις συνθήκες των σεναρίων αυτών και συγκρίθηκαν με τα πραγματικά δεδομένα από δορυφορικές παρατηρήσεις (Sentinel).

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε σημαντική αύξηση της καμένης έκτασης, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη για καλύτερη διαχείριση των δασικών περιοχών και την ενσωμάτωση σύγχρονων τεχνολογιών και εργαλείων προσομοίωσης από το πυροσβεστικό σώμα. Οι διαφορές μεταξύ των προσομοιώσεων και των πραγματικών δεδομένων αναδεικνύουν επίσης την ανάγκη για ακριβέστερα μετεωρολογικά στοιχεία και τη σημασία της προσαρμογής στις τοπικές συνθήκες.

Η εργασία αναδεικνύει τη σοβαρότητα της κατάστασης και την επιτακτική ανάγκη υιοθέτησης μέτρων μετριασμού και προσαρμογής τόσο από το κράτος όσο και από την κοινωνία των πολιτών. Οι σύγχρονες προκλήσεις που θέτει η κλιματική κρίση απαιτούν συντονισμένη δράση, καλύτερη προετοιμασία και χρήση προηγμένων τεχνολογιών για την προστασία των δασικών οικοσυστημάτων και των ανθρώπινων κοινοτήτων.

## **ABSTRACT**

This paper focuses on investigating how the climate crisis affects the frequency and intensity of forest fires. Using the FLAMMAP program, fires were simulated in the "Sklavopoula" and "Kakodiki" areas based on existing meteorological data and fuel management, as well as under different temperature increase scenarios. The aim was to capture the effect of climate change on the spread of fires, especially in these areas, which are vulnerable due to the topography and special weather conditions.

The methodology of the work includes the analysis of the parameters that influence the behavior of forest fires, such as temperature, wind and the moisture content of the fuel. In addition, climate scenarios SSP245 and SSP370 from the IPCC AR6-WGI report are considered, which represent different possible trajectories of climate change. Through the simulations, the changes in the burned area under the conditions of these scenarios were recorded and compared with the actual data from satellite observations (Sentinel).

The results show that warming leads to a significant increase in burned area, which highlights the need for better management of forest areas and the incorporation of modern technologies and simulation tools by the fire service. Differences between simulations and real data also highlight the need for more accurate meteorological data and the importance of adaptation to local conditions.

The work highlights the seriousness of the situation and the urgent need for mitigation and adaptation measures to be adopted by both the state and civil society. The contemporary challenges posed by the climate crisis require concerted action, better preparedness and the use of advanced technologies to protect forest ecosystems and human communities.

***Αφιέρωση.***

***Στην κόρη μου Αργυρώ και  
στην γυναίκα μου Ευαγγελία.***

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΕΙΕΣ**

Στο σημείο αυτό αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις ειλικρινείς και θερμές ευχαριστίες μου στους Δρ. Βουλγαράκη Απόστολο και Δρ. Γρυλάκη Εμμανουήλ για τη συνεχή καθοδήγηση, την αμέριστη υποστήριξη, τις ουσιώδεις συμβουλές, καθώς επίσης και την αδιάκοπη συμπαράσταση και ενθάρρυνση που μου παρείχαν σε όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τα αγαπημένα μου πρόσωπα, την γυναίκα μου Ευαγγελία, τους γονείς μου Γιώργο και Αργυρώ και τον αδερφό μου Ανδρέα, που αποδέχθηκαν όλες τις επιλογές μου και μου παρείχαν στήριξη όλο αυτό το διάστημα, χωρίς την οποία τίποτα από όσα έχω καταφέρει μέχρι σήμερα δε θα ήταν πραγματικότητα.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ABSTRACT .....	2
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1. Εισαγωγικές έννοιες.....	1
1.1 Το φαινόμενο της καύσης και της πυρκαγιάς.....	1
1.2 Οι δασικές πυρκαγιές.....	1
1.3 Αυξητική τάση των συμβάντων στη χώρα μας .....	2
1.4 Το ζήτημα των δασικών πυρκαγιών .....	4
2. Στοιχεία δασικών πυρκαγιών .....	7
2.1 Κατηγορίες δασικών πυρκαγιών.....	7
2.1.1 Κατηγορίες με βάση τον τρόπο εξάπλωσης.....	7
2.1.2 Κατηγορίες με βάση τον τρόπο πρόκλησης .....	8
2.1.3 Κατηγορίες με βάση το μέγεθος των δασικών πυρκαγιών.....	10
2.1.4 Πυρκαγιές μεικτής ζώνης (Wildland – Urban Fires, WUI) .....	11
2.2 Χαρακτηριστικά επιφανειακών (έρπουσων) πυρκαγιών .....	12
2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν μία δασική πυρκαγιά .....	14
2.3.1 Άνεμος.....	15
2.3.2 Θερμοκρασία .....	17
2.3.3 Υγρασία .....	19
2.3.4 Τοπογραφία .....	20
2.3.5 Καύσιμη ύλη.....	22
2.3.6 Ατμοσφαιρική κατάσταση.....	24
2.3.7 Κλιματική αλλαγή .....	27
2.4 Ποσοτικές παράμετροι συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών.....	27
2.4.1 Θερμική ένταση πυρκαγιάς .....	28

2.4.2	Μήκος – ύψος φλόγας .....	29
2.4.3	Ταχύτητα εξάπλωσης πυρκαγιάς.....	30
2.5	Υγρασία καύσιμης ύλης.....	31
2.5.1	Σχετική υγρασία και περιβαλλοντική θερμοκρασία.....	35
2.5.2	Σχετικά υγρασία και άνεμος.....	36
2.5.3	Σχετική υγρασία και τοπογραφία .....	36
2.6	Χρονική υστέρηση υγρασίας.....	39
2.7	Περιεχόμενη υγρασία και ρυθμός διάδοσης πυρκαγιάς .....	40
3.	Η επιρροή της κλιματικής αλλαγής στις δασικές πυρκαγιές .....	42
3.1	Η έννοια της κλιματικής αλλαγής.....	42
3.2	Η κλιματική αλλαγή στην σύγχρονη κοινωνική πραγματικότητα.....	43
3.3	Κλιματική αλλαγή και δασικές πυρκαγιές.....	47
3.4	Μελέτης της εξέλιξης και των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής .....	49
3.5	Κλιματικά σενάρια IPCC AR6-WGI.....	50
3.5.1	Το σενάριο SSP245 .....	51
3.5.2	Το σενάριο SSP370 .....	52
4.	Μεθοδολογία και υπολογιστική προσέγγιση μελέτης περιπτώσεων .....	55
4.1	Επιλογή περιοχής μελέτης .....	55
4.2	Χαρακτηριστικά της περιοχής των Χανίων.....	56
4.2.1	Οι δασικές πυρκαγιές .....	57
4.3	Το πρόγραμμα FlamMap .....	60
4.3.1	Μοντέλα εξάπλωσης πυρκαγιάς.....	62
4.3.2	Το υπο-πρόγραμμα FARSITE.....	64
4.3.3	Παράμετροι του προγράμματος FLAMMAP.....	65
4.4	Μοντέλα βλάστησης.....	66
4.5	Δεδομένα για τις προσομοιώσεις.....	68
5.	Μελέτη περιπτώσεων.....	70

5.1	Οι πυρκαγιές που επιλέχθηκαν.....	70
5.2	Πιθανοί παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα .....	70
5.3	Παρουσίαση αποτελεσμάτων .....	72
5.3.1	Πυρκαγιά στην θέση «Σκλαβοπούλα» .....	72
5.3.2	Πυρκαγιά στην θέση «Κακοδίκι».....	73
5.3.3	Επιλογή μετεωρολογικών δεδομένων .....	74
5.3.4	Δεδομένα καύσιμης ύλης .....	78
5.3.5	Σύγκριση βασικής προσομοίωσης με τα πραγματικά αποτελέσματα .....	82
5.3.6	Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τις παραμέτρους των σεναρίων SSP245 και SSP370.....	86
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....		92
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....		95
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....		96
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		97



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μια από τις πιο καταστροφικές φυσικές καταστροφές, με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, την οικονομία και την ανθρώπινη ζωή. Η καταστροφική τους δύναμη δεν περιορίζεται μόνο στην άμεση καταστροφή της βλάστησης και της άγριας ζωής, αλλά επεκτείνεται και στις μακροπρόθεσμες συνέπειες, όπως η διάβρωση του εδάφους, η μείωση της βιοποικιλότητας και οι αλλαγές στο τοπικό και παγκόσμιο κλίμα. Τα τελευταία χρόνια, η συχνότητα και η ένταση των δασικών πυρκαγιών φαίνεται να αυξάνονται, φαινόμενο που πολλοί επιστήμονες αποδίδουν στην κλιματική αλλαγή.

Η κλιματική αλλαγή, αποτέλεσμα κυρίως της ανθρώπινης δραστηριότητας και των αυξημένων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, επιφέρει αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες που επηρεάζουν την εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών. Αυτές οι αλλαγές περιλαμβάνουν την αύξηση της θερμοκρασίας, τη μεταβολή των προτύπων των βροχοπτώσεων και την ενίσχυση των ανέμων, που συνδυαστικά δημιουργούν συνθήκες ευνοϊκές για την εκδήλωση και την εξάπλωση των πυρκαγιών.

Η μελέτη των δασικών πυρκαγιών με χρήση προσομοιώσεων και υπολογιστικών μοντέλων αποτελεί ένα απαραίτητο εργαλείο για την κατανόηση της συμπεριφοράς τους και την ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης και πρόληψης. Τα μοντέλα αυτά επιτρέπουν τη σύνθεση και ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων, προσφέροντας τη δυνατότητα να προβλεφθούν τα πιθανά σενάρια εξέλιξης των πυρκαγιών υπό διάφορες κλιματικές συνθήκες. Μέσω της χρήσης αυτών των εργαλείων, μπορούμε να αξιολογήσουμε την επίδραση της κλιματικής αλλαγής στις δασικές πυρκαγιές και να αναπτύξουμε προσαρμοστικές στρατηγικές για τη μείωση των επιπτώσεών τους.

Η Ελλάδα, με τη γεωγραφική της θέση και το μεσογειακό της κλίμα, είναι ιδιαίτερα ευάλωτη στις δασικές πυρκαγιές. Κάθε καλοκαίρι, οι υψηλές θερμοκρασίες, οι ισχυροί άνεμοι και η ξηρασία δημιουργούν ιδανικές συνθήκες για την εκδήλωση πυρκαγιών, που συχνά προκαλούν σοβαρές ζημιές σε δασικές εκτάσεις, αγροτικές περιοχές και κατοικημένες ζώνες. Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, οι μεγάλες πυρκαγιές που έπληξαν τη χώρα, όπως αυτές στην Ανατολική Αττική, την Εύβοια και την Ανατολική Μακεδονία, υπογραμμίζουν την ανάγκη για αποτελεσματικότερες στρατηγικές διαχείρισης και πρόληψης.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της εξέλιξης των δασικών πυρκαγιών κατά τις επόμενες δεκαετίες, με βάση κλιματικά δεδομένα και προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα, θα αναλύσουμε πώς οι αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας και οι αλλαγές στα πρότυπα βροχοπτώσεων, επηρεάζουν την συχνότητα, την ένταση και την έκταση των δασικών πυρκαγιών. Η χρήση προσομοιώσεων και υπολογιστικών μοντέλων θα επιτρέψει τη διερεύνηση διαφορετικών σεναρίων και την αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στις δασικές πυρκαγιές.

Μέσα από αυτή την εργασία, φιλοδοξούμε να συμβάλουμε στην επιστημονική γνώση γύρω από το θέμα και να υποστηρίξουμε την ανάπτυξη στρατηγικών που θα ενισχύσουν την ανθεκτικότητα των δασικών οικοσυστημάτων απέναντι στις δασικές πυρκαγιές. Επιπλέον, στόχος μας είναι να αναδείξουμε τη σημασία της προληπτικής δράσης και της προσαρμογής στις νέες κλιματικές συνθήκες, για την προστασία των δασών και της βιοποικιλότητας που φιλοξενούν.

Η παρούσα μελέτη συγγράφηκε από έναν αξιωματικό του Πυροσβεστικού Σώματος, ο οποίος έχει άμεση εμπειρία από τη μάχη με τις δασικές πυρκαγιές. Η εμπειρία από την πρώτη γραμμή των πυρκαγιών παρέχει μια μοναδική προοπτική στην ανάλυση των δεδομένων και την εφαρμογή των προσομοιώσεων, ενώ ενισχύει την αξιοπιστία των προτεινόμενων στρατηγικών πρόληψης και διαχείρισης. Η συνεισφορά του συγγραφέα, ως επαγγελματία με βαθιά κατανόηση των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι πυροσβεστικές δυνάμεις, προσδίδει πρόσθετη αξία στην εργασία αυτή.

Παράλληλα, η γνώση και η κατανόηση της εξέλιξης των δασικών πυρκαγιών υπό την επίδραση της κλιματικής αλλαγής αποτελούν κρίσιμα εργαλεία για τη λήψη αποφάσεων και την ανάπτυξη στρατηγικών αντιμετώπισης. Η εμβάθυνση στα υπολογιστικά μοντέλα και τις προσομοιώσεις αποτελεί σημαντικό κίνητρο για την παρούσα μελέτη, καθώς παρέχει μία μοναδική ευκαιρία για την μετατροπή των εμπειρικών γνώσεων σε επιστημονική έρευνα αλλά και την περαιτέρω εμβάθυνση στο αντικείμενο και τις επικείμενες προκλήσεις, ενδυναμώνοντας την επαγγελματική επάρκεια και αποτελεσματικότητα του συγγραφέα, συμβάλλοντας ταυτόχρονα στην αποστολή και το έργο του Πυροσβεστικού Σώματος.

Τέλος, η έρευνα αυτή ευελπιστούμε να αποτελέσει ένα πολύτιμο εργαλείο για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, παρέχοντάς τους τις απαραίτητες πληροφορίες και προβλέψεις για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση αποτελεσματικών πολιτικών διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών. Η κατανόηση των μελλοντικών προκλήσεων και η προετοιμασία

για αυτές είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία των δασών και τη διατήρηση του περιβαλλοντικού και κοινωνικού μας ισοζυγίου.

## **1. Εισαγωγικές έννοιες**

### **1.1 Το φαινόμενο της καύσης και της πυρκαγιάς**

Η καύση είναι μια ταχεία χημική αντίδραση ενός καυσίμου με ένα οξειδωτικό που συνοδεύεται από την παραγωγή θερμότητας και συχνά ορατής ακτινοβολίας (φλόγας). Τα προϊόντα της καύσης συνήθως περιλαμβάνουν διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και νερό ( $\text{H}_2\text{O}$ ), αν και μπορεί να παραχθούν και άλλα προϊόντα ανάλογα με τη φύση του καυσίμου και τις συνθήκες της καύσης. Η εκτεταμένη, ανεπιθύμητη και μη ελεγχόμενη καύση ονομάζεται πυρκαγιά.

Για την πραγματοποίηση μιας καύσης απαιτούνται ορισμένα στοιχεία, τα οποία είναι ευρέως γνωστά ως το τετράεδρο της φωτιάς (Hurley, 2016). Τα στοιχεία αυτά πρέπει να υφίστανται αθροιστικά και είναι τα παρακάτω:

1. Το καύσιμο (καύσιμη ύλη),
2. Το οξειδωτικό μέσο,
3. Η θερμότητα για την έναυση και διατήρηση της καύσης,
4. Η ύπαρξη ελεύθερων ριζών για την αλληλεπίδραση του οξειδωτικού παράγοντα με το καύσιμο και τη δημιουργία αλυσωτής αντίδρασης.

Συνήθως για λόγους απλότητας στην βιβλιογραφία γίνεται μνεία στα τρία πρώτα στοιχεία, αφού αυτά είναι τα πιο εύκολα αντιληπτά και αντιμετωπίσιμα. Εντούτοις, στην πραγματικότητα και ο τέταρτος παράγοντας είναι εξίσου σημαντικός.

### **1.2 Οι δασικές πυρκαγιές**

Δασική πυρκαγιά ονομάζεται η ανεξέλεγκτη καύση που ξεσπά σε δασικές εκτάσεις, καταναλώνοντας τη βλάστηση όπως δέντρα, θάμνους και χόρτα. Αυτές οι πυρκαγιές χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να εξαπλώνονται γρήγορα, προκαλώντας μεγάλες καταστροφές τόσο στις φυσικές όσο και στις ανθρωπογενείς δομές. Οι δασικές πυρκαγιές μπορούν να έχουν διάφορες μορφές καύσης: η επιφανειακή καύση αφορά τη φωτιά που καίει τη βλάστηση στην επιφάνεια του εδάφους, η υπόγεια καύση περιλαμβάνει τη φωτιά που καίει την οργανική ύλη κάτω από την επιφάνεια, ενώ η καύση της κομοστέγης αναφέρεται στη φωτιά που καίει τις κορυφές των δέντρων.

Οι δασικές πυρκαγιές έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά που τις καθιστούν ιδιαίτερα επικίνδυνες και καταστροφικές. Καταρχάς, μπορούν να καλύψουν μεγάλες εκτάσεις με υψηλή ένταση, γεγονός που δυσκολεύει την αντιμετώπισή τους. Η ταχύτητα εξάπλωσης

τους εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, η υγρασία, η θερμοκρασία και η διαθεσιμότητα καυσίμου. Η θερμοκρασία της πυρκαγιάς μπορεί να είναι εξαιρετικά υψηλή, με αποτέλεσμα να προκαλείται μεγάλη καταστροφή στην περιοχή όπου εκδηλώνεται.

Οι αιτίες των δασικών πυρκαγιών μπορεί να είναι φυσικές, όπως οι κεραυνοί, ή ανθρωπογενείς, όπως η αμέλεια με φωτιά και οι σκόπιμοι εμπρησμοί. Η ταχύτητα εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως ο άνεμος, η υγρασία, η θερμοκρασία και η διαθεσιμότητα καυσίμου. Όταν ξεσπά μια δασική πυρκαγιά, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές περιβαλλοντικές ζημιές, όπως την καταστροφή δασών, την απώλεια βιοποικιλότητας, τη διάβρωση εδάφους και τη διαταραχή οικοσυστημάτων.

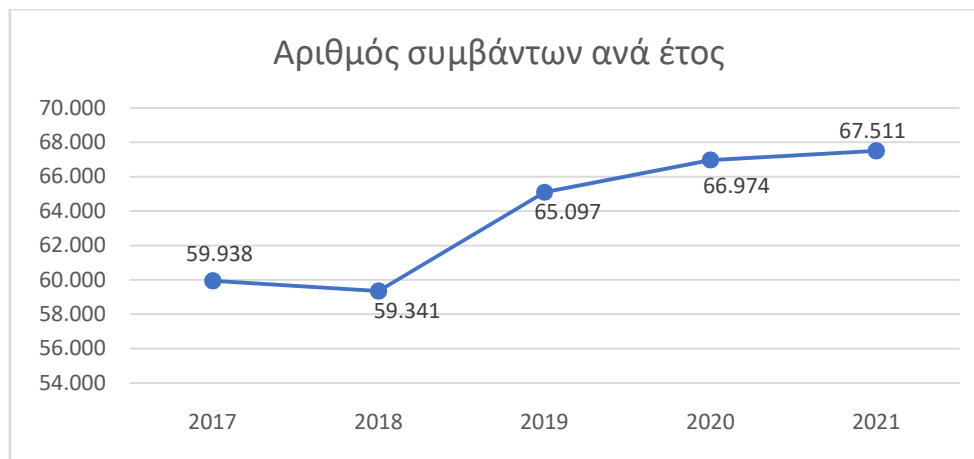
Οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών περιλαμβάνουν την καταστροφή ιδιοκτησιών, τις απώλειες εισοδήματος από τη γεωργία και τον τουρισμό, καθώς και τα υψηλά κόστη αποκατάστασης. Επίσης, οι πυρκαγιές μπορούν να επηρεάσουν την υγεία των ανθρώπων, προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα από τον καπνό και απειλώντας την ασφάλεια των κατοίκων και των πυροσβεστών.

Η αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών περιλαμβάνει διάφορα στάδια και μέτρα. Η πρόληψη είναι κρίσιμη και περιλαμβάνει την εκπαίδευση του κοινού, την επιβολή κανονισμών για τη διαχείριση των δασών και τον έλεγχο των επικίνδυνων δραστηριοτήτων κατά την ξηρή περίοδο. Η έγκαιρη ανίχνευση των πυρκαγιών μπορεί να επιτευχθεί μέσω συστημάτων παρακολούθησης, πυροφυλάκων και δορυφορικών τεχνολογιών. Η κατάσβεση των πυρκαγιών απαιτεί τη χρήση πυροσβεστικών δυνάμεων, αεροσκαφών πυρόσβεσης και την κατασκευή αντιπυρικών ζωνών για τον περιορισμό της εξάπλωσης. Τέλος, η αποκατάσταση των καμένων εκτάσεων περιλαμβάνει την αναδάσωση, τη διαχείριση των καμένων περιοχών και τη λήψη μέτρων για την αποφυγή της διάβρωσης.

### **1.3 Αυξητική τάση των συμβάντων στη χώρα μας**

Η αυξητική τάση των συμβάντων στη Χώρα μας αποτελεί σημαντική πρόκληση για το Πυροσβεστικό Σώμα, που καλείται να αντιμετωπίσει τα ανωτέρω μέσω ενός ταχέως μεταβαλλόμενου κλίματος. Η αύξηση των συμβάντων όπως καταγράφεται από το Πυροσβεστικό Σώμα τα τελευταία χρόνια αποτυπώνεται στα διαγράμματα της εικόνας 1.2 και 1.3. Τα συμβάντα περιλαμβάνουν αστικές πυρκαγιές, δασικές πυρκαγιές, παροχές βοήθειας, επεμβάσεις σε ανελκυστήρες και ψευδείς αναγγελίες. Επιπρόσθετα καταγράφεται αναλυτικά και η κατανομή των συμβάντων ανά Περιφέρεια της Χώρας σύμφωνα με τον

Πίνακα 1.1, από όπου διαπιστώνεται ότι το 28,5% των συμβάντων της τελευταίας πενταετίας εντοπίζεται στην Περιφέρεια της Αττικής, και το 15,7% αυτών στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας.

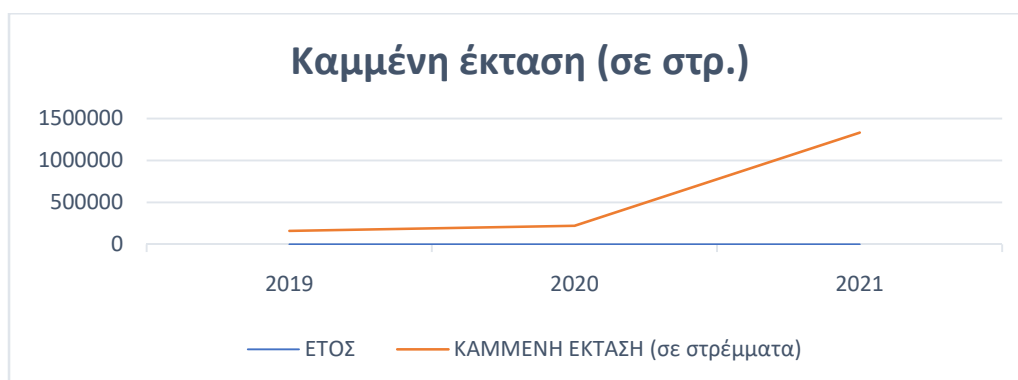


Εικόνα 1.1 Σύνολο Συμβάντων ανά έτος, την 5ετία 2017 – 2021. Επεξεργασία στοιχείων από [https://www.fireservice.gr/en\\_US/drasteriotetes-p.s](https://www.fireservice.gr/en_US/drasteriotetes-p.s)

Πίνακας 1.1 Συμβάντα ανά Περιφέρεια την 5ετία 2017 – 2021

Περιφερειακές Διοικήσεις	2017	2018	2019	2020	2021	Σύνολο Συμβάντων
Αττικής	17.609	17.787	18.814	16.906	19.693	<b>90.809</b>
Ανατολικής Μακεδονίας & Θράκης	4.401	5.375	5.838	5.829	4.891	<b>26.334</b>
Κεντρικής Μακεδονίας	9.502	9.400	9.591	11.069	10.644	<b>50.206</b>
Δυτικής Μακεδονίας	1.920	1.641	2.057	1.936	1.976	<b>9.530</b>
Ηπείρου	3.021	2.542	3.482	2.976	3.139	<b>15.160</b>
Θεσσαλίας	4.643	4.076	4.054	4.895	4.725	<b>22.393</b>
Δυτικής Ελλάδας	5.374	4.642	5.388	5.768	6.420	<b>27.592</b>
Πελοποννήσου	3.811	4.439	5.110	5.315	4.740	<b>23.415</b>
Στερεάς Ελλάδας	2.192	2.322	2.530	3.525	2.741	<b>13.310</b>
Νοτίου Αιγαίου	1.217	1.186	1.413	1.207	1.343	<b>6.366</b>
Βορείου Αιγαίου	1.051	1.011	1.360	1.660	1.445	<b>6.527</b>
Κρήτης	2.674	2.734	3.289	3.054	3.092	<b>14.843</b>
Ιόνιων Νήσων	2.039	1.770	1.783	2.350	2.350	<b>10.292</b>
Ε.Μ.Α.Κ. 1	-	-	-	-	-	-
Ε.Μ.Α.Κ. 2	302	280	270	415	257	<b>1.524</b>
Ε.Μ.Α.Κ. 3	111	95	66	51	24	<b>347</b>

E.M.A.K. 4	-	-	-	-	-	-
E.M.A.K. 5	13	5	11	12	12	53
E.M.A.K. 6	38	21	31	0	0	90
E.M.A.K. 7	18	14	10	6	19	67
E.M.A.K. 8	2	1	0	0	0	3
<b>Σύνολο</b>	<b>59.938</b>	<b>59.341</b>	<b>65.097</b>	<b>66.974</b>	<b>67.511</b>	<b>318.861</b>



Εικόνα 1.2 Καμμένες εκτάσεις σε στρέμματα ανά έτος. Επεξεργασία στοιχείων από [https://www.fireservice.gr/en\\_US/synola-dedomenon](https://www.fireservice.gr/en_US/synola-dedomenon)

#### 1.4 Το ζήτημα των δασικών πυρκαγιών

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα κοινό πρόβλημα για όλα τα δασικά οικοσυστήματα παγκοσμίως και, συνεπώς, για την χώρα μας. Ειδικότερα, μεγάλο μέρος αυτής καλύπτεται από άγονες και βραχύδεις εκτάσεις ως αποτέλεσμα διαδοχικών πυρκαγιών. Οι δασικές πυρκαγιές σε πολλές περιπτώσεις είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο είναι ευεργετικό για το οικοσύστημα.

Συγκεκριμένα, οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μέρος της οικολογίας των δασικών οικοσυστημάτων της χώρας μας και είναι φαινόμενο σύνθετο που ακολουθεί τους νόμους της φύσης. Η πλήρης εξάλειψη των δασικών πυρκαγιών είναι αδύνατη. Συγκεκριμένα, οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν έναν μηχανισμό ανανέωσης του δασικού πλούτου, αύξησης της βιοποικιλότητας και αναγέννησης.

Όμως, οι εκτεταμένες και επαναλαμβανόμενες σε σύντομα χρονικά διαστήματα πυρκαγιές οδηγούν σε αντίθετα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, προκαλούν ερημοποίηση και υποβάθμιση της γης ενώ επιδρούν και αρνητικά στο κοινωνικό σύνολο, αφού προκαλούν προβλήματα στις ανθρώπινες δραστηριότητες και στον τρόπο ζωής των ανθρώπων στις πληγείσες περιοχές.

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση των επαναλαμβανόμενων δασικών πυρκαγιών σε πολλά οικοσυστήματα ως αποτέλεσμα κυρίως της ανθρώπινης δραστηριότητας αλλά και της κλιματικής αλλαγής, η οποία οδηγεί σε μεταβολή των κλιματικών παραμέτρων και σε μεγαλύτερης έντασης και έκτασης δασικές πυρκαγιές που είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν.

Η πρόληψη των δασικών πυρκαγιών αποτελεί τον ιδεώδη στόχο της αντιπυρικής προστασίας του δασικού και γενικότερα φυσικού περιβάλλοντος. Ο στόχος αυτός επιδιώκεται μέσα από την άρση των αιτίων που άμεσα ή έμμεσα προκαλούν τις δασικές πυρκαγιές. Είναι γνωστό ότι οι δασικές πυρκαγιές μπορεί να προκληθούν από φυσικά αιτία (π.χ. κεραυνοί) ή από ανθρώπινες δραστηριότητες (κάψιμο σκουπιδιών, υπολείμματα καλλιεργειών, κλπ.). Στην Ελλάδα, ο κίνδυνος εκδήλωσης δασικής πυρκαγιάς από ανθρώπινες δραστηριότητες έχει διαπιστωθεί ότι είναι μεγάλος.

Αναλύοντας στατιστικά τις αιτίες πρόκλησης δασικών πυρκαγιών στη χώρα μας διαπιστώνουμε ότι το 35% των πυρκαγιών οφείλεται σε αμέλεια (κακός υπολογισμός στις καύσεις για καθαρισμούς, βραχυκυκλώματα γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικού ρεύματος, ανεξέλεγκτοι χώροι καύσης απορριμμάτων, παραλείψεις ή λάθη εκδρομέων κλπ). Ένα μικρότερο ποσοστό περιπτώσεων περίπου 20% οφείλεται σε κακόβουλες ενέργειες και το υπόλοιπο 45% που καταγράφεται σε άγνωστα αιτία κατανέμεται αναλόγως ανάμεσα στην αμέλεια και την πρόθεση. Συνεπώς, εφόσον το μεγαλύτερο ποσοστό των πυρκαγιών οφείλεται σε αμέλεια, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην ενημέρωση και κινητοποίηση των πολιτών για τον κίνδυνο πρόκλησης πυρκαγιάς από αμέλεια.

Από τα παραπάνω γίνεται σαφές ότι για την αποτελεσματική διαχείριση των δασικών πυρκαγιών απαιτείται η λήψη μέτρων που θα στοχεύουν στην εξάλειψη των αιτίων που τις προκαλούν, είτε άμεσα είτε έμμεσα, καθώς και στη δημιουργία των κατάλληλων συνθηκών που θα κάνουν πιο αποτελεσματική την καταστολή τους.

Οι δασικές πυρκαγιές είναι μια διαρκής αιτία καταστροφής του φυσικού πλούτου της χώρας μας, δηλαδή μεγάλων και πολύτιμων δασικών εκτάσεων (Τσαγκάρη, 2011). Λόγω της αποστολής του Πυροσβεστικού Σώματος (Π.Σ.) και της ισχύουσας νομοθεσίας, η αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών αποτελεί ίσως την πιο σημαντική δραστηριότητα για τους σύγχρονους πυροσβέστες. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια έχουν καταγραφεί πολλές απώλειες ζώων εξαιτίας αυτών των πυρκαγιών, είτε πρόκειται για αμιγώς δασικές πυρκαγιές, όπως αυτές στην Πελοπόννησο το 2007, είτε για πυρκαγιές μεικτής ζώνης, όπως η πυρκαγιά στον οικισμό Μάτι, που αναδείχθηκε ως ένα σύγχρονο πρόβλημα.



Σύμφωνα με το Σύνταγμα της Ελλάδος, ως δάσος ή δασικό οικοσύστημα ορίζεται το οργανικό σύνολο άγριων φυτών με ξυλώδη κορμό σε μια αναγκαία επιφάνεια του εδάφους, τα οποία μαζί με την εκεί συνυπάρχουσα χλωρίδα και πανίδα αποτελούν μέσω της αμοιβαίας αλληλεξάρτησης και αλληλοεπίδρασής τους μια ιδιαίτερη βιοκοινότητα (δασοβιοκοινότητα) και ιδιαίτερο φυσικό περιβάλλον (δασογενές). Αντίστοιχα, ως δασική έκταση ορίζεται το παραπάνω σύνολο όπου η άγρια ξυλώδης βλάστηση, υψηλή ή θαμνώδης, είναι αραιά.

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα αρχέγονο φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί σε όλη την ιστορία της Γης. Ωστόσο, τα τελευταία 30 χρόνια, η συχνότητα και η ένταση αυτών των πυρκαγιών έχουν αυξηθεί δραματικά, προκαλώντας εκτεταμένες καταστροφές. Στην Ελλάδα, οι κλιματολογικές συνθήκες, όπως οι υψηλές θερμοκρασίες και οι παρατεταμένες περίοδοι ξηρασίας, σε συνδυασμό με το ποικιλόμορφο και ανώμαλο έδαφος, συμβάλλουν στην ταχεία εξάπλωση των πυρκαγιών.

Επιπλέον, οι προβλέψεις για τις επόμενες δεκαετίες δείχνουν ότι οι περιβαλλοντικές συνθήκες θα γίνουν ακόμα πιο ακραίες. Οι αυξήσεις της θερμοκρασίας, οι συχνότερες ξηρασίες και η μεταβολή της βλάστησης θα επιδεινώσουν το πρόβλημα των δασικών πυρκαγιών στη χώρα μας, καθιστώντας τες ακόμα πιο συχνές και καταστροφικές.

Οι συνέπειες των δασικών πυρκαγιών είναι πολυδιάστατες και σοβαρές, επηρεάζοντας αρνητικά την υγεία των ανθρώπων, το οικοσύστημα, την οικονομία και την κοινωνία συνολικά (Χάλαρης, 2016). Οι ζημιές που προκαλούνται από τις δασικές πυρκαγιές διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Οι άμεσες ζημιές περιλαμβάνουν την πλήρη ή μερική καταστροφή της ξυλώδους βλάστησης, την απώλεια δασικών προϊόντων όπως η ρητίνη, και την καταστροφή της βλάστησης που χρησιμοποιείται για βοσκή. Επιπλέον, οι πυρκαγιές μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές σε γεωργικές καλλιέργειες, βιομηχανικές και βιοτεχνικές εγκαταστάσεις, κτηνοτροφικές και μελισσοκομικές υποδομές, καθώς και σε κατοικίες και άλλες δομές λόγω της εξάπλωσης της φωτιάς.

Είναι εξίσου σημαντική και η επιβάρυνση της δημόσιας υγείας εξαιτίας των καπνών από τις δασικές πυρκαγιές, οι οποίοι μολύνουν την ατμόσφαιρα και μπορούν να προκαλέσουν αναπνευστικά και καρδιαγγειακά προβλήματα στον πληθυσμό. Οι έμμεσες συνέπειες περιλαμβάνουν την απώλεια της βιοποικιλότητας, την αλλαγή της δομής των οικοσυστημάτων και τις μακροχρόνιες οικονομικές επιπτώσεις για τις τοπικές κοινωνίες και την εθνική οικονομία.

## **2. Στοιχεία δασικών πυρκαγιών**

### **2.1 Κατηγορίες δασικών πυρκαγιών**

#### **2.1.1 Κατηγορίες με βάση τον τρόπο εξάπλωσης**

Οι διάφορες κατηγορίες πυρκαγιών ποικίλουν ανάλογα με το κριτήριο κατηγοριοποίησης αυτών. Γενικά, τα συνηθέστερα κριτήρια διάκρισης είναι ο τρόπος εξάπλωσης, η πηγή έναυσης ή το μέγεθος. Οι δασικές πυρκαγιές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τρόπο εξάπλωσής τους σε τρεις κύριες κατηγορίες: πυρκαγιές επιφάνειας, πυρκαγιές κορυφής και πυρκαγιές εδάφους. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες έχει τις δικές της ιδιαιτερότητες και απαιτεί διαφορετικές στρατηγικές για την πρόληψη και την καταστολή της.

##### **2.1.1.1 Πυρκαγιές επιφάνειας ή έρπουσες**

Οι πυρκαγιές επιφάνειας (surfacefires) είναι οι πιο κοινές και εξαπλώνονται στην επιφάνεια του εδάφους. Αυτές οι πυρκαγιές καίνε τα ξηρά φύλλα, το χορτάρι, τους θάμνους και τα χαμηλά κλαδιά των δέντρων. Επειδή κινούνται στην επιφάνεια, είναι σχετικά εύκολες να εντοπιστούν και να κατασταλούν, ιδιαίτερα αν αντιμετωπιστούν έγκαιρα. Ωστόσο, αν δεν κατασταλούν άμεσα, μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στη χαμηλή βλάστηση και να μετατραπούν σε πιο σοβαρές πυρκαγιές.

Ενώ μπορούν να βλάψουν ή να σκοτώσουν μικρότερα δέντρα και βλάστηση, συχνά έχουν μικρότερο αντίκτυπο σε μεγαλύτερα δέντρα. Οι επιφανειακές πυρκαγιές διαδραματίζουν κρίσιμο οικολογικό ρόλο ανακυκλώνοντας θρεπτικά συστατικά, μειώνοντας την υπερβολική βλάστηση και προάγοντας την υγεία των δασών.

##### **2.1.1.2 Πυρκαγιές κόμης ή επικόρυφες**

Οι πυρκαγιές κορυφής (crownfires) είναι πολύ πιο επικίνδυνες και καταστροφικές. Αυτές οι πυρκαγιές εξαπλώνονται από την επιφάνεια του εδάφους στις κορυφές των δέντρων, καίγοντας την ανώτερη βλάστηση. Μπορούν να εξαπλωθούν εξαιρετικά γρήγορα, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και των ισχυρών ανέμων που συχνά συνοδεύουν αυτές τις πυρκαγιές. Η ταχύτητα και η ένταση των πυρκαγιών κορυφής τις καθιστούν πολύ δύσκολες στην αντιμετώπιση και μπορεί να προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές σε δασικές εκτάσεις και κοντινές κατοικημένες περιοχές.

#### 2.1.1.3 Πυρκαγιές εδάφους ή υπόγειες

Οι πυρκαγιές εδάφους (groundfires) είναι οι λιγότερο ορατές αλλά επίσης πολύ επικίνδυνες. Αυτές οι πυρκαγιές καίνε την οργανική ύλη κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, όπως οι ρίζες και η τύρφη. Είναι δύσκολο να εντοπιστούν και να κατασταλούν επειδή μπορούν να καίνε αργά και αθέατα για μεγάλες χρονικές περιόδους πριν εμφανιστούν στην επιφάνεια. Οι πυρκαγιές εδάφους μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές ζημιές στη δομή του εδάφους και να επιδεινώσουν την έκταση των επιφανειακών πυρκαγιών όταν τελικά αναδυθούν στην επιφάνεια. Αυτές οι πυρκαγιές είναι ιδιαίτερα δύσκολο να σβήσουν γιατί μπορεί να καίνε βαθιά μέσα στο έδαφος, καθιστώντας δύσκολη την πρόσβαση με τις τυπικές μεθόδους πυρόσβεσης.

#### 2.1.1.4 Πυρκαγιές μεικτού τύπου

Ορισμένες δασικές πυρκαγιές παρουσιάζουν χαρακτηριστικά τόσο επιφανειακών όσο και επικόρυφων πυρκαγιών, ανάλογα με το έδαφος, τους τύπους καυσίμων και τις καιρικές συνθήκες. Αυτές οι μικτές πυρκαγιές μπορούν να μεταβούν μεταξύ της καύσης στον υποόροφο του δάσους και της καύσης στις κορυφές των δέντρων, καθιστώντας τις δυναμικές και δύσκολες στη διαχείρισή τους.

### 2.1.2 Κατηγορίες με βάση τον τρόπο πρόκλησης

Μία εναλλακτική κατηγοριοποίηση αφορά τον την πηγή που προκάλεσε τις πυρκαγιές αυτές. Οι δασικές πυρκαγιές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τρόπο που προκλήθηκαν σε δύο κύριες κατηγορίες: φυσικές και ανθρωπογενείς. Κάθε κατηγορία περιλαμβάνει διάφορους τρόπους πρόκλησης, που είναι σημαντικοί για την κατανόηση και την πρόληψη των πυρκαγιών

#### 2.1.2.1 Πυρκαγιές από φυσικά αίτια

Οι φυσικές αιτίες δασικών πυρκαγιών περιλαμβάνουν διάφορα φαινόμενα της φύσης. Μία από τις πιο κοινές φυσικές αιτίες είναι οι κεραυνοί. Κατά τη διάρκεια καταιγίδων, οι κεραυνοί μπορεί να χτυπήσουν δέντρα ή ξηρή βλάστηση, προκαλώντας ανάφλεξη και πυρκαγιά. Οι πυρκαγιές αυτές μπορούν να είναι ιδιαίτερα καταστροφικές, ειδικά σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η πυρόσβεση είναι δύσκολη.

Ένας άλλος φυσικός παράγοντας είναι η ηφαιστειακή δραστηριότητα. Σε περιοχές με ενεργά ηφαίστεια, η εκτόξευση λάβας και η ηφαιστειακή τέφρα μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές στα γύρω δάση, καταστρέφοντας τη βλάστηση και το οικοσύστημα.

Επιπλέον, η αυτανάφλεξη είναι μια φυσική διαδικασία που μπορεί να προκαλέσει πυρκαγιές. Όταν οργανική ύλη, όπως φύλλα και ξύλα, αποσυντίθεται και παράγεται θερμότητα αρκετή για να προκαλέσει ανάφλεξη χωρίς εξωτερική πηγή, μπορεί να προκληθεί πυρκαγιά.

#### 2.1.2.2 Πυρκαγιές από ανθρωπογενείς αιτίες

Οι ανθρωπογενείς αιτίες δασικών πυρκαγιών περιλαμβάνουν διάφορες δραστηριότητες και συμπεριφορές των ανθρώπων.

Η αμέλεια είναι μία από τις κύριες αιτίες. Απρόσεκτες δραστηριότητες, όπως το κάπνισμα ή το πέταγμα αναμμένων τσιγάρων, μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές. Επίσης, κατασκηνωτές και εκδρομείς που δεν σβήνουν σωστά τις φωτιές και τις ψησταριές μπορούν να προκαλέσουν ανεξέλεγκτες πυρκαγιές. Γεωργικές δραστηριότητες, όπως το κάψιμο υπολειμμάτων καλλιεργειών, μπορούν να ξεφύγουν από τον έλεγχο και να προκαλέσουν πυρκαγιές.

Σκόπιμες ενέργειες, όπως ο εμπρησμός, αποτελούν επίσης μια σημαντική αιτία δασικών πυρκαγιών. Οι πυρκαγιές που προκαλούνται σκόπιμα για διάφορους λόγους, όπως δολιοφθορές ή οικονομικά κίνητρα, μπορούν να είναι ιδιαίτερα καταστροφικές.

Επιπλέον, οι βιομηχανικές και τεχνικές δραστηριότητες μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές. Σπινθήρες από μηχανήματα, όπως αλυσοπρίονα ή μηχανές που χρησιμοποιούνται κοντά σε ξηρή βλάστηση, μπορούν να προκαλέσουν ανάφλεξη. Η πτώση ηλεκτροφόρων καλωδίων μπορεί επίσης να προκαλέσει πυρκαγιές, ιδιαίτερα σε περιοχές με ξηρή βλάστηση.

Μεταφορικά μέσα, όπως τα οχήματα και τα τρένα, μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές μέσω σπινθήρων από τις εξατμίσεις ή ζεστών καταλυτών που έρχονται σε επαφή με ξηρά χόρτα, ή από φρένα και σιδηροτροχιές.

Επίσης, τα αστικά απορρίμματα, όπως τα σκουπίδια και το γυαλί, μπορούν να προκαλέσουν πυρκαγιές. Ανακλαστικές επιφάνειες, όπως σπασμένα μπουκάλια, μπορούν να συγκεντρώσουν ηλιακή ακτινοβολία και να προκαλέσουν ανάφλεξη.

Τέλος, οι προδιαγεγραμμένες πυρκαγιές, γνωστές και ως ελεγχόμενη καύση, είναι σκόπιμες πυρκαγιές που σχεδιάζονται και διαχειρίζονται προσεκτικά για συγκεκριμένους οικολογικούς σκοπούς, σκοπούς διαχείρισης γης ή ως τρόπος πυρόσβεσης. Αυτές οι πυρκαγιές προκαλούνται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες για τη μείωση της συσσώρευσης καυσίμων, την αποκατάσταση των δασών και τη βελτίωση της υγείας των δασών. Οι

προδιαγεγραμμένες πυρκαγιές αποτελούν πολύτιμο εργαλείο για τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών και την αποκατάσταση των οικοσυστημάτων.

### **2.1.3 Κατηγορίες με βάση το μέγεθος των δασικών πυρκαγιών**

Τέλος, μία εναλλακτική κατηγοριοποίηση αφορά το μέγεθος των πυρκαγιών και είναι ουσιαστικά κατηγορίες πυρκαγιών οι οποίες έχουν εμφανιστεί τα τελευταία χρόνια ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Οι δασικές πυρκαγιές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση το μέγεθός τους σε διάφορες κλίμακες, από μικρές τοπικές πυρκαγιές μέχρι μεγάλες καταστροφικές πυρκαγιές που επηρεάζουν εκτεταμένες περιοχές. Αυτή η κατηγοριοποίηση είναι σημαντική για την αξιολόγηση της σοβαρότητας και των απαιτήσεων για την καταστολή και τη διαχείριση των πυρκαγιών.

#### **2.1.3.1 Πυρκαγιές μικρής έκτασης**

Μικρές δασικές πυρκαγιές είναι εκείνες που καλύπτουν μια μικρή περιοχή, συνήθως λιγότερο από 1 εκτάριο (10 στρέμματα). Αυτές οι πυρκαγιές συχνά περιορίζονται σε τοπικές περιοχές και μπορούν να αντιμετωπιστούν γρήγορα και αποτελεσματικά από τις τοπικές δυνάμεις πυρόσβεσης.

Οι μικρές πυρκαγιές μπορεί να προκληθούν από διάφορους παράγοντες, όπως το κάπνισμα σκουπιδιών ή από μικρές αμέλειες, όπως το πέταγμα αναμμένων τσιγάρων. Παρόλο που οι μικρές πυρκαγιές δεν έχουν την ίδια ένταση και έκταση με τις μεγαλύτερες πυρκαγιές, μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στο τοπικό οικοσύστημα και να θέσουν σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές και περιουσίες αν δεν κατασταλούν άμεσα.

#### **2.1.3.2 Πυρκαγιές μεσαίας έκτασης**

Οι μεσαίες δασικές πυρκαγιές καλύπτουν περιοχές από 1 έως 100 εκτάρια (10 έως 1.000 στρέμματα). Αυτές οι πυρκαγιές είναι πιο δύσκολο να αντιμετωπιστούν από τις μικρές πυρκαγιές και συχνά απαιτούν τη συνδρομή περισσότερων δυνάμεων πυρόσβεσης και εξειδικευμένου εξοπλισμού.

Οι μεσαίες πυρκαγιές μπορεί να εξαπλωθούν γρήγορα υπό συνθήκες ξηρασίας και ισχυρών ανέμων και μπορεί να επηρεάσουν σημαντικές περιοχές δασικής γης. Η καταστολή αυτών των πυρκαγιών απαιτεί συντονισμένες προσπάθειες και καλή οργάνωση, καθώς και την αξιοποίηση τεχνολογίας, όπως αεροσκάφη πυρόσβεσης και δορυφορική παρακολούθηση για την έγκαιρη ανίχνευση και αντιμετώπισή τους.

#### 2.1.3.3 Πυρκαγιές μεγάλης έκτασης

Οι μεγάλες δασικές πυρκαγιές είναι αυτές που καλύπτουν περιοχές μεγαλύτερες από 100 εκτάρια (1.000 στρέμματα). Αυτές οι πυρκαγιές είναι εξαιρετικά καταστροφικές και μπορούν να έχουν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον, την οικονομία και την κοινωνία.

Οι μεγάλες πυρκαγιές είναι συνήθως δύσκολο να κατασταλούν και συχνά απαιτούν την κινητοποίηση εθνικών και διεθνών δυνάμεων πυρόσβεσης. Μπορούν να εξαπλωθούν γρήγορα και ανεξέλεγκτα, ιδιαίτερα σε περιοχές με πυκνή βλάστηση και έντονες κλιματικές συνθήκες, όπως ισχυρούς ανέμους και υψηλές θερμοκρασίες.

Οι μεγάλες πυρκαγιές μπορεί να διαρκέσουν ημέρες ή και εβδομάδες πριν τεθούν υπό έλεγχο και συχνά αφήνουν πίσω τους εκτεταμένες καταστροφές στη βλάστηση, τη χλωρίδα και την πανίδα της περιοχής.

#### 2.1.3.4 Υπερ-πυρκαγιές (megafires)

Οι πολύ μεγάλες δασικές πυρκαγιές, ή μεγαπυρκαγιές, είναι αυτές που καλύπτουν περιοχές μεγαλύτερες από 10.000 εκτάρια (100.000 στρέμματα). Αυτές οι πυρκαγιές είναι εξαιρετικά σπάνιες αλλά έχουν καταστροφικές συνέπειες.

Οι μεγαπυρκαγιές μπορούν να εξαπλωθούν με μεγάλη ταχύτητα και να καταστρέψουν ολόκληρες δασικές εκτάσεις, πόλεις και υποδομές. Συχνά προκαλούν εκτεταμένες εκκενώσεις και σημαντικές απώλειες σε ανθρώπινες ζωές και περιουσίες. Η καταστολή τους απαιτεί τη συντονισμένη δράση πολλών φορέων και την αξιοποίηση όλων των διαθέσιμων πόρων και τεχνολογιών.

Οι πολύ μεγάλες πυρκαγιές συνδέονται συχνά με ακραίες καιρικές συνθήκες, όπως παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας και υψηλών θερμοκρασιών, που δημιουργούν τις ιδανικές συνθήκες για την εξάπλωση της φωτιάς.

#### 2.1.4 Πυρκαγιές μεικτής ζώνης (Wildland – Urban Fires, WUI)

Οι πυρκαγιές μεικτής ζώνης είναι πυρκαγιές που ξεσπούν και εξαπλώνονται σε περιοχές όπου συνυπάρχουν δασικές και αστικές ή ημιαστικές ζώνες. Αυτές οι περιοχές χαρακτηρίζονται από την παρουσία τόσο φυσικής βλάστησης, όπως δάση και θάμνοι, όσο και ανθρωπογενών δομών, όπως κατοικίες, αγροικίες, βιομηχανικές εγκαταστάσεις και υποδομές. Οι πυρκαγιές μεικτής ζώνης παρουσιάζουν ιδιαίτερες προκλήσεις για την πυρόσβεση και τη διαχείρισή τους, καθώς συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των δασικών πυρκαγιών και των αστικών πυρκαγιών. Η ύπαρξη κατοικιών και άλλων ανθρώπινων δραστηριοτήτων κοντά ή μέσα σε δασικές περιοχές δημιουργεί συνθήκες όπου η φωτιά

μπορεί να εξαπλωθεί γρήγορα από τη βλάστηση σε κτίρια και αντίστροφα. Αυτό αυξάνει τον κίνδυνο για ανθρώπινες ζωές, περιουσίες και το περιβάλλον.

Οι περιοχές μεικτής ζώνης περιλαμβάνουν δάση, θάμνους, καλλιέργειες και κατοικίες. Η παρουσία ξηρής βλάστησης κοντά σε κτίρια αυξάνει την πιθανότητα εξάπλωσης της φωτιάς. Οι πυρκαγιές μεικτής ζώνης απειλούν άμεσα τους ανθρώπους που κατοικούν ή εργάζονται σε αυτές τις περιοχές. Οι εκκενώσεις γίνονται συχνά αναγκαίες για την προστασία των κατοίκων. Η καταπολέμηση των πυρκαγιών μεικτής ζώνης είναι περίπλοκη, καθώς απαιτεί την προστασία τόσο της βλάστησης όσο και των ανθρώπινων κατασκευών. Η πυρόσβεση σε τέτοιες περιοχές απαιτεί συντονισμό μεταξύ πολλών υπηρεσιών, όπως η πυροσβεστική, η αστυνομία και οι τοπικές αρχές. Οι ζημιές από τις πυρκαγιές μεικτής ζώνης είναι συχνά εκτεταμένες και αφορούν τόσο την καταστροφή φυσικών πόρων όσο και την απώλεια περιουσιών. Οι κοινωνικές επιπτώσεις μπορεί να είναι σημαντικές, καθώς οι κάτοικοι χάνουν τα σπίτια και τις περιουσίες τους, ενώ οι τοπικές οικονομίες μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πυρκαγιάς μεικτής ζώνης είναι η πυρκαγιά στον οικισμό Μάτι στην Ελλάδα το 2018. Αυτή η πυρκαγιά ξεκίνησε σε δασική περιοχή και εξαπλώθηκε γρήγορα σε κατοικημένες ζώνες, προκαλώντας εκτεταμένες καταστροφές και τραγικές απώλειες σε ανθρώπινες ζωές. Το γεγονός ότι η πυρκαγιά εκδηλώθηκε σε περιοχή όπου οι δασικές και οι αστικές ζώνες ήταν στενά συνδεδεμένες καθιστά το Μάτι ένα τυπικό παράδειγμα των προκλήσεων και των κινδύνων που σχετίζονται με τις πυρκαγιές μεικτής ζώνης.

Η αντιμετώπιση των πυρκαγιών μεικτής ζώνης απαιτεί προληπτικά μέτρα, όπως σωστός σχεδιασμός χρήσεων γης, δημιουργία αντιπυρικών ζωνών και τακτικός καθαρισμός της βλάστησης γύρω από κατοικίες. Η εκπαίδευση των κατοίκων σχετικά με τα μέτρα πρόληψης και οι τακτικές εκκένωσης είναι επίσης κρίσιμες. Επιπλέον, απαιτείται ενισχυμένη συνεργασία μεταξύ των πυροσβεστικών δυνάμεων, των τοπικών αρχών και άλλων σχετικών φορέων για την αποτελεσματική διαχείριση και καταστολή των πυρκαγιών. Οι πυρκαγιές μεικτής ζώνης απαιτούν μια ολοκληρωμένη και συντονισμένη προσέγγιση για την πρόληψη και την αντιμετώπισή τους, ώστε να μειωθούν οι καταστροφικές τους συνέπειες και να προστατευθούν οι ανθρώπινες ζωές και οι περιουσίες.

## **2.2 Χαρακτηριστικά επιφανειακών (έρπουσων) πυρκαγιών**

Οι επιφανειακές ή έρπουσες πυρκαγιές αποτελούν έναν από τους πιο συνηθισμένους τύπους δασικών πυρκαγιών και έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά που τις καθιστούν

ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες και επικίνδυνες. Αυτές οι πυρκαγιές καίνε κυρίως τη βλάστηση στην επιφάνεια του εδάφους, όπως ξηρά χόρτα, φύλλα, μικρούς θάμνους και κλαδιά. Τα καύσιμα υλικά που καταναλώνονται από τις επιφανειακές πυρκαγιές είναι συνήθως εύφλεκτα και αναφλέγονται εύκολα, καθιστώντας τις φωτιές αυτές δύσκολες στην πρόβλεψη και στον έλεγχο.

Οι επιφανειακές πυρκαγιές έχουν χαμηλότερη ένταση σε σύγκριση με τις πυρκαγιές κόμης, ωστόσο, η θερμότητα που απελευθερώνεται μπορεί να είναι αρκετά υψηλή για να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στην επιφανειακή βλάστηση και στο οικοσύστημα. Παρά τη χαμηλότερη ένταση, η ταχύτητα εξάπλωσής τους μπορεί να είναι υψηλή, ειδικά σε περιοχές με άφθονη ξηρή βλάστηση και ευνοϊκές καιρικές συνθήκες, όπως ισχυροί άνεμοι. Η κλίση του εδάφους επηρεάζει επίσης την εξάπλωση, με τις φωτιές να κινούνται ταχύτερα σε κεκλιμένα εδάφη.

Οι επιφανειακές πυρκαγιές χαρακτηρίζονται από την εύκολη αναφλεξιμότητά τους. Τα ξηρά και λεπτά καύσιμα στην επιφάνεια του εδάφους μπορούν να αναφλεχθούν γρήγορα τόσο από φυσικά αίτια, όπως οι κεραυνοί, όσο και από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως τα πεταμένα τσιγάρα ή οι ανοιχτές φωτιές. Αυτή η υψηλή αναφλεξιμότητα καθιστά τις επιφανειακές πυρκαγιές ένα συχνό φαινόμενο κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων, όπου τα καύσιμα υλικά είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην ανάφλεξη.

Οι επιφανειακές πυρκαγιές μπορούν να έχουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Καταστρέφουν τη φυσική βλάστηση και τα οικοσυστήματα, προκαλώντας απώλεια βιοποικιλότητας και διαταραχή των φυσικών οικοτόπων. Επιπλέον, αυξάνουν τον κίνδυνο διάβρωσης του εδάφους, καθώς η απουσία βλάστησης αφήνει το έδαφος εκτεθειμένο στις καιρικές συνθήκες. Ο καπνός και τα αιωρούμενα σωματίδια που παράγονται από τις πυρκαγιές επηρεάζουν την ποιότητα του αέρα, προκαλώντας προβλήματα υγείας στους ανθρώπους, ιδιαίτερα σε όσους πάσχουν από αναπνευστικά προβλήματα.

Η αντιμετώπιση των επιφανειακών πυρκαγιών, αν και θεωρείται συχνά ευκολότερη σε σύγκριση με άλλους τύπους δασικών πυρκαγιών, μπορεί να είναι απαιτητική λόγω της ταχύτητας εξάπλωσης και της ευρείας διασποράς τους. Η αποτελεσματική καταστολή τους απαιτεί συντονισμένες προσπάθειες από τις πυροσβεστικές δυνάμεις, χρήση κατάλληλου εξοπλισμού και, συχνά, τη δημιουργία αντιπυρικών ζωνών για τον περιορισμό της εξάπλωσης.



Οι επιφανειακές πυρκαγιές έχουν συνήθως περιορισμένο αντίκτυπο σε μεγαλύτερα δέντρα στο δάσος. Ενώ οι φλόγες μπορεί να φτάσουν στα κάτω τμήματα των κορμών των δέντρων, η ένταση της φωτιάς είναι γενικά ανεπαρκής για να σκοτώσει ώριμα δέντρα. Ωστόσο, η θερμότητα που παράγεται από μια επιφανειακή πυρκαγιά μπορεί να ανοίξει κουκουνάρια, απελευθερώνοντας σπόρους και προωθώντας την αναγέννηση των δασών.

Οι επιφανειακές πυρκαγιές διαδραματίζουν κρίσιμο οικολογικό ρόλο σε πολλά οικοσυστήματα. Βοηθούν στην ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών διασπώντας το νεκρό φυτικό υλικό, μειώνουν την υπερβολική βλάστηση και καθαρίζουν το δάσος. Αυτή η φυσική διαδικασία μπορεί να βελτιώσει την υγεία των δασών και να δημιουργήσει ευνοϊκές συνθήκες για την ανάπτυξη νέας βλάστησης.

Οι υπηρεσίες διαχείρισης πυρκαγιών συχνά χρησιμοποιούν ελεγχόμενη καύση για να διαχειριστούν και να θέσουν επιφανειακές πυρκαγιές υπό έλεγχο. Η μέθοδος αυτή συμβάλλει στη μείωση της συσσώρευσης εύφλεκτης βλάστησης, τον μετριασμό του κινδύνου πιο σοβαρών πυρκαγιών και την αποκατάσταση των δασών.

Οι επιφανειακές πυρκαγιές προκαλούν ιδιαίτερη ανησυχία σε περιοχές διεπαφής (WUI), όπου η φυσική βλάστηση συναντά τις ανθρώπινες κοινότητες. Οι πυρκαγιές WUI μπορούν να απειλήσουν σπίτια και υποδομές, καθιστώντας την αποτελεσματική διαχείριση πυρκαγιών και την ετοιμότητα της κοινότητας κρίσιμες.

Οι επιφανειακές πυρκαγιές αποτελούν κοινό και σημαντικό συστατικό πολλών δασικών οικοσυστημάτων. Καίνε τον υποόροφο του δάσους, καταναλώνουν λεπτά καύσιμα, έχουν σχετικά αργούς ρυθμούς εξάπλωσης και διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην ανακύκλωση των θρεπτικών συστατικών και στην αναγέννηση των δασών. Η ελεγχόμενη καύση χρησιμοποιείται από ορισμένες χώρες για τη μίμηση επιφανειακών πυρκαγιών για σκοπούς οικολογικής διαχείρισης και η κατανόηση της δυναμικής των επιφανειακών πυρκαγιών είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική διαχείριση των δασικών πυρκαγιών και την προστασία των κοινοτήτων σε περιοχές διεπαφής δασών και αστικών περιοχών.

### **2.3 Παράγοντες που επηρεάζουν μία δασική πυρκαγιά**

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά και την εξέλιξη μιας δασικής πυρκαγιάς είναι πολλοί και ποικίλοι. Παρακάτω θα αναλύσουμε του κυριότερους εξ' αυτών οι οποίοι έχουν εφαρμογή στο κομμάτι που δραστηριοποιείται η υπηρεσία μας.

### 2.3.1 Άνεμος

Άνεμος ονομάζεται η όποια αισθητή «οριζόντια κίνηση» του αέρα(Περογιαννάκης, 1974). Αιτία του ανέμου είναι ότι ο αέρας (οι αέριες μάζες της ατμόσφαιρας), που περιβάλλει την Γη βρίσκεται σε συνεχή «οριζόντια» και «κατακόρυφη» κίνηση. Η όποια αισθητή «κατακόρυφη κίνηση» του αέρα ονομάζεται ρεύμα, και αν μεν είναι από κάτω προς τα επάνω λέγεται ανοδικό ρεύμα, αν είναι από επάνω προς τα κάτω λέγεται καθοδικό ρεύμα.

Ο άνεμος είναι ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά και την εξάπλωση μιας δασικής πυρκαγιάς. Η ταχύτητα, η κατεύθυνση και η μεταβλητότητα του ανέμου μπορούν να καθορίσουν τον ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς, την έντασή της και τις περιοχές που θα επηρεαστούν. Καταρχάς, η ταχύτητα του ανέμου παίζει καθοριστικό ρόλο στην ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Ισχυροί άνεμοι μπορούν να μεταφέρουν φλόγες και κάφτρες σε μεγάλες αποστάσεις, προκαλώντας την ανάφλεξη νέων εστιών φωτιάς μακριά από την κύρια εστία. Αυτό το φαινόμενο, γνωστό ως "spotting", καθιστά τον έλεγχο της πυρκαγιάς εξαιρετικά δύσκολο, καθώς οι πυροσβεστικές δυνάμεις πρέπει να αντιμετωπίσουν πολλαπλά μέτωπα.

Επιπλέον, ο άνεμος επηρεάζει την ένταση της πυρκαγιάς. Όσο πιο ισχυρός είναι ο άνεμος, τόσο μεγαλύτερη είναι η παροχή οξυγόνου στη φωτιά, γεγονός που αυξάνει την ένταση και τη θερμοκρασία της καύσης. Αυτό σημαίνει ότι οι φλόγες μπορούν να γίνουν πιο υψηλές και η θερμότητα που εκπέμπεται να είναι πιο έντονη, προκαλώντας μεγαλύτερες ζημιές στη βλάστηση και αυξάνοντας την απειλή για τις ανθρώπινες ζωές και τις περιουσίες. Η αυξημένη ένταση μπορεί επίσης να καταστήσει την πυρκαγιά πιο ανθεκτική στις προσπάθειες κατάσβεσης, καθώς οι φλόγες μπορεί να ξεπεράσουν τα φυσικά ή τεχνητά εμπόδια που έχουν δημιουργηθεί για να την περιορίσουν.

Η κατεύθυνση του ανέμου είναι επίσης κρίσιμη. Η αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου μπορεί να προκαλέσει απρόβλεπτες μεταβολές στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, θέτοντας σε κίνδυνο περιοχές που προηγουμένως θεωρούνταν ασφαλείς. Οι ξαφνικές αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου μπορούν να παγιδεύσουν τους πυροσβέστες και να δυσκολέψουν τον συντονισμό των επιχειρήσεων κατάσβεσης. Επιπλέον, όταν ο άνεμος φυσάει προς την κατεύθυνση της ανηφορικής κλίσης, η πυρκαγιά μπορεί να επιταχυνθεί, καθώς οι φλόγες κινούνται γρηγορότερα προς τα πάνω. Αντίθετα, όταν ο άνεμος φυσάει προς την κατεύθυνση της κατηφορικής κλίσης, η ταχύτητα εξάπλωσης μπορεί να μειωθεί, αν και η πυρκαγιά μπορεί να συνεχίσει να εξαπλώνεται σε άλλες κατευθύνσεις.

Ο άνεμος μπορεί επίσης να επηρεάσει την υγρασία των καυσίμων υλικών. Οι ξηροί άνεμοι, ειδικά κατά τη διάρκεια των θερμών και ξηρών εποχών, μπορούν να μειώσουν την υγρασία της βλάστησης και του εδάφους, καθιστώντας τα πιο εύφλεκτα. Αυτό αυξάνει την πιθανότητα ανάφλεξης και τη σοβαρότητα της πυρκαγιάς. Οι ισχυροί άνεμοι μπορούν επίσης να εξατμίσουν την υγρασία από τα καύσιμα υλικά, επιδεινώνοντας τις ξηρές συνθήκες και καθιστώντας την πυρκαγιά πιο δύσκολη στην κατάσβεση.

Ακόμα, οι άνεμοι μπορούν να δημιουργήσουν δευτερεύοντα φαινόμενα που επηρεάζουν την πυρκαγιά. Για παράδειγμα, οι ισχυροί άνεμοι μπορούν να δημιουργήσουν ανεμοστρόβιλους φωτιάς (fire whirls), οι οποίοι μπορούν να μεταφέρουν φλόγες και κάφτρες σε μεγάλες αποστάσεις και να προκαλέσουν σοβαρές καταστροφές σε περιοχές που βρίσκονται μακριά από την κύρια εστία της πυρκαγιάς. Οι ανεμοστρόβιλοι φωτιάς είναι εξαιρετικά επικίνδυνοι και απρόβλεπτοι, δυσκολεύοντας ακόμη περισσότερο τις προσπάθειες κατάσβεσης.

Η μεταβλητότητα του ανέμου είναι ένας ακόμη παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψη. Οι ριπές ανέμου μπορούν να προκαλέσουν ξαφνικές και απρόβλεπτες αλλαγές στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, καθιστώντας τις προβλέψεις για την εξάπλωση της φωτιάς πολύ δύσκολες. Οι μεταβαλλόμενες συνθήκες ανέμου μπορούν να οδηγήσουν σε γρήγορες αλλαγές στη διεύθυνση της φωτιάς, προκαλώντας έκπληξη στους πυροσβέστες και καθιστώντας τον συντονισμό των επιχειρήσεων κατάσβεσης πιο περίπλοκο.

Ο άνεμος μπορεί επίσης να επηρεάσει την απόδοση των πυροσβεστικών μέσων και την ασφάλεια των πυροσβεστών. Οι ισχυροί άνεμοι μπορούν να δυσκολέψουν τη χρήση αεροσκαφών πυρόσβεσης, καθώς οι συνθήκες πτήσης μπορεί να γίνουν επικίνδυνες και η ακρίβεια των ρίψεων νερού ή επιβραδυντικών υλικών να μειωθεί. Επιπλέον, οι άνεμοι μπορούν να δυσκολέψουν την κίνηση των επίγειων δυνάμεων, καθιστώντας δύσκολη την προσέγγιση των εστιών της πυρκαγιάς και την εκτέλεση των απαραίτητων επιχειρήσεων κατάσβεσης.

Η αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών υπό συνθήκες ισχυρών ανέμων απαιτεί εξαιρετική προσοχή και συντονισμό. Οι πυροσβεστικές δυνάμεις πρέπει να είναι προετοιμασμένες για απρόβλεπτες αλλαγές και να έχουν σχέδια έκτακτης ανάγκης για την ασφαλή εκκένωση των πυροσβεστών και των πολιτών. Η χρήση τεχνολογίας για την παρακολούθηση των ανέμων και την πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική διαχείριση των πυρκαγιών.

Συνολικά, ο άνεμος είναι ένας από τους πιο σημαντικούς και σύνθετους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών. Η ταχύτητα, η κατεύθυνση, η μεταβλητότητα και η επίδραση στην υγρασία των καυσίμων υλικών καθορίζουν τον ρυθμό εξάπλωσης, την ένταση και την έκταση των πυρκαγιών. Η κατανόηση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ανέμου είναι κρίσιμες για την αποτελεσματική πρόληψη, ανίχνευση και καταστολή των δασικών πυρκαγιών, καθώς και για την ασφάλεια των πυροσβεστών και των κοινοτήτων που απειλούνται από αυτές.

### **2.3.2 Θερμοκρασία**

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά και την εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών, επηρεάζοντας τόσο τις φυσικές συνθήκες της βλάστησης όσο και τις δυναμικές της φωτιάς. Καταρχάς, η υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος μειώνει την υγρασία των καυσίμων υλικών, όπως φύλλα, χόρτα, θάμνοι και δέντρα. Όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, η υγρασία εξατμίζεται από τα καύσιμα υλικά, καθιστώντας τα πιο εύφλεκτα και ευάλωτα στην ανάφλεξη. Αυτό σημαίνει ότι η πιθανότητα ένα τυχαίο γεγονός, όπως ένας κεραυνός ή μια σπίθα, να προκαλέσει πυρκαγιά είναι σημαντικά αυξημένη.

Επιπλέον, η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να ενισχύσει την ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς. Τα καύσιμα υλικά που βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες χρειάζονται λιγότερη ενέργεια για να αναφλεγούν, γεγονός που σημαίνει ότι η φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί ταχύτερα από το ένα σημείο στο άλλο. Αυτό αυξάνει την ταχύτητα με την οποία η πυρκαγιά καταναλώνει την διαθέσιμη βλάστηση, καθιστώντας την πιο δύσκολη στην κατάσβεση. Η αυξημένη θερμοκρασία περιβάλλοντος ενισχύει επίσης την ένταση της πυρκαγιάς. Οι φλόγες καίνε με μεγαλύτερη θερμοκρασία και απελευθερώνουν περισσότερη θερμότητα, προκαλώντας μεγαλύτερες ζημιές στη βλάστηση και στο έδαφος. Αυτό όχι μόνο αυξάνει την καταστροφική δύναμη της πυρκαγιάς αλλά και τις προκλήσεις για τους πυροσβέστες που προσπαθούν να την περιορίσουν.

Οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν και την ίδια τη δυναμική της φωτιάς. Σε υψηλές θερμοκρασίες, η ατμόσφαιρα γύρω από τη φωτιά γίνεται πιο ξηρή και ευνοεί την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Η ζεστή ατμόσφαιρα μπορεί να προκαλέσει ανοδικά ρεύματα, τα οποία ενισχύουν την καύση και την εξάπλωση της φωτιάς. Αυτά τα ανοδικά ρεύματα μπορούν να δημιουργήσουν πυροκλαστικά φαινόμενα, όπως ανεμοστρόβιλους φωτιάς, που καθιστούν την πυρκαγιά ακόμη πιο απρόβλεπτη και επικίνδυνη. Επιπλέον, η υψηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσει την αντοχή και την απόδοση των

πυροσβεστών. Οι συνθήκες εργασίας σε περιβάλλοντα με υψηλές θερμοκρασίες είναι εξαιρετικά δύσκολες και απαιτούν αυξημένη φυσική αντοχή και προσοχή από τους πυροσβέστες. Ο κίνδυνος θερμοπληξίας και εξάντλησης αυξάνεται, περιορίζοντας την ικανότητά τους να εργάζονται αποτελεσματικά για παρατεταμένες περιόδους.

Η διαχείριση των δασικών πυρκαγιών σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και εκτέλεση. Οι πυροσβεστικές δυνάμεις πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις θερμοκρασίες κατά τον σχεδιασμό των επιχειρήσεων κατάσβεσης και να εξασφαλίζουν ότι οι πυροσβέστες έχουν επαρκή διαλείμματα, υδροδότηση και προστασία από τη ζέστη. Η χρήση τεχνολογίας, όπως δορυφορικές παρακολουθήσεις και μετεωρολογικά μοντέλα, μπορεί να βοηθήσει στην πρόβλεψη των θερμοκρασιών και στην προετοιμασία για ενδεχόμενες αλλαγές στις συνθήκες της πυρκαγιάς. Οι υψηλές θερμοκρασίες επηρεάζουν επίσης την αποτελεσματικότητα των μέτρων κατάσβεσης. Το νερό και τα επιβραδυντικά υλικά μπορεί να εξατμίζονται γρηγορότερα, μειώνοντας την αποτελεσματικότητά τους στην κατάσβεση της φωτιάς. Οι πυροσβεστικές δυνάμεις πρέπει να προσαρμόζουν τις στρατηγικές τους για να αντισταθμίσουν αυτές τις απώλειες και να διασφαλίζουν ότι οι προσπάθειές τους παραμένουν αποτελεσματικές.

Ακόμη, η αυξημένη θερμοκρασία περιβάλλοντος μπορεί να επηρεάσει την αναγέννηση του δάσους μετά την πυρκαγιά. Οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να καταστρέψουν τους σπόρους και τα νεαρά φυτά που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους, καθυστερώντας την φυσική αναγέννηση της βλάστησης. Αυτό μπορεί να έχει μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στο οικοσύστημα, καθώς η αργή αποκατάσταση της βλάστησης μπορεί να επηρεάσει την πανίδα και τη συνολική υγεία του δάσους.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος επηρεάζει επίσης την κοινωνικοοικονομική διάσταση των δασικών πυρκαγιών. Οι υψηλές θερμοκρασίες μπορούν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερες και πιο καταστροφικές πυρκαγιές, αυξάνοντας τα κόστη αποκατάστασης και τις ζημιές στις περιουσίες και τις υποδομές. Οι τοπικές κοινότητες μπορεί να αντιμετωπίσουν απώλειες εισοδήματος από τον τουρισμό, τη γεωργία και άλλες δραστηριότητες που εξαρτώνται από το δάσος. Η υγεία των κατοίκων μπορεί επίσης να επηρεαστεί από την παρατεταμένη έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες και τον καπνό από τις πυρκαγιές, προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα και άλλες ασθένειες.

Η θερμοκρασία περιβάλλοντος αποτελεί έναν κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει κάθε πτυχή των δασικών πυρκαγιών. Από την ανάφλεξη και την εξάπλωση μέχρι την ένταση και την αποκατάσταση μετά την πυρκαγιά, οι υψηλές θερμοκρασίες ενισχύουν τις

δυσκολίες και τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι πυροσβεστικές δυνάμεις και οι κοινότητες.

### 2.3.3 Υγρασία

Η υγρασία διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά και την εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών, καθώς επηρεάζει άμεσα την ευφλεκτότητα των καυσίμων υλικών και την ένταση της καύσης. Η υγρασία του αέρα και η υγρασία των καυσίμων υλικών, όπως τα φύλλα, τα κλαδιά, τα δέντρα και το έδαφος, είναι δύο βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη δυναμική της φωτιάς.

Όταν η υγρασία του αέρα είναι υψηλή, τα καύσιμα υλικά απορροφούν υγρασία από την ατμόσφαιρα, γεγονός που τα καθιστά λιγότερο εύφλεκτα. Η υγρασία δημιουργεί μια φυσική ασπίδα γύρω από τα καύσιμα υλικά, εμποδίζοντας την ανάφλεξή τους και καθυστερώντας την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Σε αντίθεση, όταν η υγρασία του αέρα είναι χαμηλή, τα καύσιμα υλικά χάνουν την υγρασία τους και γίνονται πιο ξηρά και εύφλεκτα, αυξάνοντας την πιθανότητα ανάφλεξης από μια σπίθα, έναν κεραυνό ή άλλες πηγές ανάφλεξης.

Η υγρασία των καυσίμων υλικών, όπως οι φύλλοι και τα ξηρά χόρτα, επηρεάζει επίσης την ένταση της πυρκαγιάς. Τα ξηρά καύσιμα καίγονται πιο γρήγορα και παράγουν υψηλότερες θερμοκρασίες, καθιστώντας τη φωτιά πιο έντονη και καταστροφική. Η υψηλή ένταση της πυρκαγιάς αυξάνει τη θερμική ακτινοβολία και την ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς, καθιστώντας την πιο δύσκολη στην κατάσβεση και ενισχύοντας την απειλή για τις ανθρώπινες ζωές, τις περιουσίες και τα οικοσυστήματα.

Η υγρασία επηρεάζει επίσης τη δημιουργία και την εξάπλωση των καπνών και των αιωρούμενων σωματιδίων. Όταν η υγρασία είναι υψηλή, η παραγωγή καπνού είναι λιγότερο έντονη και η διάχυση των σωματιδίων είναι πιο αργή, μειώνοντας την ατμοσφαιρική ρύπανση και τα αναπνευστικά προβλήματα για τους ανθρώπους που ζουν κοντά στην πυρκαγιά. Αντίθετα, σε χαμηλή υγρασία, ο καπνός διαχέεται ευκολότερα και τα αιωρούμενα σωματίδια παραμένουν στην ατμόσφαιρα για περισσότερο χρόνο, προκαλώντας σοβαρά προβλήματα υγείας.

Η διαχείριση των δασικών πυρκαγιών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες υγρασίας. Οι πυροσβεστικές δυνάμεις χρησιμοποιούν μετρήσεις υγρασίας για να προβλέψουν τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς και να σχεδιάσουν τις επιχειρήσεις κατάσβεσης. Σε περιόδους υψηλής υγρασίας, οι φωτιές είναι γενικά πιο εύκολο να κατασταλούν, καθώς η υγρασία επιβραδύνει την εξάπλωση της φωτιάς και μειώνει την

έντασή της. Αντίθετα, σε περιόδους χαμηλής υγρασίας, οι φωτιές μπορούν να εξαπλωθούν γρήγορα και να γίνουν ανεξέλεγκτες, απαιτώντας μεγαλύτερη προσπάθεια και πόρους για την κατάσβεσή τους.

Οι αλλαγές στην υγρασία μπορούν να προκαλέσουν απρόβλεπτες μεταβολές στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Για παράδειγμα, μια ξαφνική πτώση της υγρασίας μπορεί να μετατρέψει μια ήρεμη πυρκαγιά σε ένα εκρηκτικό μέτωπο φωτιάς, ενώ η άνοδος της υγρασίας μπορεί να μειώσει την ένταση της πυρκαγιάς και να διευκολύνει τις προσπάθειες κατάσβεσης. Οι πυροσβεστικές δυνάμεις πρέπει να παρακολουθούν συνεχώς τις αλλαγές στην υγρασία και να προσαρμόζουν τις στρατηγικές τους ανάλογα για να διασφαλίζουν την αποτελεσματικότητα των επιχειρήσεων κατάσβεσης και την ασφάλεια των πυροσβεστών.

Η υγρασία του εδάφους είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τις δασικές πυρκαγιές. Η υγρασία του εδάφους επηρεάζει την ανάπτυξη της βλάστησης και την διαθεσιμότητα καυσίμων υλικών. Σε περιόδους ξηρασίας, η χαμηλή υγρασία του εδάφους μειώνει την ανάπτυξη της βλάστησης και καθιστά τα καύσιμα υλικά πιο ξηρά και εύφλεκτα, αυξάνοντας τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Αντίθετα, όταν η υγρασία του εδάφους είναι υψηλή, η βλάστηση αναπτύσσεται καλύτερα και παραμένει πιο υγρή, μειώνοντας την πιθανότητα ανάφλεξης και την ένταση της πυρκαγιάς.

Η υγρασία επηρεάζει επίσης την αναγέννηση των οικοσυστημάτων μετά από μια πυρκαγιά. Η υψηλή υγρασία του εδάφους μπορεί να βοηθήσει στην ταχύτερη ανάκαμψη της βλάστησης και στην αποκατάσταση της φυσικής ισορροπίας του δάσους. Αντίθετα, σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας, η αναγέννηση μπορεί να είναι αργή και δύσκολη, επηρεάζοντας αρνητικά την βιοποικιλότητα και την υγεία του οικοσυστήματος.

Η κατανόηση και η διαχείριση της υγρασίας είναι κρίσιμες για την αποτελεσματική πρόληψη και καταστολή των δασικών πυρκαγιών. Οι δασολόγοι, οι μετεωρολόγοι και οι πυροσβεστικές δυνάμεις συνεργάζονται για να παρακολουθούν τις συνθήκες υγρασίας και να προβλέπουν τις μεταβολές που μπορεί να επηρεάσουν τη συμπεριφορά της φωτιάς. Η χρήση τεχνολογιών, όπως οι δορυφορικές εικόνες και τα μετεωρολογικά μοντέλα, βοηθά στην ακριβή πρόβλεψη της υγρασίας και στην προετοιμασία για ενδεχόμενες αλλαγές στις συνθήκες της πυρκαγιάς.

#### **2.3.4 Τοπογραφία**

Η τοπογραφία έχει ζωτικό ρόλο στη συμπεριφορά και την εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών, επηρεάζοντας την ταχύτητα, την κατεύθυνση και την ένταση της φωτιάς. Η τοπογραφία περιλαμβάνει τη μορφολογία του εδάφους, όπως οι κλίσεις, τα υψώματα, οι

κοιλιάδες και οι λόφοι, και καθορίζει πώς η φωτιά διασχίζει το τοπίο. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η τοπογραφία επηρεάζει τις δασικές πυρκαγιές είναι απαραίτητη για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους και τη στρατηγική κατάσβεσης.

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες είναι η κλίση του εδάφους. Οι φωτιές κινούνται γρηγορότερα και με μεγαλύτερη ένταση σε ανηφορικές πλαγιές λόγω της επίδρασης της ακτινοβολούμενης θερμότητας και της προσκόλλησης των φλογών στα καύσιμα υλικά. Η θερμότητα από τις φλόγες προθερμαίνει και αφυδατώνει τα καύσιμα υλικά που βρίσκονται πιο πάνω στην πλαγιά, καθιστώντας τα πιο εύφλεκτα και επιταχύνοντας την εξάπλωση της φωτιάς. Αυτό σημαίνει ότι οι φωτιές μπορούν να γίνουν ανεξέλεγκτες σε ανηφορικές πλαγιές και να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα στην κατάσβεσή τους.

Αντίθετα, οι φωτιές κινούνται πιο αργά σε κατηφορικές πλαγιές, καθώς η θερμότητα από τις φλόγες δεν προθερμαίνει τα καύσιμα υλικά με τον ίδιο τρόπο. Η φωτιά σε κατηφορικές πλαγιές έχει την τάση να είναι λιγότερο έντονη και πιο διαχειρίσιμη, δίνοντας στις πυροσβεστικές δυνάμεις περισσότερο χρόνο για να αντιδράσουν και να περιορίσουν την εξάπλωση της. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει ότι οι κατηφορικές πυρκαγιές είναι ακίνδυνες, καθώς η κατεύθυνση του ανέμου και άλλοι παράγοντες μπορούν να ενισχύσουν την έντασή τους.

Οι κοιλάδες και τα φαράγγια μπορούν επίσης να επηρεάσουν σημαντικά τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Αυτές οι γεωμορφολογικές δομές λειτουργούν ως φυσικά κανάλια για τον άνεμο, ο οποίος μπορεί να επιταχύνει την εξάπλωση της φωτιάς. Οι άνεμοι που περνούν μέσα από στενές κοιλάδες και φαράγγια μπορούν να ενισχύσουν τη φωτιά και να την κατευθύνουν γρήγορα μέσω του τοπίου. Επιπλέον, οι κοιλάδες μπορούν να παγιδεύσουν τη θερμότητα και τον καπνό, δημιουργώντας ένα θερμοκρασιακό μικροκλίμα που ενισχύει την καύση και δυσχεραίνει τις προσπάθειες κατάσβεσης.

Οι κορυφογραμμές και οι λόφοι μπορούν να επηρεάσουν τη διάδοση της πυρκαγιάς, καθώς λειτουργούν ως φυσικά εμπόδια. Οι φωτιές που πλησιάζουν μια κορυφογραμμή τείνουν να μειώνουν την ταχύτητά τους, καθώς η θερμότητα και οι φλόγες δυσκολεύονται να διασχίσουν την κορυφογραμμή. Ωστόσο, μόλις η φωτιά περάσει την κορυφογραμμή, μπορεί να ανακτήσει ταχύτητα και ένταση, ειδικά αν υπάρχουν καύσιμα υλικά στην άλλη πλευρά. Οι πυροσβεστικές δυνάμεις χρησιμοποιούν συχνά τις κορυφογραμμές ως φυσικά σημεία ελέγχου για να περιορίσουν την εξάπλωση της φωτιάς.



Οι αλλαγές στην τοπογραφία μπορούν να δημιουργήσουν μικροκλίματα που επηρεάζουν την υγρασία και τη θερμοκρασία, δύο σημαντικούς παράγοντες για την καύση. Οι περιοχές με υψηλότερη υγρασία, όπως οι κοιλάδες που συγκεντρώνουν νερό και υγρασία, έχουν λιγότερο εύφλεκτα καύσιμα υλικά και μπορεί να λειτουργούν ως φυσικά φράγματα για τη φωτιά. Αντίθετα, οι ξηρές πλαγιές και τα εκτεθειμένα υψώματα είναι πιο ευάλωτα στην ανάφλεξη και την εξάπλωση της φωτιάς λόγω της χαμηλότερης υγρασίας και της υψηλότερης θερμοκρασίας.

Η τοπογραφία μπορεί επίσης να επηρεάσει τη συμπεριφορά των φλογών και την παραγωγή θερμότητας. Σε περιοχές με απότομες πλαγιές, οι φλόγες μπορεί να δημιουργήσουν φαινόμενα καταρρακτώδους καύσης, όπου η φωτιά καίει με εξαιρετικά υψηλή ένταση και θερμοκρασία. Αυτά τα φαινόμενα μπορεί να είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για τις πυροσβεστικές δυνάμεις, καθώς η ταχύτητα και η ένταση της φωτιάς αυξάνουν τον κίνδυνο για τις ζωές των πυροσβεστών και δυσκολεύουν τις επιχειρήσεις κατάσβεσης.

Οι φωτιές σε ορεινές περιοχές και δασικές εκτάσεις με έντονη τοπογραφία μπορεί να δημιουργήσουν μοναδικές προκλήσεις για την πρόσβαση και την κινητοποίηση των πυροσβεστικών δυνάμεων. Οι απότομες πλαγιές, οι στενοί δρόμοι και τα δύσβατα μονοπάτια καθιστούν δύσκολη την προσέγγιση των σημείων της πυρκαγιάς και τη μεταφορά του εξοπλισμού. Οι πυροσβέστες πρέπει να προσαρμόζουν τις τακτικές τους για να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις, χρησιμοποιώντας εναέριες δυνάμεις και ειδικά οχήματα για την κατάσβεση της φωτιάς.

Η τοπογραφία μπορεί επίσης να επηρεάσει την αποκατάσταση του οικοσυστήματος μετά την πυρκαγιά. Οι απότομες πλαγιές και τα εκτεθειμένα εδάφη είναι πιο επιρρεπή στη διάβρωση και τη μετακίνηση του εδάφους, γεγονός που μπορεί να καθυστερήσει την φυσική αναγέννηση της βλάστησης και να προκαλέσει περαιτέρω ζημιές στο περιβάλλον. Η διαχείριση των πληγείσων περιοχών απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και αποκατάσταση για να διασφαλιστεί η επιστροφή της βιοποικιλότητας και η σταθεροποίηση του εδάφους.

### **2.3.5 Καύσιμη ύλη**

Η καύσιμη ύλη είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες που καθορίζουν τη συμπεριφορά και την εξέλιξη μιας δασικής πυρκαγιάς. Η καύσιμη ύλη αναφέρεται σε όλα τα οργανικά υλικά που μπορούν να καούν, όπως τα δέντρα, οι θάμνοι, τα φύλλα, τα κλαδιά, το χόρτο και το στρώμα νεκρής βιομάζας στο έδαφος. Η ποικιλία και η κατανομή αυτών των υλικών επηρεάζουν την ένταση της πυρκαγιάς, την ταχύτητα εξάπλωσής της, καθώς και τις στρατηγικές που χρησιμοποιούνται για την κατάσβεσή της.

Η πυκνότητα της καύσιμης ύλης είναι ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που καθορίζουν την ένταση μιας δασικής πυρκαγιάς. Σε περιοχές με υψηλή πυκνότητα βλάστησης, όπως δάση με πυκνά δέντρα και θάμνους, η φωτιά μπορεί να αναπτυχθεί και να εξαπλωθεί γρήγορα λόγω της μεγάλης ποσότητας διαθέσιμης καύσιμης ύλης. Η πυκνή βλάστηση επιτρέπει τη φωτιά να μεταδοθεί εύκολα από το ένα φυτό στο άλλο, δημιουργώντας μεγάλες και έντονες φωτιές που είναι δύσκολο να ελεγχθούν. Αντίθετα, σε περιοχές με αραιή βλάστηση, η φωτιά έχει λιγότερα καύσιμα υλικά για να καεί, γεγονός που μειώνει την ένταση και την ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς.

Η υγρασία της καύσιμης ύλης επηρεάζει άμεσα την ευφλεκτότητα της. Τα ξηρά καύσιμα υλικά, όπως τα φύλλα και τα κλαδιά που έχουν χάσει την υγρασία τους, είναι πιο εύφλεκτα και καίγονται πιο γρήγορα και έντονα. Σε περιόδους ξηρασίας, όταν η υγρασία της καύσιμης ύλης είναι χαμηλή, ο κίνδυνος δασικών πυρκαγιών αυξάνεται δραματικά. Αντίθετα, τα υγρά καύσιμα υλικά, όπως τα φρέσκα φύλλα και τα πράσινα φυτά, είναι λιγότερο εύφλεκτα και καίγονται πιο αργά, γεγονός που μπορεί να καθυστερήσει την εξάπλωση της φωτιάς και να μειώσει την έντασή της.

Η δομή της καύσιμης ύλης είναι επίσης σημαντική για την εξέλιξη της πυρκαγιάς. Η δομή αναφέρεται στην κατανομή και την οργάνωση των καυσίμων υλικών στο χώρο. Οι διαφορετικοί τύποι καυσίμων υλικών καίγονται με διαφορετικό τρόπο και συμβάλλουν στην ποικιλία της φωτιάς. Για παράδειγμα, τα λεπτά καύσιμα υλικά, όπως τα φύλλα και τα μικρά κλαδιά, καίγονται γρήγορα και παράγουν υψηλή θερμοκρασία, ενώ τα χοντρά καύσιμα υλικά, όπως οι κορμοί των δέντρων, καίγονται πιο αργά και παράγουν σταθερή θερμότητα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Η παρουσία διαφορετικών τύπων καυσίμων υλικών μπορεί να δημιουργήσει εναλλαγές στην ένταση της φωτιάς και να επηρεάσει τη στρατηγική κατάσβεσης.

Η κατανομή της καύσιμης ύλης στο έδαφος και το ύψος της βλάστησης επηρεάζουν επίσης την εξάπλωση της φωτιάς. Η χαμηλή βλάστηση, όπως το χόρτο και τα μικρά φυτά, καίγεται γρήγορα και μπορεί να λειτουργήσει ως γέφυρα για τη μετάδοση της φωτιάς σε υψηλότερα επίπεδα βλάστησης, όπως οι θάμνοι και τα δέντρα. Οι φωτιές που ξεκινούν στο έδαφος μπορούν να εξαπλωθούν γρήγορα προς τα πάνω, δημιουργώντας δασικές πυρκαγιές που καίνε τα δέντρα και τη θαμνώδη βλάστηση. Αντίθετα, η έλλειψη χαμηλής βλάστησης μπορεί να περιορίσει την εξάπλωση της φωτιάς και να τη διατηρήσει στο επίπεδο του εδάφους, καθιστώντας την πιο διαχωρίσιμη.

Η παρουσία νεκρής βιομάζας στο έδαφος, όπως τα πεσμένα φύλλα, τα κλαδιά και το ξηρό χόρτο, μπορεί να ενισχύσει την ένταση και την εξάπλωση της φωτιάς. Αυτά τα υλικά είναι συχνά πολύ ξηρά και εύφλεκτα, δημιουργώντας ένα εύφλεκτο στρώμα στο έδαφος που μπορεί να λειτουργήσει ως πυροδότης για την ανάπτυξη της πυρκαγιάς. Οι φωτιές που ξεκινούν από τη νεκρή βιομάζα μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα και να εξαπλωθούν σε μεγαλύτερες περιοχές, δημιουργώντας σοβαρά προβλήματα για τις πυροσβεστικές δυνάμεις.

Η σύνθεση της καύσιμης ύλης, δηλαδή τα είδη των φυτών και των δέντρων που συνθέτουν τη βλάστηση, επηρεάζει επίσης τη συμπεριφορά της φωτιάς. Ορισμένα φυτά και δέντρα είναι πιο εύφλεκτα από άλλα λόγω της χημικής τους σύνθεσης. Για παράδειγμα, τα πευκοδάση είναι γνωστά για την υψηλή τους εύφλεκτη ρητίνη, που κάνει τα πεύκα να καίγονται πολύ έντονα. Αντίθετα, τα δάση από δρυς έχουν λιγότερο εύφλεκτη βιομάζα και τείνουν να καίγονται πιο αργά και με χαμηλότερη ένταση. Η ποικιλία της βλάστησης σε μια δασική περιοχή μπορεί να δημιουργήσει διαφοροποιήσεις στην ένταση και την εξάπλωση της φωτιάς.

Η διαχείριση της καύσιμης ύλης είναι ένας βασικός παράγοντας για την πρόληψη και την καταστολή των δασικών πυρκαγιών. Οι πρακτικές διαχείρισης, όπως η απομάκρυνση της νεκρής βιομάζας, η αραίωση της βλάστησης και η χρήση ελεγχόμενων καύσεων, μπορούν να μειώσουν την ποσότητα και την ευφλεκτότητα των καυσίμων υλικών και να περιορίσουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Η απομάκρυνση της υπερβολικής βλάστησης και η δημιουργία πυροδιαχωριστικών ζωνών μπορούν να εμποδίσουν την εξάπλωση της φωτιάς και να διευκολύνουν τις επιχειρήσεις κατάσβεσης.

Η κατανόηση της σχέσης μεταξύ της καύσιμης ύλης και της δασικής πυρκαγιάς είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική διαχείριση των δασικών εκτάσεων και την προστασία του περιβάλλοντος και των ανθρώπινων κοινοτήτων. Η ανάλυση της καύσιμης ύλης, η παρακολούθηση των συνθηκών υγρασίας και η χρήση κατάλληλων στρατηγικών διαχείρισης μπορούν να συμβάλλουν στην πρόληψη μεγάλων και καταστροφικών δασικών πυρκαγιών. Επιπλέον, η εκπαίδευση και η ενημέρωση του κοινού σχετικά με την καύσιμη ύλη και τον κίνδυνο πυρκαγιάς μπορούν να ενισχύσουν τις προσπάθειες πρόληψης και να μειώσουν τις απώλειες από δασικές πυρκαγιές..

### **2.3.6 Ατμοσφαιρική κατάσταση**

Η ατμοσφαιρική ευστάθεια ή αστάθεια παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών, επηρεάζοντας την ένταση, την εξάπλωση και την επικινδυνότητά

τους. Η ατμοσφαιρική ευστάθεια αναφέρεται στην τάση της ατμόσφαιρας να αντιστέκεται στην κάθετη μετακίνηση των αέριων μαζών, ενώ η ατμοσφαιρική αστάθεια αναφέρεται στην τάση της ατμόσφαιρας να ευνοεί την κάθετη μετακίνηση αυτών των μαζών. Η κατανόηση αυτών των φαινομένων είναι κρίσιμη για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών και την αποτελεσματική διαχείριση τους.

Σε μια ατμοσφαιρικά ευσταθή κατάσταση, οι αέριες μάζες τείνουν να παραμένουν στην ίδια υψομετρική θέση λόγω της έλλειψης κατακόρυφης κίνησης. Αυτό σημαίνει ότι η θερμότητα και ο καπνός από μια δασική πυρκαγιά δεν ανεβαίνουν εύκολα, δημιουργώντας ένα στρώμα θερμού αέρα και καπνού κοντά στο έδαφος. Η έλλειψη κατακόρυφης κίνησης περιορίζει την εξάπλωση της φωτιάς, καθώς η θερμότητα και οι φλόγες δεν μεταφέρονται εύκολα σε υψηλότερα επίπεδα βλάστησης. Ωστόσο, αυτή η κατάσταση μπορεί να αυξήσει την πυκνότητα του καπνού κοντά στο έδαφος, μειώνοντας την ορατότητα και καθιστώντας πιο δύσκολη την αναπνοή για τους πυροσβέστες και τους κατοίκους της περιοχής. Επιπλέον, η συγκέντρωση θερμότητας και καπνού μπορεί να δημιουργήσει θερμικό φορτίο στο έδαφος, προκαλώντας μεγαλύτερη ζημιά στη χαμηλή βλάστηση και στο έδαφος.

Αντίθετα, σε μια ατμοσφαιρικά ασταθή κατάσταση, οι αέριες μάζες είναι πιο επιρρεπείς σε κατακόρυφη μετακίνηση, καθώς η θερμότητα και η ενέργεια από τη φωτιά δημιουργούν ανοδικά ρεύματα. Αυτά τα ανοδικά ρεύματα ανεβάζουν τον καπνό και τη θερμότητα σε μεγαλύτερα ύψη, επιτρέποντας τη δημιουργία μεγάλων και δυνατών φλογών που μπορούν να εξαπλωθούν γρήγορα και να αναφλέξουν τη βλάστηση σε μεγαλύτερα ύψη. Η ατμοσφαιρική αστάθεια μπορεί να δημιουργήσει ισχυρές αναταράξεις και ανέμους, ενισχύοντας την εξάπλωση της φωτιάς και καθιστώντας την πιο απρόβλεπτη και επικίνδυνη. Οι φωτιές σε ασταθείς συνθήκες τείνουν να είναι πιο έντονες και δύσκολες στον έλεγχο, απαιτώντας πιο επιθετικές και σύνθετες στρατηγικές κατάσβεσης.

Η ατμοσφαιρική αστάθεια μπορεί επίσης να συμβάλει στη δημιουργία και την ανάπτυξη μεγάλων πυρονεφών (pyrocumulus), τα οποία είναι νέφη που δημιουργούνται από την έντονη θερμότητα και τον καπνό της φωτιάς. Αυτά τα νέφη μπορούν να φτάσουν σε μεγάλα ύψη και να προκαλέσουν επιπλέον αστάθεια στην ατμόσφαιρα, δημιουργώντας ισχυρούς ανέμους και αναταράξεις που ενισχύουν περαιτέρω την εξάπλωση της φωτιάς. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα πυρονεφών μπορούν να προκαλέσουν και κεραυνούς, οι οποίοι μπορεί να ανάψουν νέες εστίες φωτιάς μακριά από την κύρια περιοχή της πυρκαγιάς, καθιστώντας την κατάσταση ακόμα πιο δύσκολη για τις πυροσβεστικές δυνάμεις.

Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ευστάθειας και αστάθειας μπορεί επίσης να εξαρτάται από την τοπογραφία της περιοχής. Σε ορεινές περιοχές, η ατμοσφαιρική αστάθεια μπορεί να προκαλέσει την ταχεία εξάπλωση της φωτιάς προς τις κορυφογραμμές και τις κοιλάδες, ενώ η ατμοσφαιρική ευστάθεια μπορεί να περιορίσει την εξάπλωση της φωτιάς σε χαμηλότερα υψόμετρα. Οι διαφορετικές τοπογραφικές δομές μπορούν να ενισχύσουν ή να μειώσουν την επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών, καθιστώντας την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της φωτιάς ακόμη πιο περίπλοκη.

Η κατανόηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική διαχείριση των δασικών πυρκαγιών. Οι μετεωρολόγοι και οι πυροσβέστες χρησιμοποιούν ειδικά μοντέλα πρόγνωσης για να αναλύσουν τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και να προβλέψουν τη συμπεριφορά της φωτιάς. Αυτές οι προβλέψεις βοηθούν στον σχεδιασμό των επιχειρήσεων κατάσβεσης και στην προστασία των ανθρώπων και των περιουσιών. Σε συνθήκες ατμοσφαιρικής αστάθειας, οι πυροσβέστες πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεκτικοί και να προετοιμάζονται για την ταχεία εξάπλωση της φωτιάς και τις απρόβλεπτες αλλαγές στην κατεύθυνση της.

Η ατμοσφαιρική ευστάθεια ή αστάθεια δεν επηρεάζει μόνο την εξάπλωση της φωτιάς, αλλά και την επιβίωση της βλάστησης και της πανίδας μετά την πυρκαγιά. Οι φωτιές που αναπτύσσονται σε ατμοσφαιρικά ασταθείς συνθήκες είναι συχνά πιο καταστροφικές και μπορούν να προκαλέσουν μεγαλύτερη απώλεια φυτικής και ζωικής ζωής. Η υψηλή ένταση της φωτιάς μπορεί να καταστρέψει τις ρίζες των φυτών και να μειώσει τις πιθανότητες φυσικής αναγέννησης της βλάστησης. Αντίθετα, οι φωτιές που αναπτύσσονται σε ατμοσφαιρικά ευσταθείς συνθήκες τείνουν να είναι λιγότερο έντονες και να προκαλούν λιγότερη ζημιά στη βλάστηση, επιτρέποντας την ταχύτερη ανάκαμψη του οικοσυστήματος.

Η επίδραση της ατμοσφαιρικής ευστάθειας και αστάθειας στην υγεία και την ασφάλεια των ανθρώπων είναι επίσης σημαντική. Οι φωτιές σε ατμοσφαιρικά ασταθείς συνθήκες παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες καπνού και τοξικών αερίων, που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του αέρα και την υγεία των κατοίκων της περιοχής. Ο καπνός μπορεί να προκαλέσει αναπνευστικά προβλήματα, καρδιακές παθήσεις και άλλες σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία. Οι πυροσβέστες και οι κάτοικοι πρέπει να λαμβάνουν μέτρα προστασίας, όπως η χρήση μασκών και η αποφυγή της έκθεσης στον καπνό, για να μειώσουν τους κινδύνους για την υγεία τους.

Η ατμοσφαιρική ευστάθεια ή αστάθεια μπορεί επίσης να επηρεάσει την οικονομική και κοινωνική διάσταση των δασικών πυρκαγιών. Οι καταστροφικές φωτιές σε ατμοσφαιρικά ασταθείς συνθήκες μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες απώλειες σε περιουσίες, υποδομές και φυσικούς πόρους, επηρεάζοντας την οικονομία της περιοχής και τη ζωή των κατοίκων. Οι κυβερνήσεις και οι αρμόδιοι φορείς πρέπει να προετοιμάζονται για τις οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών και να παρέχουν υποστήριξη στις πληγείσες κοινότητες.

### **2.3.7 Κλιματική αλλαγή**

Η επιστημονική κοινότητα συγκλίνει (Ηλιόπουλος, 2013) στο ότι, παρά τις διαφοροποιήσεις ανά περιοχή και περίοδο, η σχετική με τις δασικές πυρκαγιές δραστηριότητα έχει ήδη αυξηθεί και αναμένεται να αυξηθεί έτι περαιτέρω λόγω της κλιματικής αλλαγής. Η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερες, σε διάρκεια, περιόδους ξηρασίας. Αποτέλεσμα αυτού είναι η μείωση της υγρασίας της καύσιμης ύλης και, κατά συνέπεια, η αύξηση του κινδύνου εμφάνισης πυρκαγιών, αλλά και της έντασης και διάδοσής τους. Μελέτες έχουν αποδείξει αύξηση του μελλοντικού κινδύνου πυρκαγιάς σε τρεις συνιστώσες: αύξηση των ετών με αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιάς, αύξηση των περιόδων εντός έτους με αυξημένο κίνδυνο πυρκαγιάς και επιδείνωση των ακραίων φαινομένων. Παράλληλα, τα μοτίβα δραστηριότητας των πυρκαγιών αναμένεται να τροποποιηθούν και αυτά, με πολλές από τις πιο έντονες πυρκαγιές να τείνουν να σημειώνονται σε λίγες, κρίσιμες μέρες «ακραίου καιρού πυρκαγιάς (extreme fire weather)».

Επίσης σχετικές έρευνες έχουν καταλήξει στο ότι ο κίνδυνος πυρκαγιάς θα εμφανίσει σταδιακή αύξηση στη μεσογειακή ζώνη, ότι οι περιοχές με ιστορικά χαμηλή επικινδυνότητα σε πυρκαγιές είναι οι πιο ευάλωτες στις μεταβολές λόγω κλιματικής αλλαγής και ότι για κάθε βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας, η βροχόπτωση πρέπει να αυξηθεί περισσότερο από 15% για να αποτρέψει την ξήρανση λόγω της θερμοκρασίας και, κατά συνέπεια, την επικινδυνότητα εμφάνισης πυρκαγιών.

## **2.4 Ποσοτικές παράμετροι συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών**

Στην παράγραφο αυτή θα αναλύσουμε κάποιες ποσοτικές παραμέτρους που μας επιτρέπουν να πολιτικοποιήσουμε ένα σχετικά ποιοτικό χαρακτηριστικό, όπως αυτό της συμπεριφοράς και της επικινδυνότητας μιας δασικής πυρκαγιάς. Με τον τρόπο αυτό

μπορούμε στη συνέχεια να κάνουμε διάφορες συσχετίσεις της συμπεριφοράς της δασικής πυρκαγιάς με βάση την περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης.

#### **2.4.1 Θερμική ένταση πυρκαγιάς**

Η θερμική ένταση της πυρκαγιάς είναι ένα μέτρο της ποσότητας θερμότητας που απελευθερώνεται ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου από μια φλεγόμενη περιοχή. Πρόκειται για μια κρίσιμη παράμετρο που καθορίζει την ένταση και τη συμπεριφορά της φωτιάς, καθώς και τις επιπτώσεις της στο περιβάλλον και στην καταστολή της.

Η θερμική ένταση της πυρκαγιάς συνήθως εκφράζεται σε κιλοβάτ ανά μέτρο ( $\text{kW/m}$ ) και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ποσότητα και ο τύπος της καύσιμης ύλης, οι κλιματολογικές συνθήκες, η τοπογραφία και οι καιρικές συνθήκες κατά την καύση. Οι υψηλότερες τιμές της θερμικής έντασης υποδεικνύουν μια πιο έντονη και ενεργή φωτιά, που μπορεί να προκαλέσει σοβαρές ζημιές και να είναι πιο δύσκολη στον έλεγχο.

Η ποσότητα της καύσιμης ύλης είναι ένας βασικός παράγοντας που επηρεάζει τη θερμική ένταση. Οι περιοχές με πυκνή βλάστηση ή μεγάλες ποσότητες νεκρής βιομάζας έχουν τη δυνατότητα να απελευθερώσουν περισσότερη θερμότητα κατά την καύση, αυξάνοντας τη θερμική ένταση της φωτιάς. Οι διάφοροι τύποι καύσιμης ύλης, όπως τα δέντρα, οι θάμνοι, τα φύλλα και τα χόρτα, καίγονται με διαφορετικούς ρυθμούς και απελευθερώνουν διαφορετικές ποσότητες θερμότητας, επηρεάζοντας έτσι τη θερμική ένταση της πυρκαγιάς.

Οι καιρικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και ο άνεμος, παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στη θερμική ένταση της πυρκαγιάς. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η χαμηλή υγρασία ευνοούν την εξάπλωση της φωτιάς και αυξάνουν τη θερμική ένταση, καθώς η καύσιμη ύλη γίνεται πιο ξηρή και εύφλεκτη. Ο άνεμος μπορεί να ενισχύσει τη φωτιά, προσφέροντας περισσότερο οξυγόνο και προωθώντας τη διάδοση της φλόγας, γεγονός που αυξάνει τη θερμική ένταση.

Η τοπογραφία της περιοχής μπορεί να επηρεάσει την κατανομή και την ένταση της φωτιάς. Σε επικλινείς περιοχές, η φωτιά τείνει να ανεβαίνει τις πλαγιές πιο γρήγορα, λόγω της θερμικής ανόδου, και μπορεί να αυξήσει τη θερμική ένταση. Οι κοιλάδες και οι χαράδρες μπορούν να λειτουργήσουν ως φυσικοί αγωγοί θερμότητας, συγκεντρώνοντας και ενισχύοντας τη φωτιά.

Μια ημι-εμπειρική σχέση που μπορεί να μας οδηγήσει σε εκτίμηση της έντασης της πυρκαγιάς είναι η σχέση του (Rothermel, 1991) που ακολουθεί. Ουσιαστικά αποτυπώνει τη θερμότητα που παράγεται σε ένα δεδομένο μήκος μετώπου και για συγκεκριμένο χρόνο. Λαμβάνει υπόψη το σύνολο της εύφλεκτης ύλης που είναι διαθέσιμη και της μέσης θερμότητας που αυτή παράγει.

$$I = \frac{1}{60} * H * W * R \quad (Εξ. 1)$$

όπου:

$I$ : η θερμική ένταση του μετώπου της πυρκαγιάς  $\left[ \frac{kJ}{sec} \right]$  ή ισοδύναμα  $\left[ \frac{kW}{m} \right]$

$H$ : η θερμότητα που παράγεται ανά μονάδα μάζας καύσιμης ύλης  $\left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

$W$ : η μάζα της διαθέσιμης καύσιμης ύλης ανά μονάδα επιφανείας  $\left[ \frac{kg}{m^2} \right]$

$R$ : η ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς  $\left[ \frac{m}{sec} \right]$

Βέβαια, οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι η παραπάνω υπολογιζόμενη θερμική ένταση δεν είναι και αυτή που αντιμετωπίζουν οι πυροσβεστικές δυνάμεις στο μέτωπο, αλλά μία καλή ένδειξη της εκλυόμενης θερμότητας. Η τελική θερμότητα μεταφέρεται στον άνθρωπο κυρίως δια ακτινοβολίας και σε ορισμένες περιπτώσεις και δια συναγωγής.

#### 2.4.2 Μήκος – ύψος φλόγας

Μια ακόμα παράμετρος, η οποία συνδέεται και με την θερμική ένταση του μετώπου, είναι αυτή του μήκος της φλόγας ( $F$ ). Η ημιεμπειρική σχέση κατά Byram είναι:

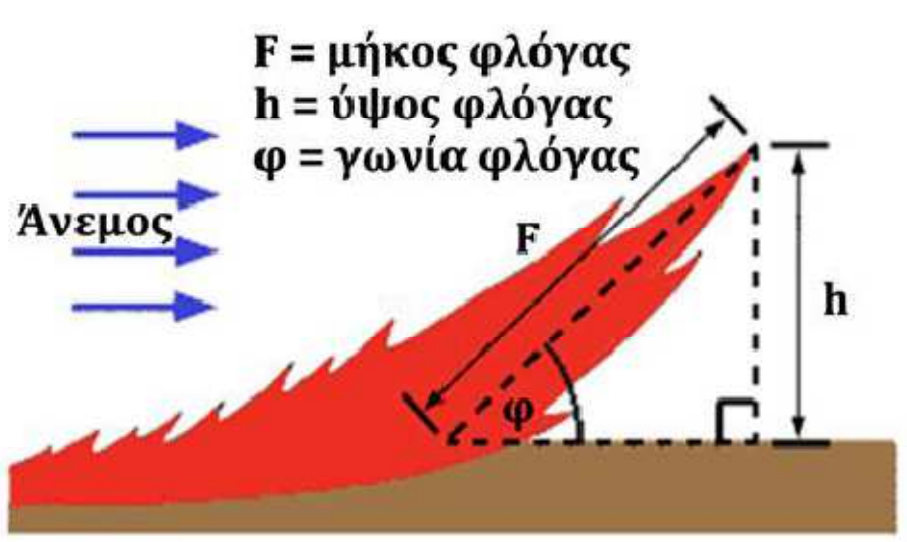
$$F = 0.0775 * I^{0.46} \quad (Εξ. 2)$$

Αντίστοιχα, μπορούμε να υπολογίσουμε και την ένταση του θερμικού μετώπου με βάση το παρατηρούμενο μήκος φλόγας στο πεδίο:

$$I = 300 * F^2 \quad (Εξ. 3)$$

Ως ύψος της φλόγας (flameheight -  $h$ ) ορίζουμε το μέσο ύψος της φλόγας σε [m], όπως αυτό μετράται στον κάθετο άξονα. Μπορεί να είναι μικρότερο από το μήκος της φλόγας σε περίπτωση φλόγας υπό κλίση.





Εικόνα 2.1 Ύψος, μήκος και γωνία φλόγας

Σημειώνεται ότι το ύψος φλόγας μπορεί να ταυτίζεται με το μήκος αυτής, εφόσον το έδαφος είναι οριζόντιο και δεν υπάρχει άνεμος.

#### 2.4.3 Ταχύτητα εξάπλωσης πυρκαγιάς

Εκτός από την θερμική ένταση του μετώπου, μία άλλη σημαντική και συσχετιζόμενη παράμετρος είναι αυτή της ταχύτητας εξάπλωσης της δασικής πυρκαγιάς. Η ημιεμπειρική σχέση κατά (Rothermel, 1972), η οποία βασίζεται στον πρώτο και δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, έχει ως ακολούθως:

$$R = \frac{I_R * \xi * (1 + \varphi_W + \varphi_S)}{\rho_b * \varepsilon * Q_{ig}} \quad (\text{Εξ. 4})$$

όπου:

$R$ : η ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς  $\left[ \frac{m}{\min} \right]$

$I_R$ : η θερμική ένταση αντίδρασης (reaction intensity)  $\left[ \frac{kW}{m^2} \right]$

$\xi$ : η αναλογία ροής διάδοσης (propagating flux ratio), ένας αριθμός που δείχνει το ποσοστό της θερμικής έντασης αντίδρασης που προθερμαίνει τα παρακείμενα σωματίδια καυσίμου

$\varphi_W$ : ο παράγων ανέμου, αντιπροσωπεύει την επίδραση του ανέμου στην αύξηση της ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς μέσω της αύξησης της ακτινοβολίας, μεταφοράς θερμότητας αλλά και παροχής οξυγόνου προς την πυρκαγιά από τον άνεμο

$\varphi_S$ : ο παράγων κλίσης, αντιπροσωπεύει την επίδραση της κλίσης στην ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς

$\rho_b$ : η πυκνότητα όγκου του πεδίου της καύσιμης ύλης (fuel bed bulk density),

αφορά την ποσότητα καυσίμων ανά μονάδα όγκου  $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$\varepsilon$ : ο ενεργός αριθμός θέρμανσης, ένα μέτρο του κλάσματος του δυνητικού καυσίμου που πρέπει να ανέλθει σε θερμοκρασία ανάφλεξης

$Q_{ig}$ : η θερμότητα προανάφλεξης (heat of preignition), αφορά την

ενέργεια ανά μονάδα μάζας που απαιτείται για την ανάφλεξη του καυσίμου  $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$

## 2.5 Υγρασία καύσιμης ύλης

Η υγρασία καύσιμης ύλης αναφέρεται στο περιεχόμενο νερού που περιέχεται στην καύσιμη ύλη, όπως τα δέντρα, οι θάμνοι, τα φύλλα και τα χόρτα. Αυτή η υγρασία μπορεί να προέρχεται από την απορρόφηση νερού από το έδαφος μέσω των ριζών των φυτών, την υγροποίηση της ατμοσφαιρικής υγρασίας ή την άμεση κατακρήμνιση από βροχή και υγρασία. Η υγρασία της καύσιμης ύλης είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά και την ένταση των δασικών πυρκαγιών, καθώς καθορίζει την ευφλεκτότητα και την ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς.

Ως περιεχόμενη υγρασία ενός καυσίμου (Ηλιόπουλος, 2017) ορίζουμε το ποσοστό νερού που υπάρχει σε αυτό, συγκριτικά με το αν αυτό ήταν ξηρό ή αλλιώς στεγνό, δηλαδή δεν είχε καθόλου υγρασία (0%). Για τον υπολογισμό του βάρους της ύλης όταν αυτή είναι ξηρή, προηγείται διαδικασία ξήρανσης σε ειδικούς φούρνους, και έπειτα το υλικό ζυγίζεται. Από τη διαφορά μεταξύ των βαρών υγρού και ξηρού προκύπτει η περιεχόμενη υγρασία ως εξής:

$$Y_{\text{Καυσίμου}} = \frac{B_Y - B_{\Xi}}{B_{\Xi}} * 100 \quad (\text{Εξ. 6})$$

Όπου:

$Y_{\text{Καυσίμου}}$	Η υγρασία της καύσιμης ύλης [%]
$B_Y$	Το βάρος της καύσιμης ύλης με υγρασία [g]
$B_{\Xi}$	Το βάρος της ξηραμένης καύσιμης ύλης [g]

Όταν η υγρασία της καύσιμης ύλης είναι υψηλή, η καύσιμη ύλη είναι πιο ανθεκτική στην ανάφλεξη. Το νερό πρέπει να εξατμιστεί πριν η καύσιμη ύλη μπορέσει να φτάσει σε θερμοκρασία καύσης, γεγονός που καθυστερεί την ανάφλεξη και μειώνει την ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς. Η διαδικασία αυτή απαιτεί ενέργεια, η οποία μειώνει τη θερμότητα που διατίθεται για την καύση της καύσιμης ύλης. Έτσι, οι φωτιές σε περιοχές με υψηλή

υγρασία καύσιμης ύλης τείνουν να είναι λιγότερο έντονες και πιο ελεγχόμενες. Η υγρασία λειτουργεί ως φυσικό φρένο, επιβραδύνοντας την εξάπλωση της φωτιάς και μειώνοντας την πιθανότητα εκδήλωσης μεγάλων και καταστροφικών δασικών πυρκαγιών.

Αντίθετα, όταν η υγρασία της καύσιμης ύλης είναι χαμηλή, η καύσιμη ύλη είναι ξηρή και εύφλεκτη, επιτρέποντας στην φωτιά να εξαπλωθεί γρήγορα και με μεγάλη ένταση. Η ξηρή καύσιμη ύλη αναφλέγεται εύκολα και καίγεται γρήγορα, απελευθερώνοντας μεγάλη ποσότητα θερμότητας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ραγδαία εξάπλωση της φωτιάς, αυξάνοντας την επικινδυνότητα και δυσκολεύοντας τον έλεγχο της. Οι ξηρές συνθήκες δημιουργούν το ιδανικό περιβάλλον για την ανάπτυξη και την επέκταση των δασικών πυρκαγιών, κάνοντας τις πιο καταστροφικές και επικίνδυνες για το περιβάλλον και τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Η υγρασία της καύσιμης ύλης επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως οι καιρικές συνθήκες, η εποχή του χρόνου και η γεωγραφική τοποθεσία. Οι περίοδοι ξηρασίας και οι υψηλές θερμοκρασίες μειώνουν την υγρασία της καύσιμης ύλης, αυξάνοντας την πιθανότητα εκδήλωσης δασικών πυρκαγιών. Η έκθεση της καύσιμης ύλης στον άνεμο μπορεί επίσης να επιταχύνει την εξάτμιση του νερού, μειώνοντας περαιτέρω την υγρασία της. Οι περιοχές με χαμηλή βροχόπτωση και υψηλές θερμοκρασίες, όπως οι μεσογειακές και οι ημι-άνυδρες ζώνες, είναι πιο επιρρεπείς σε δασικές πυρκαγιές λόγω της χαμηλής υγρασίας της καύσιμης ύλης.

Η εποχή του χρόνου παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στην υγρασία της καύσιμης ύλης. Το καλοκαίρι και το φθινόπωρο, όταν οι θερμοκρασίες είναι υψηλότερες και οι βροχοπτώσεις είναι λιγότερες, η καύσιμη ύλη τείνει να είναι πιο ξηρή και εύφλεκτη. Αντίθετα, την άνοιξη και τον χειμώνα, οι χαμηλότερες θερμοκρασίες και οι αυξημένες βροχοπτώσεις αυξάνουν την υγρασία της καύσιμης ύλης, μειώνοντας τον κίνδυνο δασικών πυρκαγιών. Η κατανόηση της εποχικής μεταβολής της υγρασίας της καύσιμης ύλης είναι κρίσιμη για την πρόβλεψη και την πρόληψη των δασικών πυρκαγιών.

Η γεωγραφική τοποθεσία επηρεάζει επίσης την υγρασία της καύσιμης ύλης. Οι δασικές περιοχές κοντά σε υδάτινες επιφάνειες, όπως ποτάμια, λίμνες και ωκεανούς, τείνουν να έχουν υψηλότερη υγρασία καύσιμης ύλης λόγω της αυξημένης υγρασίας της ατμόσφαιρας και της άμεσης απορρόφησης νερού από τα φυτά. Αντίθετα, οι περιοχές με μεγάλα υψόμετρα και χαμηλή βροχόπτωση έχουν χαμηλότερη υγρασία καύσιμης ύλης, καθιστώντας τις πιο επιρρεπείς σε δασικές πυρκαγιές.

Η υγρασία της καύσιμης ύλης έχει άμεσες επιπτώσεις στη στρατηγική καταστολής των δασικών πυρκαγιών. Οι πυροσβέστες και οι διαχειριστές δασών πρέπει να λαμβάνουν υπόψη την υγρασία της καύσιμης ύλης για να εκτιμήσουν τον κίνδυνο πυρκαγιάς και να σχεδιάσουν τις κατάλληλες τακτικές κατάσβεσης. Σε περιοχές με υψηλή υγρασία καύσιμης ύλης, οι πυροσβέστες μπορούν να εστιάσουν στην πρόληψη της ανάφλεξης και στη δημιουργία ζωνών πυρασφάλειας για να περιορίσουν την εξάπλωση της φωτιάς. Αντίθετα, σε περιοχές με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης, οι πυροσβέστες πρέπει να είναι πιο επιθετικοί και γρήγοροι στην καταστολή της φωτιάς, χρησιμοποιώντας εντατικές μεθόδους.

Η παρακολούθηση της υγρασίας της καύσιμης ύλης είναι επίσης ζωτικής σημασίας για την πρόληψη των δασικών πυρκαγιών. Με τη χρήση τεχνολογιών, όπως οι δορυφόροι, οι αισθητήρες εδάφους και οι μετεωρολογικοί σταθμοί, οι αρμόδιοι φορείς μπορούν να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την υγρασία της καύσιμης ύλης και να εντοπίζουν περιοχές υψηλού κινδύνου. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη προληπτικών μέτρων, όπως η εκκαθάριση της ξηρής βλάστησης, η δημιουργία ζωνών πυρασφάλειας και η ενημέρωση των τοπικών κοινοτήτων για τον κίνδυνο πυρκαγιάς.

Επιπλέον, η κατανόηση της σχέσης μεταξύ υγρασίας καύσιμης ύλης και δασικών πυρκαγιών είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη μακροπρόθεσμων στρατηγικών διαχείρισης δασών. Οι διαχειριστές δασών μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτή τη γνώση για να σχεδιάσουν και να εφαρμόσουν πρακτικές που αυξάνουν την ανθεκτικότητα των δασών στις πυρκαγιές, όπως η αναδάσωση με είδη φυτών που έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία, η διατήρηση υγρών ζωνών και η χρήση ελεγχόμενων καύσεων για τη μείωση της συσσώρευσης ξηρής βιομάζας.

Η περιεχόμενη υγρασία είναι πολύ διαφορετική για την νεκρή και τη ζωντανή καύσιμη ύλη και υποβάλλεται σε έντονες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια του έτους αλλά και από μέρα σε μέρα. Ο χρόνος που απαιτείται για τη μεταβολή της υγρασίας μπορεί να υπολογισθεί με βάση το καύσιμο, την κατάστασή του και το πάχος του. Γενικά, η ζωντανή καύσιμη ύλη διαθέτει πολύ περισσότερη υγρασία συγκριτικά με την νεκρή ενώ παράλληλα μεταβάλλεται πολύ πιο ήπια και δύσκολα, συνήθως σε εποχιακή και όχι ημερήσια βάση.

Σε μια πυρκαγιά εμπλέκονται ποικιλία καυσίμων, ζωντανής και νεκρής ύλης, διαφορετικού είδους και πάχους. Επίσης, δεν αναφλέγονται όλα τα καύσιμα, όπως συμβαίνει για παράδειγμα σε μία επικόρυφη. Αυτό οδηγεί σε ένα πολυσύνθετο πρόβλημα

υπολογισμού της υγρασίας για το σύνολο της καύσιμης ύλης που εμπλέκεται σε μία πυρκαγιά.

Το νερό είναι πολύ σημαντικό για την εκτέλεση όλων σχεδόν των βιολογικών διεργασιών στα έμβια όντα. Στην χημεία αναφέρεται συχνά ως ο «καθολικός διαλύτης», αφού είναι ο διαλύτης όλων σχεδόν των βιολογικών διεργασιών. Στα φυτά, το νερό είναι πολύ σημαντικό καθώς μεταφέρει τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους προς όλα τα μέρη του φυτού, αποτελεί δομικό στοιχείο των κυττάρων αυτού αλλά επίσης χρησιμοποιείται και στην διαδικασία της φωτοσύνθεσης και στην κυτταρική αναπνοή.

Είναι λοιπόν εύκολα αντιληπτό ότι η ζωντανή καύσιμη ύλη, εξαιτίας των διεργασιών που οφείλει να επιτελέσει για την επιβίωσή της, θα διαθέτει μεγαλύτερες ποσότητες νερού και συνεπώς υψηλότερα ποσοστά περιεχόμενης υγρασίας. Το σημείο ισορροπίας αυτής εξαρτάται βέβαια και από την αλληλεπίδραση με το περιβάλλον και τις συνθήκες αυτού όπως θα δούμε παρακάτω.

Η ζωντανή καύσιμη ύλη περιλαμβάνει ποώδη φυτά και ξυλώδες φυτικό υλικό. Τα ποώδη φυτά είναι είτε πολυετή και βλαστάνουν από τη βάση, είτε μονοετή και αναπτύσσονται από σπόρους κάθε χρόνο. Είναι σχετικά μαλακά και χυμώδη και δεν αναπτύσσουν ξυλώδη, διαρκή ιστό. Λόγω του ότι πεθαίνουν κάθε χρόνο, παράγουν περισσότερη λεπτή νεκρή καύσιμη ύλη. Γενικά όμως, όταν είναι ζωντανά, η περιεχόμενη υγρασία τους είναι σχετικά υψηλή.

Η περιεχόμενη υγρασία της ζωντανής καύσιμης ύλης είναι συνήθως μεταξύ 60% και 300%. Η υγρασία της βλάστησης μεταβάλλεται και φτάνει στο μέγιστό της την άνοιξη ενώ το χειμώνα το φυτό δεν μεταβάλλει την υγρασία του έντονα.

Στα νεκρά καύσιμα, η υγρασία κυμαίνεται μεταξύ 2% έως και 30%. Αυτό όπως αναφέραμε συμβαίνει διότι δεν υπάρχουν ζωντανά κύτταρα να διατηρήσουν νερό για τις διεργασίες τους και να αντισταθούν στις μεταβολές του περιβάλλοντος.

Στην νεκρή καύσιμη ύλη, σημαντική επίδραση στην περιεχόμενη υγρασία τους έχουν η εγγύτητά τους με υγρό έδαφος, η εκτεθειμένη επιφάνειά τους, η ύπαρξη ή μη σκίασης.

Τα καύσιμα ανταλλάσσουν συνεχώς υγρασία με τον περιβάλλοντα αέρα. Κατά τη διάρκεια περιόδων με υψηλή σχετική υγρασία και κατακρημνίσεις, η καύσιμη ύλη αυξάνει την υγρασία της. Όταν ο ατμοσφαιρικός αέρας είναι ξηρός και θερμός, τα καύσιμα απελευθερώνουν περισσότερη υγρασία από όση προσλαμβάνουν.

Σχετικά με την νεκρή καύσιμη ύλη, οι διακυμάνσεις που παρουσιάζονται στην περιεχόμενη υγρασία αυτής σχετίζονται άμεσα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αλλά και με άλλους παράγοντες. Όταν το φυτό νεκρώνει, σταματά η ανάπτυξή του και αντίστοιχα η κυκλοφορία νερού στο εσωτερικό του. Όμως, η νεκρή ύλη διατηρεί την δομή των κυττάρων, τα οποία μπορούν να προσλάβουν νερό.

Επιπροσθέτως, τα υλικά που συνθέτουν τα νεκρά πλέον κυτταρικά τοιχώματα είναι ιδιαίτερα υγροσκοπικά, έχουν δηλαδή την τάση να απορροφούν νερό. Αυτό συμβαίνει έως ότου το υλικό κορεσθεί. Στην ζωντανή καύσιμη ύλη το νερό που μπορεί να προσλάβει αυτή μπορεί να είναι μεγαλύτερο από τον κορεσμό που συναντάμε στην νεκρή ύλη.

Γενικά, ο ρυθμός ανταλλαγής υγρασίας μεταξύ αέρα και καύσιμη ύλης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες:

- Διαφορά τάσης υδρατμών
- Παρουσία ή απουσία ανέμου
- Μέγεθος και συμπίεση καύσιμης ύλης
- Εγγύτητα αυτής με υγρό έδαφος

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την υγρασία του καυσίμου, η οποία και είναι καθοριστικός παράγοντας στην ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς και ιδιαίτερα στον άνεμο και την τοπογραφία.

### **2.5.1 Σχετική υγρασία και περιβαλλοντική θερμοκρασία**

Η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας είναι δύο πολύ σημαντικοί ατμοσφαιρικοί δείκτες που επηρεάζουν την περιεχόμενη υγρασία του καυσίμου. Η θερμοκρασία μετράτε σε βαθμούς κελσίου και η σχετική υγρασία σε επί τοις εκατό ποσοστό και αποτυπώνει το ποσοστό νερού υπό τη μορφή υδρατμών που κατακρατά ο αέρας σε δεδομένη πίεση και θερμοκρασία συγκριτικά με το σημείο κορεσμού του, ήτοι το σημείο που δεν μπορεί να συγκρατήσει επιπλέον υδρατμούς και αυτοί θα υγροποιηθούν.

Τόσο η ζωντανή όσο και ιδίως η νεκρή καύσιμη ύλη αλληλεπιδρούν έντονα με την υγρασία της ατμόσφαιρας. Είναι προφανές ότι η αλληλεπίδραση αυτή μπορεί να είναι θετική ή αρνητική (κέρδος ή απομείωση της περιεχόμενης υγρασίας) για το καύσιμο και συμβαίνει ως ότου επέλθει η ισορροπία ανάμεσα στα δύο μέλη ή υπάρξει κορεσμός κάποιου. Περαιτέρω ανάλυση θα υπάρξει στην περιεχόμενη υγρασία ισοζυγίου που παρουσιάζεται παρακάτω.

### **2.5.2 Σχετικά υγρασία και άνεμος**

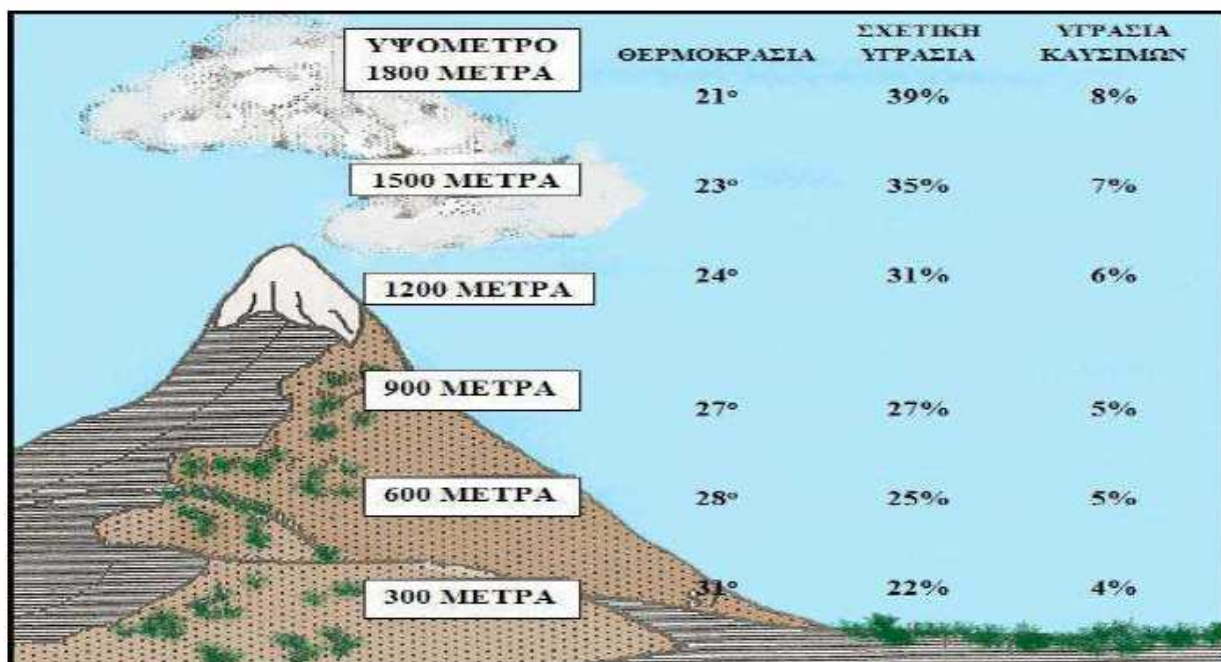
Ο άνεμος αποτελεί έναν καθοριστικό παράγοντα που επηρεάζει την υγρασία της καύσιμης ύλης καθώς επιδρά άμεσα στον ρυθμό εξισορρόπησης της υγρασίας αυτών σε σχέση με την υγρασία περιβάλλοντος. Αυτό συμβαίνει διότι το καύσιμο αλληλοεπιδρά με τον αέρα που βρίσκεται γύρω του και αν αυτός είναι ξηρότερος τον υγραίνει χάνοντας υγρασία ή αν είναι υγρότερος τον ξηραίνει απορροφώντας υγρασία. Έτσι, ο άνεμος απομακρύνει τον αέρα που έχει αλληλοεπιδράσει με το καύσιμο και έχει κορεστεί ή ξηραθεί και φέρνει φρέσκο αέρα, επιταχύνοντας έτσι την διαδικασία. Η επιτάχυνση της διαδικασίας οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά υγρασίας, τόσο αυξάνεται ο ρυθμός ανταλλαγής αυτής.

Επιπροσθέτως, μέτριοι ή ισχυροί άνεμοι μπορούν επίσης να επηρεάσουν τις επιφανειακές θερμοκρασίες των καυσίμων, μεταβάλλοντας έτσι την επιφανειακή και κατ' επέκταση την συνολική υγρασία τους. Κατά τις θερμές ώρες της ημέρας, ο άνεμος μπορεί να απομακρύνει τα θερμά στρώματα αέρα πάνω από το καύσιμο και να αντικαταστήσει με ψυχρότερα, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αέρα, μειώνοντας έτσι την επιφανειακή θερμοκρασία της καύσιμης ύλης και αυξάνοντας την υγρασία της. Κατά τις νυχτερινές ώρες, ο άνεμος μπορεί να αποτρέψει τις επιφανειακές θερμοκρασίες αέρα από το να φτάσουν στο σημείο δρόσου, περιορίζοντας την αύξηση της επιφανειακής υγρασίας της καύσιμης ύλης.

### **2.5.3 Σχετική υγρασία και τοπογραφία**

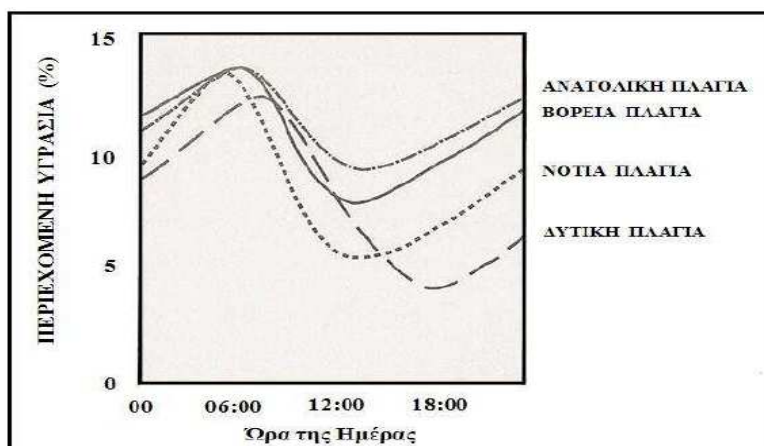
Η τοπογραφία είναι ένας σημαντικός παράγοντας τόσο για την εξέλιξη της ίδιας της πυρκαγιάς όσο και για την υγρασία των καυσίμων που αυτή θα συναντήσει. Εδώ θα διακρίνουμε τρεις παράγοντες αυτής, το υψόμετρο, τον προσανατολισμό και την κλίση.

Όσον αφορά το υψόμετρο, αύξηση αυτού επιφέρει συνήθως μείωση της θερμοκρασίας κατά  $0.65\text{ }^{\circ}\text{C}$  ανά 100 m. Όταν όμως η θερμοκρασία ελαττώνεται, τότε η σχετική υγρασία αυξάνεται με αποτέλεσμα η υγρασία της βλάστησης να μεγαλώνει. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται στην εικόνα 2.2 που ακολουθεί. Αν υπολογισθεί η καθυστερημένη τήξη του χιονιού και η μεγαλύτερη αναλογία ζωντανής προς νεκρής καύσιμης ύλης σε μεγαλύτερα υψόμετρα, τότε η συνολική υγρασία της καύσιμης ύλης αυξάνεται και είναι λιγότερο πιθανή μία πυρκαγιά ενώ αναμένουμε και μια ηπιότερη συμπεριφορά αυτής.



Εικόνα 2.2 Υγρασία συναρτήσει του υψομέτρου

Όσον αφορά τον προσανατολισμό, αυτός διαδραματίζει σημαντικό ρόλο διότι μεταβάλλει τα ποσά θερμότητας στα οποία εκτίθεται η καύσιμη ύλη. Οι νότιες πλαγιές δέχονται μεγαλύτερα ποσά ακτινοβολίας από τις βόρειες πλαγιές κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι, η θερμοκρασία στις νότιες πλαγιές είναι υψηλότερη και συνεπώς η σχετική υγρασία και κατ' επέκταση η υγρασία της καύσιμης ύλης είναι χαμηλότερη. Κατά τις νυχτερινές ώρες οι θερμοκρασίες είναι πιθανό να μεταβάλλονται εξαιτίας αναστροφών και θερμικών ζωνών που μπορεί να αναπτυχθούν. Επιπροσθέτως, οι ανατολικές εκθέσεις παρουσιάζουν ελάχιστη υγρασία το μεσημέρι ενώ οι νοτιοδυτικές παρουσιάζουν την ελάχιστη υγρασία καύσιμης ύλης το απόγευμα. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται στην εικόνα 2.3 που ακολουθεί.



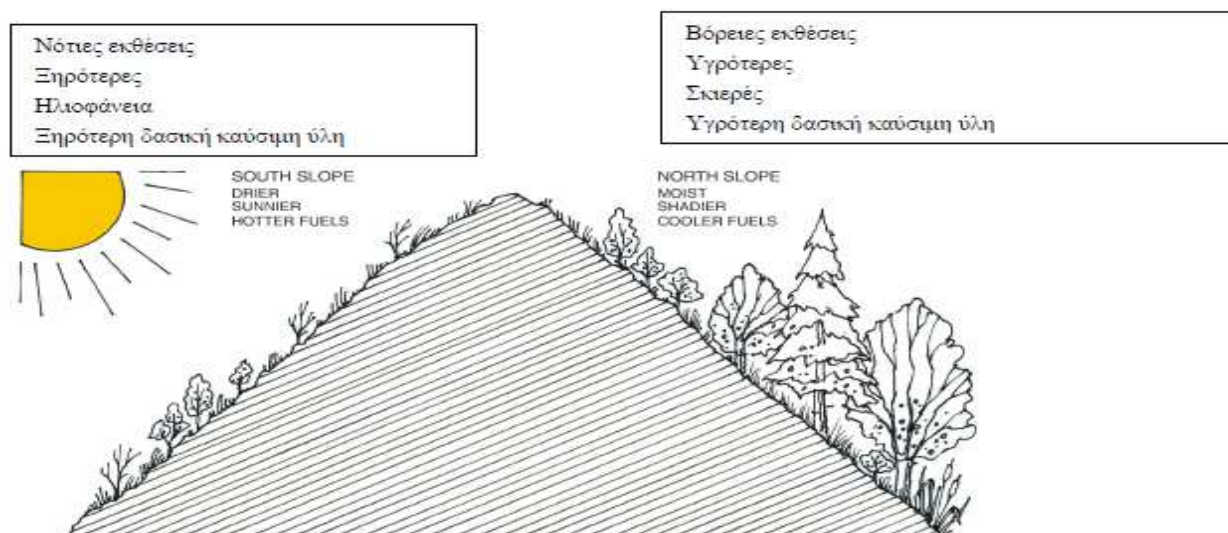
Εικόνα 2.3: Διακύμανση υγρασίας ανά προσανατολισμό σε μία ημέρα



Το είδος και η ποσότητα βλάστησης καθορίζεται κατά ένα μέρος από την έκθεση. Στο βόρειο ημισφαίριο:

- Οι πλαγιές με νότια έκθεση είναι κατά κύριο λόγο ηλιόλουστες με λίγη ξερή βλάστηση
- Οι πλαγιές με βόρεια έκθεση είναι πιο σκιερές, με υψηλότερη υγρασία και περισσότερη πυκνή βλάστηση
- Οι πλαγιές με ανατολική ή δυτική έκθεση φέρουν χαρακτηριστικά που κυμαίνονται κάπου ανάμεσα σε αυτά της νότιας και βόρειας έκθεσης. Αυτές οι πλαγιές καθορίζονται περισσότερο από τη γεωγραφική τους θέση και τις τοπικές καιρικές συνθήκες, οι οποίες διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή.

Τα ανωτέρω αποτυπώνονται παραστατικά και στην εικόνα 2.4 που ακολουθεί. Η συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς λοιπόν που καίει μια πλαγιά θα επηρεαστεί από τον ήλιο που δέχεται, από τη βλάστηση που κυριαρχεί και από το ποσοστό υγρασίας, παράγοντες οι οποίοι διαμορφώνονται από την έκθεση της πλαγιάς.



Εικόνα 2.4: Χαρακτηριστικά βόρειων και νότιων εκθέσεων

Τέλος, όσο αφορά την κλίση της πλαγιάς, αυτή επηρεάζει την ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και την προθέρμανση του καυσίμου, κατά την πυρκαγιά. Στις κάθετες επιφάνειες η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι πολύ μεγαλύτερη από τις σχεδόν παράλληλες, καθώς μεταβάλλεται με το συνημίτονο της γωνίας. Η γωνία με την οποία προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία στις διάφορες επιφάνειες μεταβάλλεται μέσα στην ημέρα. Γενικά, αν και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος, κατά

μέσο όρο στην Ελλάδα οι κλίσεις 30° δέχονται τη μέγιστη ακτινοβολία στο σύνολο του έτους ενώ οι κλίσεις 10° δέχονται τη μέγιστη ακτινοβολία κατά τους θερινούς μήνες.

Μια φωτιά που κινείται ανηφορικά παράγει περισσότερη μεταγωγική και ακτινοβολούσα θερμότητα, προθερμαίνοντας την άκαυτη καύσιμη ύλη ταχύτερα απ' ότι αν κινούταν σε επίπεδο έδαφος. Όσο μεγαλύτερη η κλίση, τόσο ισχυρότερο το αποτέλεσμα. Το αντίθετο ισχύει όταν η φωτιά κινείται κατηφορικά.

## 2.6 Χρονική υστέρηση υγρασίας

Η έννοια της χρονικής υστέρησης (timelag) δείχνει το ρυθμό που το καύσιμο κερδίζει ή χάνει υγρασία λόγω των μεταβολών του περιβάλλοντός του. Συγκεκριμένα, είναι ο χρόνος που απαιτείται προκειμένου το καύσιμο να κερδίσει ή χάσει το 63% περίπου της διαφοράς μεταξύ αρχικής του περιεχόμενης υγρασίας και της περιεχόμενης υγρασίας ισορροπίας. Αυτό συμβαίνει διότι όπως είπαμε η ανταλλαγή υγρασίας συμβαίνει με μία αντίστροφη λογαριθμική σχέση και συνεπώς ο χρόνος αυξάνεται δραματικά όσο προσεγγίζουμε την ισορροπία.

Η έννοια της χρονικής υστέρησης στην προσρόφηση (adsorption) ή εκρόφηση (desorption) της υγρασίας στην καύσιμη ύλη εκφράζεται από την εξίσωση:

$$y = a * e^{-\lambda t} \quad (\text{Εξ. 6})$$

Όπου:

y	Η προσρόφηση ή εκρόφηση υγρασίας της καύσιμης ύλης
a	Ο συντελεστής παλινδρόμησης
e	Η βάση των φυσικών λογαρίθμων
λ	Ο συντελεστής φθίνουσας εκθετικής καμπύλης
t	Η χρονική υστέρηση

Ο ρυθμός με τον οποίο κερδίζει ή χάνει υγρασία ένα καύσιμο δεν είναι σταθερός. Η καύσιμη ύλη αντιδρά αρχικά γρήγορα όταν μεταβάλλονται οι συνθήκες. Όμως, όσο η υγρασία της καύσιμης ύλης προσεγγίζει αυτή του σημείου ισορροπίας (περιεχόμενη υγρασία ισορροπίας), τόσο πιο αργή γίνεται η μεταβολή. Στη φύση, τα καύσιμα χρειάζονται 5 περιόδους χρονικής υστέρησης για να προκύψει το 95% της αυτής μεταβολής.

Η χρονική υστέρηση των λεπτών καυσίμων είναι μικρή και συνεπώς φτάνουν στην ισορροπία σχετικά γρήγορα. Τα μεγάλα καύσιμα, εξαιτίας της μεγαλύτερης χρονικής υστέρησης, σπάνια φτάνουν στην υγρασία ισορροπίας, αφού στο μεταξύ μεταβάλλονται και οι περιβαλλοντικές συνθήκες.

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

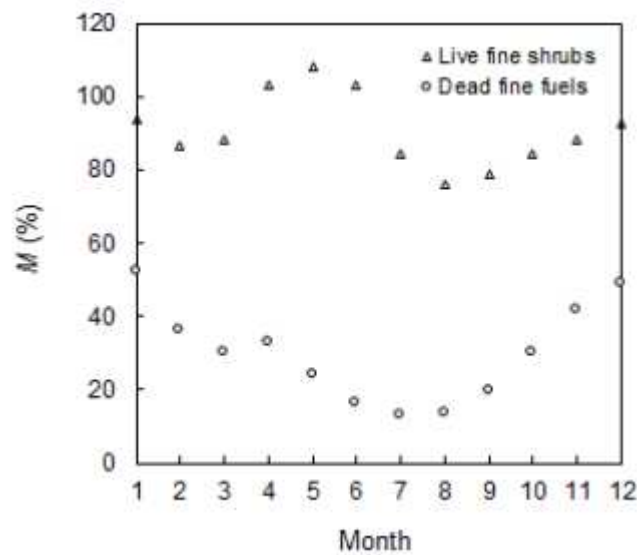
1. Χρονική υστέρηση 1 ώρας (1-h XY): Καύσιμα διαμέτρου 0 έως 0.5 cm
2. Χρονική υστέρηση 10 ωρών (10-h XY): Καύσιμα διαμέτρου 0.5 έως 2.5 cm
3. Χρονική υστέρηση 100 ωρών (100-h XY): Καύσιμα διαμέτρου 2.5 έως 7.5 cm
4. Χρονική υστέρηση 1000 ωρών (1000-h XY): Καύσιμα διαμέτρου 7.5 έως 20 cm

Τα καύσιμα χρονικής υστέρησης 100 και 1000-h XY χρησιμοποιούνται κυρίως ως δείκτες ξηρασίας και γενικότερης δριμύτητας της περιόδου των πυρκαγιών. Τα καύσιμα των 10-h XY είναι σημαντικά στη δημιουργία προβλέψεων για τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς αλλά δεν είναι τόσο σημαντικά όσο τα καύσιμα της 1-h XY. Αυτά αποτελούν τους σημαντικότερους δείκτες συμπεριφοράς των πυρκαγιών, αφού είναι ο κύριος φορέας της πυρκαγιάς που καθορίζει όσο καμία άλλη εάν θα υπάρξει ανάφλεξη και αν υπάρξει, τον προσδιορισμό της ταχύτητας εξάπλωσης της επικείμενης πυρκαγιάς. Τέλος, αποτελούν την ομάδα καυσίμων που μεταβάλλονται διαρκώς με τις αλλαγές της σχετικής υγρασίας.

## **2.7 Περιεχόμενη υγρασία και ρυθμός διάδοσης πυρκαγιάς**

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα έρευνας (Rossa&Fernandes, 2017), η οποία μελέτησε την επίδραση της περιεχόμενης υγρασίας καυσίμου σε ζωντανή φυτική ύλη στον ρυθμό διάδοσης της πυρκαγιάς, τόσο σε εργαστηριακές όσο και σε πραγματικές συνθήκες, η περιεχόμενη υγρασία καυσίμου αποτελεί μία πάρα πολύ σημαντική παράμετρο επίδρασης σε αυτήν.

Καταρχάς, αποδεικνύεται μέσω μετρήσεων ότι η περιεχόμενη υγρασία είναι πολύ πιο ευμετάβλητη για την νεκρή ύλη συγκριτικά με την ζωντανή και προκύπτει μία συσχέτιση μεταξύ των δύο. Επίσης, παρουσιάζεται η συσχέτιση της περιεχόμενης υγρασίας με την εποχή, με το μέγιστο να παρουσιάζεται τον Μάιο για την ζωντανή και τον Απρίλιο για την Νεκρή ύλη, ενώ το ελάχιστο τον Αύγουστο για την ζωντανή και τον Ιούλιο για την νεκρή, γεγονός που μας οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα για την μεταβολή της επικινδυνότητας με βάση τον μήνα του έτους και την σύσταση της ύλης στην περιοχή που εξετάζουμε, όπως αποτυπώνεται και στην εικόνα 2.5 που ακολουθεί.



*Εικόνα 2.5 Υγρασία νεκρών και ζωντανών καυσίμων μέσα στο έτος*

Επίσης, καταδεικνύει τα προβλήματα στον έλεγχο των άλλων μεταβλητών στο πραγματικό περιβάλλον, συγκριτικά με το εργαστήριο και το πώς αυτά δυνητικά επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Τέλος, αναφέρει ότι ο προσδιορισμός της επικινδυνότητας μπορεί να γίνει με πρακτικά καλή προσέγγιση μελετώντας αποκλειστικά την περιεχόμενη υγρασία της νεκρής καύσιμης ύλης, αφού η ζωντανή παρουσιάζει μικρότερες και πιο αργές διακυμάνσεις.

### **3. Η επιρροή της κλιματικής αλλαγής στις δασικές πυρκαγιές**

#### **3.1 Η έννοια της κλιματικής αλλαγής**

Η κλιματική αλλαγή αναφέρεται στις μακροπρόθεσμες μεταβολές των καιρικών συνθηκών και του κλίματος της Γης, οι οποίες εκτείνονται σε δεκαετίες ή και χιλιετίες. Αυτές οι αλλαγές περιλαμβάνουν διάφορες σημαντικές και διακριτές μεταβολές στο παγκόσμιο κλίμα. Μία από τις κυριότερες εκφάνσεις της κλιματικής αλλαγής είναι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας της Γης. Από τα τέλη του 19ου αιώνα, η μέση παγκόσμια θερμοκρασία έχει αυξηθεί κατά περίπου 1°C, με το μεγαλύτερο μέρος αυτής της αύξησης να έχει συμβεί τις τελευταίες δεκαετίες. Αυτή η άνοδος της θερμοκρασίας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ανθρώπινη δραστηριότητα και την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και το υποξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O).

Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό της κλιματικής αλλαγής είναι η μεταβολή των προτύπων βροχοπτώσεων. Σε πολλές περιοχές του πλανήτη, παρατηρούνται πιο ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως έντονες βροχοπτώσεις, πλημμύρες και περίοδοι ξηρασίας. Αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν την υδρολογική ισορροπία και την αγροτική παραγωγή, με συνέπειες για την επισιτιστική ασφάλεια και τις τοπικές οικονομίες. Επιπλέον, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας αποτελεί μία από τις πιο σοβαρές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί τη διαστολή των θαλάσσιων υδάτων και το λιώσιμο των παγετώνων και των πάγων στους πόλους, οδηγώντας σε άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Αυτό απειλεί παράκτιες περιοχές, χαμηλά νησιά και πυκνοκατοικημένες παράκτιες πόλεις, προκαλώντας διάβρωση των ακτών, αλάτωση των υδάτινων πόρων και κίνδυνο πλημμυρών.

Το λιώσιμο των παγετώνων και των πάγων της Αρκτικής και της Ανταρκτικής είναι ένα ακόμα κρίσιμο στοιχείο της κλιματικής αλλαγής. Η μείωση των παγετώνων έχει σημαντικές συνέπειες για τα παγκόσμια οικοσυστήματα και την παγκόσμια κυκλοφορία των ωκεανών. Για παράδειγμα, το λιώσιμο των πάγων της Αρκτικής μπορεί να επιβραδύνει τη θερμοατλατική κυκλοφορία, γνωστή και ως “Great Ocean Conveyor Belt”, η οποία παίζει ζωτικό ρόλο στη ρύθμιση του παγκόσμιου κλίματος.

Οι αλλαγές στα οικοσυστήματα και τη βιοποικιλότητα είναι εξίσου ανησυχητικές. Τα φυσικά οικοσυστήματα δυσκολεύονται να προσαρμοστούν στις νέες κλιματικές συνθήκες, οδηγώντας σε απώλεια ειδών και αλλαγές στις βιοκοινότητες. Πολλά είδη ζώων

και φυτών αντιμετωπίζουν αυξανόμενη πίεση από τις αλλαγές στο περιβάλλον τους, και οι μεταβολές στους βιότοπους μπορεί να οδηγήσουν σε εξάπλωση ασθενειών και μεταβολές στις γεωργικές καλλιέργειες.

Η κύρια αιτία της σύγχρονης κλιματικής αλλαγής είναι η ανθρώπινη δραστηριότητα, κυρίως μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων (όπως πετρέλαιο, άνθρακας και φυσικό αέριο). Αυτή η διαδικασία απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Τα αέρια του θερμοκηπίου, όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και το υποξείδιο του αζώτου, παγιδεύουν τη θερμότητα στην ατμόσφαιρα, δημιουργώντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί στην αύξηση της θερμοκρασίας της Γης και προκαλεί τις προαναφερθείσες αλλαγές στο κλίμα και τα οικοσυστήματα.

### **3.2 Η κλιματική αλλαγή στην σύγχρονη κοινωνική πραγματικότητα**

Το κλίμα της γης δεν είναι σταθερό αλλά μεταβάλλεται διαρκώς κατά τη διάρκεια της ιστορίας. Κατά τα τελευταία 650.000 χρόνια έχουν υπάρξει επτά περίοδοι παγετώνων, με την τελευταία 15.000 περίπου χρόνια πριν. Σήμερα, διανύουμε μια θερμή περίοδο κλιματικά. Οι παραπάνω εναλλαγές του κλίματος οφείλονται σε πολύ μικρές, φυσιολογικές, αλλαγές της τροχιάς της γης, οι οποίες και οδηγούν σε μεταβολή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας και κατ' επέκταση οδηγούν σε μεταβολή της θερμοκρασίας.

Όμως, το σύγχρονο κλίμα και οι μεταβολές του φαίνεται να επηρεάζονται σε μεγάλο μέρος από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Ως προς την διατύπωση αυτή, δηλαδή την απόδειξη της υπερθέρμανσης του πλανήτη, υπάρχουν πολλά δεδομένα από πολλούς φορείς, με σημαντικότερο αυτόν της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) (IPCC, 2021).

Σύμφωνα με την 5η έκθεση της IPCC του 2013 (IPCC, 2013), θα υποστούμε ήδη τις συνέπειες μιας μη αναστρέψιμης κλιματικής αλλαγής που θα επιφέρει μια πιθανή παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας της τάξης των 1,5°C, από το τέλος του 21ου αιώνα, σε σχέση με την περίοδο 1850-1900. Το φαινόμενο αυτό ορίζεται ως «κλιματική αλλαγή».

Ο όρος λοιπόν αυτός αναφέρεται στις αλλαγές που έχουν επέλθει στο κλίμα της γης από τις αρχές του 1900 και περιλαμβάνουν τόσο τους ανθρωπογενείς όσο και τους φυσικούς παράγοντες που συμβάλλουν σε αυτήν.

Η κλιματική αλλαγή δεν πρέπει να συγχέεται με το φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη, το οποίο αποτελεί μέρος του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής. Γενικά, η υπερθέρμανση του πλανήτη περιορίζεται μόνο στην μετρήσιμη αύξηση της θερμοκρασίας

της επιφάνειας της γης που προσδιορίζεται με βάση τις μετρήσεις της παγκόσμιας θερμοκρασίας από το 1880 περίπου. Η κλιματική αλλαγή προσδιορίζεται ως «αλλαγές στην κατάσταση του κλίματος που μπορεί να προσδιοριστεί από αλλαγές στο μέσο όρο και / ή την μεταβλητότητα των ιδιοτήτων του που εξακολουθεί να υφίσταται (επιμένει) για μεγάλο χρονικό διάστημα, συνήθως δεκαετίες ή και περισσότερο». Επειδή το κλίμα του πλανήτη καθοδηγείται από τη θερμοκρασία της επιφάνειας της γης, η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι η πρωταρχική αιτία των διακυμάνσεων στο παγκόσμιο κλίμα. Οτιδήποτε επηρεάζει την υπερθέρμανση του πλανήτη επηρεάζει τελικά την αλλαγή του κλίματος.

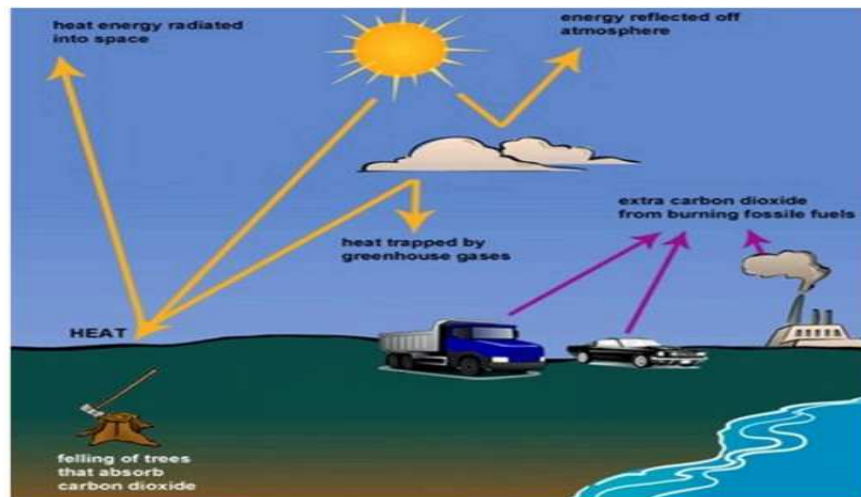
Η κλιματική αλλαγή γίνεται αισθητή με την αύξηση της θερμοκρασίας, τη συνεπαγόμενη τήξη των πάγων και την άνοδο της στάθμης της θάλασσας, με την αλλαγή των προτύπων των βροχοπτώσεων, την ελάττωση των κρύων ημερονυχτίων και την αύξηση των αντίστοιχων θερμών, καθώς και από την εξάπλωση των ξηρών εκτάσεων.

Τα αίτια της κλιματικής αυτής αλλαγής εντοπίζονται κυρίως σε ένα στοιχείο, αυτό της αύξησης της ηλιακής ακτινοβολίας που παγιδεύεται εντός της ατμόσφαιρας της γης (Jacob, 1999). Το κλίμα της γης εξαρτάται άμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία είναι η κύρια μορφή ενέργειας του πλανήτη.

Η ηλιακή ενέργεια φτάνει στην γη υπό τη μορφή ηλιακής ακτινοβολίας. Η πολύ θερμή επιφάνεια του ήλιου εκπέμπει ακτινοβολία, ένα μέρος της οποίας φτάνει στην γη. Το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη εξαρτάται από τη μεταξύ τους απόσταση, για αυτό και υπάρχει μεταβολή της θερμοκρασίας ανάλογα με την εποχή.

Η ακτινοβολία αυτή μειώνεται περαιτέρω, καθώς διαπερνά τα στρώματα της ατμόσφαιρας η οποία περιβάλλει την επιφάνειά της. Η ατμόσφαιρα της γης αποτελείται από διάφορα αέρια και σωματίδια, όπως άζωτο, οξυγόνο, υδρατμούς, διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο, μεθάνιο και άλλα. Το 30% περίπου της ακτινοβολίας ανακλάται πίσω στο διάστημα ενώ το 19% περίπου απορροφάται από τα αέρια της ατμόσφαιρας. Περίπου το 51% φτάνει στην επιφάνεια του πλανήτη.

Από την ενέργεια αυτή, ένα μέρος της ανακλάται πίσω στο διάστημα ενώ η υπόλοιπη απορροφάται και θερμαίνει την επιφάνεια, με αποτέλεσμα και αυτή να εκπέμπει ακτινοβολία, σε ένα μέρος, πίσω στο διάστημα. Έτσι, επέρχεται μία ισορροπία και η θερμοκρασία παραμένει τελικά σταθερή. Χωρίς την επέμβαση όμως της ατμόσφαιρας, η ισορροπία αυτή θα οδηγούσε στην σταθερή θερμοκρασία των  $-18^{\circ}\text{C}$  περίπου. Η ατμόσφαιρα συγκρατεί ένα ποσοστό της ακτινοβολούμενης πίσω στο διάστημα ενέργειας.



*Εικόνα 3.1: Το φαινόμενο του θερμοκηπίου σχηματικά*

Τα αέρια του θερμοκηπίου απορροφούν την υπέρυθρη ακτινοβολία από τη γη και εκπέμπουν εκ νέου μια σημαντική αναλογία πίσω στην επιφάνεια της. Αυτό στη συνέχεια αντανακλάται πίσω στην ατμόσφαιρα και στη συνέχεια πάλι πίσω πάνω στην επιφάνεια της γης και ούτω καθεξής. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται φαινόμενο του θερμοκηπίου και αυξάνει τελικά την θερμοκρασία της επιφάνειας της γης. Ως αποτέλεσμα, η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της γης κυμαίνεται γύρω στους 15°C.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) θεωρείται το κυριότερο αέριο του θερμοκηπίου το οποίο εμπλέκεται στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Αν και το αέριο αυτό δεν είναι αυτό με την μεγαλύτερη δυνατότητα ανάκλασης ακτινοβολίας, σε απόλυτες τιμές (λχ. το μεθάνιο είναι 34 φορές πιο ισχυρό σε αυτό τον τομέα από το διοξείδιο του άνθρακα), εντούτοις λόγω της μεγάλης αύξησης των επιπέδων του και των εκπομπών, έχει επηρεάσει την υπερθέρμανση του πλανήτη σημαντικά (Mitchell, 1989).

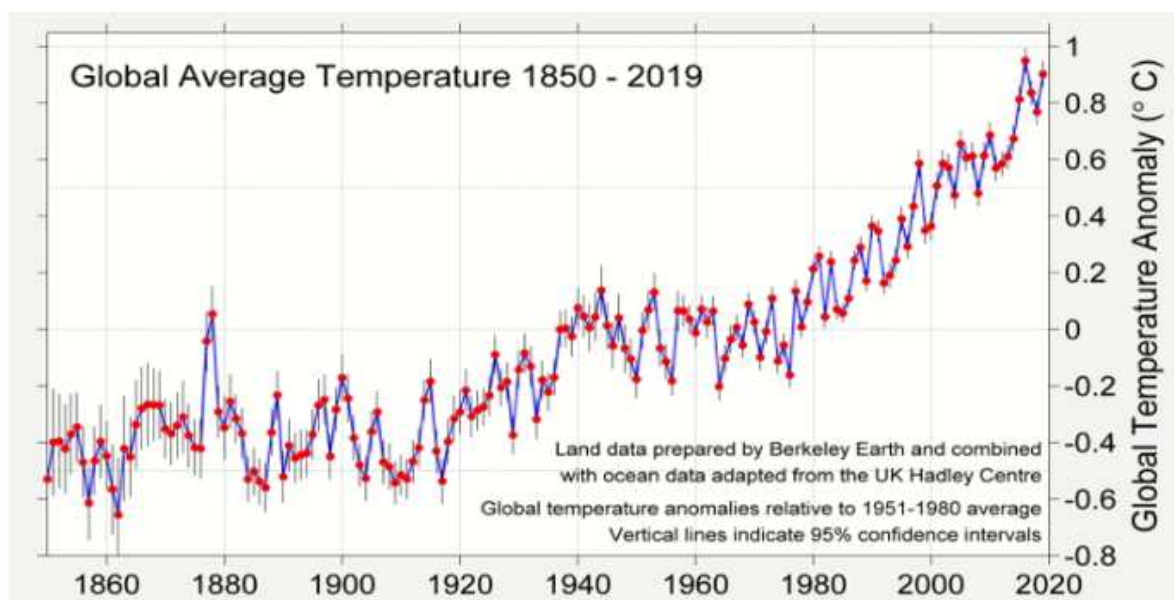
Εκτιμάται ότι κατά τον τελευταίο αιώνα, η παγκόσμια θερμοκρασία της επιφάνειας της γης έχει αυξηθεί περίπου μεταξύ 0,6°C και 0,8°C και έχει ρυθμιστεί να αυξήσει περαιτέρω τον επόμενο αιώνα. Εφόσον το CO<sub>2</sub> θεωρείται ως ο κύριος ένοχος της κλιματικής αλλαγής, είναι χρήσιμο να εκτιμηθεί η πηγή του στην ατμόσφαιρα και πώς η συγκέντρωση του μπορεί να ρυθμίζεται για να δημιουργήσει μια ευνοϊκή θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης. Το CO<sub>2</sub> εκπέμπεται μέσω φυσικών διεργασιών, καθώς και από ανθρώπινες ενέργειες.

Οι εκπομπές του CO<sub>2</sub> οφείλονται σε πληθώρα δραστηριοτήτων, φυσικών και ανθρωπογενών. Κυτταρική αναπνοή, ηφαιστειακές δραστηριότητες, εκπομπή από τους



ωκεανούς λόγω αύξησης της θερμοκρασίας αυτών και μείωσης της διαλυτότητάς του στο νερό, αποσύνθεση νεκρής οργανικής ύλης, ανασκαφές, καύση ορυκτών καυσίμων, καύση οργανικής ύλης είναι μερικές μόνο από τις δραστηριότητες που συμμετέχουν σε έναν κύκλο απελευθέρωσης του αερίου στην ατμόσφαιρα. Παράλληλα, αυτό αποθηκεύεται στους οργανισμούς (φωτοσύνθεση) και στους ωκεανούς.

Η κύρια κινητήρια δύναμη της πρόσφατης κλιματικής αλλαγής είναι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από ανθρώπινες δραστηριότητες. Όσον αφορά το CO<sub>2</sub>, ο κατασκευαστικός τομέας, ο τομέας των μεταφορών και οι δραστηριότητες για θέρμανση έχουν την κυρίαρχη θέση ανάμεσα στις δραστηριότητες που επιβαρύνουν το κλίμα. Τα αέρια του θερμοκηπίου όμως, όπως θα δούμε, δεν περιορίζονται μόνο στο διοξείδιο του άνθρακα. Μεθάνιο από την βιομηχανία κρεατοπαραγωγής, χλωροφθοράνθρακες (CFCs) και άλλοι ρύποι διαδραματίζουν επίσης καθοριστικό ρόλο.



Εικόνα 3.2: Η εξέλιξη της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας (NASA, 2018)

Η αύξηση αυτή της θερμοκρασίας του πλανήτη και η εν γένει κλιματική αλλαγή έχουν οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της συχνότητας αλλά και της έντασης ακραίων καιρικών φαινομένων στις μέρες μας σε όλο τον πλανήτη. Κινητήριος δύναμη όλων των μετεωρολογικών συστημάτων του πλανήτη αποτελεί η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αερίων αλλά και στερεών σωμάτων της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της Γης, η οποία συνεχώς αυξάνεται και οδηγεί σε ενεργειακά ισχυρά φαινόμενα.

Παράλληλα, το κλίμα πολλών περιοχών του πλανήτη αλλάζει άρδην, με δυσμενή αποτελέσματα για τους κατοίκους περιοχών που πλήττονται, αφού πλήττει τις καλλιέργειες

και τις ήδη υπάρχουσες υποδομές των περιοχών αυτών. Έτσι, η κλιματική αλλαγή έχει οδηγήσει σε δυσμενείς καταστάσεις της οποίες και ο κρατικός μηχανισμός καλείται να αντιμετωπίσει πλέον.

### **3.3 Κλιματική αλλαγή και δασικές πυρκαγιές**

Η κλιματική αλλαγή συνδέεται στενά με την αύξηση της συχνότητας, της έντασης και της έκτασης των δασικών πυρκαγιών παγκοσμίως. Η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας, η οποία έχει ανέλθει κατά περίπου 1°C από τα τέλη του 19ου αιώνα, δημιουργεί πιο ζεστές και ξηρές συνθήκες. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες προκαλούν μεγαλύτερη εξάτμιση της υγρασίας από το έδαφος και τη βλάστηση, καθιστώντας τα δάση πιο ξηρά και συνεπώς πιο επιρρεπή στην ανάφλεξη. Αυτό αυξάνει την ευφλεκτότητα της βλάστησης και μειώνει την υγρασία στα δέντρα και τα φυτά, κάνοντάς τα πιο ευάλωτα στις πυρκαγιές.

Οι αλλαγές στα πρότυπα βροχοπτώσεων που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή συμβάλλουν επίσης στην αύξηση των δασικών πυρκαγιών. Σε πολλές περιοχές, οι παρατεταμένες ξηρασίες γίνονται πιο συχνές και έντονες. Για παράδειγμα, στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες, οι ξηρασίες έχουν αυξηθεί σε διάρκεια και ένταση τις τελευταίες δεκαετίες, γεγονός που έχει οδηγήσει σε σημαντικές πυρκαγιές όπως αυτές στην Καλιφόρνια. Αυτές οι ξηρασίες στεγνώνουν τη βλάστηση, δημιουργώντας μεγάλες ποσότητες εύφλεκτων υλικών που μπορούν εύκολα να αναφλεγούν και να διατηρήσουν την καύση.

Επιπλέον, οι αλλαγές στα ατμοσφαιρικά κυκλοφοριακά μοτίβα λόγω της κλιματικής αλλαγής μπορεί να αυξήσουν την ταχύτητα και τη συχνότητα των ανέμων. Οι ισχυρότεροι άνεμοι παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξάπλωση των πυρκαγιών, μεταφέροντας φλόγες και σπύρες σε μεγάλες αποστάσεις και επεκτείνοντας γρήγορα την περιοχή της πυρκαγιάς. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί σε περιοχές όπως η Αυστραλία, όπου οι έντονοι άνεμοι έχουν συμβάλει στη ραγδαία εξάπλωση καταστροφικών πυρκαγιών τα τελευταία χρόνια.

Η κλιματική αλλαγή επιδρά επίσης στη βλάστηση, μεταβάλλοντας τη σύνθεση και την κατανομή των φυτών. Η αύξηση των θερμοκρασιών και οι αλλαγές στα πρότυπα βροχοπτώσεων μπορεί να ευνοήσουν την ανάπτυξη ειδών που είναι πιο επιρρεπή στις πυρκαγιές. Επιπλέον, οι συνθήκες ξηρασίας μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση της ξηρής, νεκρής βλάστησης, που λειτουργεί ως καύσιμο για τις πυρκαγιές. Η παρουσία μεγάλων ποσοτήτων ξηρής βιομάζας αυξάνει την ένταση και τη διάρκεια των πυρκαγιών, κάνοντάς τις πιο δύσκολες στην κατάσβεση.

Η κλιματική αλλαγή μπορεί επίσης να παρατείνει την περίοδο των πυρκαγιών, δηλαδή την εποχή του χρόνου κατά την οποία οι πυρκαγιές είναι πιο πιθανές. Σε πολλές περιοχές, οι πιο ζεστές και ξηρές συνθήκες παραμένουν για μεγαλύτερο διάστημα, αυξάνοντας τον κίνδυνο εκδήλωσης πυρκαγιών για μεγαλύτερη περίοδο κάθε χρόνο. Στις δυτικές Ηνωμένες Πολιτείες, για παράδειγμα, η περίοδος των πυρκαγιών έχει επεκταθεί κατά δύο έως τρεις μήνες τις τελευταίες δεκαετίες.

Οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στις δασικές πυρκαγιές είναι ήδη ορατές σε πολλές περιοχές του κόσμου. Η Καλιφόρνια και η Αυστραλία έχουν αντιμετωπίσει σημαντικές και καταστροφικές πυρκαγιές τα τελευταία χρόνια, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τις αυξημένες θερμοκρασίες και τις παρατεταμένες ξηρασίες. Παράλληλα, στην περιοχή της Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, οι δασικές πυρκαγιές έχουν γίνει πιο συχνές και καταστροφικές λόγω των αυξημένων θερμοκρασιών και των ξηροθερμικών συνθηκών. Το καλοκαίρι του 2023, η Ελλάδα αντιμετώπισε μία από τις χειρότερες περιόδους πυρκαγιών στην ιστορία της, με τεράστιες εκτάσεις δασικών περιοχών να καταστρέφονται και χιλιάδες ανθρώπους να εκκενώνονται από τα σπίτια τους.

Η αύξηση της θερμοκρασίας στην Ελλάδα είναι ένα από τα πιο εμφανή αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής. Οι θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών συχνά ξεπερνούν τους 40°C, με αποτέλεσμα τη δημιουργία συνθηκών καύσωνα που καθιστούν τα δάση πιο ξηρά και ευάλωτα σε πυρκαγιές. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί επίσης μεγαλύτερη εξάτμιση της υγρασίας από το έδαφος και τη βλάστηση, δημιουργώντας συνθήκες που ευνοούν την εκδήλωση πυρκαγιών.

Η αύξηση της συχνότητας και της έντασης των δασικών πυρκαγιών είναι ένα από τα πιο ανησυχητικά αποτελέσματα της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα. Τα τελευταία χρόνια, η Ελλάδα έχει βιώσει μια αύξηση στη συχνότητα και την ένταση των δασικών πυρκαγιών, οι οποίες γίνονται πιο εκτεταμένες και καταστροφικές. Οι πυρκαγιές κατακαίγουν μεγάλες εκτάσεις δασικής και αγροτικής γης, προκαλώντας σημαντικές περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις.

Οι καταστροφικές πυρκαγιές οδηγούν σε απώλεια σημαντικών δασικών εκτάσεων και βιοτόπων, επηρεάζοντας τη βιοποικιλότητα και τη λειτουργία των οικοσυστημάτων. Τα δάση της Ελλάδας, που φιλοξενούν πολλά ενδημικά και απειλούμενα είδη, καταστρέφονται, οδηγώντας σε μακροπρόθεσμες περιβαλλοντικές συνέπειες. Οι πυρκαγιές προκαλούν επίσης σοβαρούς κινδύνους για την ανθρώπινη ζωή και περιουσία. Οι καταστροφικές πυρκαγιές όπως αυτές στο Μάτι το 2018, όπου έχασαν τη ζωή τους πάνω από 100

άνθρωποι, δείχνουν τη σοβαρότητα του προβλήματος. Εκατοντάδες σπίτια και επιχειρήσεις έχουν καταστραφεί, προκαλώντας σημαντική οικονομική ζημιά.

Οι δασικές πυρκαγιές έχουν επίσης σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις, καθώς καταστρέφουν γεωργικές καλλιέργειες, δασικούς πόρους και τουριστικές υποδομές. Οι οικονομικές ζημιές που προκαλούνται από τις πυρκαγιές είναι τεράστιες, επηρεάζοντας την τοπική και εθνική οικονομία. Επιπλέον, οι πυρκαγιές προκαλούν σοβαρή περιβαλλοντική υποβάθμιση, με απώλειες εδαφών, διάβρωση, μόλυνση υδάτων και απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, επιδεινώνοντας περαιτέρω την κλιματική αλλαγή.

### **3.4 Μελέτης της εξέλιξης και των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής**

Η κλιματική αλλαγή έχει σοβαρές επιπτώσεις στην Ελλάδα και την περιοχή της Μεσογείου, και υπάρχουν πολλές μελέτες και κλιματικά μοντέλα που εξετάζουν την εξέλιξη αυτών των φαινομένων και τις συνέπειές τους.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι εκθέσεις της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) αποτελούν μια σημαντική πηγή πληροφοριών. Οι εκθέσεις αυτές παρέχουν αναλυτικές προβλέψεις για την αύξηση της θερμοκρασίας, τις μεταβολές στις βροχοπτώσεις και άλλα κλιματικά φαινόμενα. Η έκθεση του 2021 (AR6) του IPCC τονίζει ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη συμβάλλει ήδη σε ακραία καιρικά φαινόμενα όπως καύσωνες, ξηρασίες και πυρκαγιές, και προβλέπει ότι αυτές οι τάσεις θα επιδεινωθούν εάν δεν ληφθούν άμεσα μέτρα για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Οι οργανισμοί NASA και NOAA διεξάγουν επίσης εκτεταμένες έρευνες και παρέχουν δεδομένα που είναι κρίσιμα για την κατανόηση των παγκόσμιων κλιματικών τάσεων και των επιπτώσεών τους. Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και την πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για τη διαμόρφωση πολιτικών και στρατηγικών αντιμετώπισης.

Στην περιοχή της Μεσογείου, η ομάδα ειδικών MedECC (Mediterranean Experts on Climate and Environmental Change) έχει δημοσιεύσει σημαντικές εκθέσεις για την κλιματική αλλαγή. Σύμφωνα με την έκθεση του 2020, η Μεσόγειος θερμαίνεται κατά 20% γρηγορότερα από τον παγκόσμιο μέσο όρο. Αυτό έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία, την οικονομία και το περιβάλλον της περιοχής, με αυξανόμενους κινδύνους από καύσωνες, ξηρασίες, πλημμύρες και δασικές πυρκαγιές. Η έκθεση προβλέπει ότι η μέση θερμοκρασία στην περιοχή θα αυξηθεί κατά 2-3°C έως τα μέσα του 21ου αιώνα.

Η πρωτοβουλία EURO-CORDEX χρησιμοποιεί περιφερειακά κλιματικά μοντέλα για να μελετήσει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε διάφορες περιοχές της Ευρώπης, συμπεριλαμβανομένης της Μεσογείου. Τα μοντέλα αυτά παρέχουν λεπτομερείς προβλέψεις για τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες, βοηθώντας στην καλύτερη κατανόηση των τοπικών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

Το Μεσογειακό Κέντρο για τις Κλιματικές Μεταβολές (CMCC) διεξάγει έρευνες που καλύπτουν θέματα όπως οι μεταβολές στις βροχοπτώσεις, οι ακραίες καιρικές συνθήκες και η επίδραση στη γεωργία και τα οικοσυστήματα. Οι μελέτες τους δείχνουν ότι η περιοχή της Μεσογείου θα αντιμετωπίσει μείωση των συνολικών βροχοπτώσεων, αλλά αύξηση των ακραίων βροχοπτώσεων, οδηγώντας σε συχνότερες ξηρασίες και πλημμύρες.

### **3.5 Κλιματικά σενάρια IPCC AR6-WGI**

Ο IPCC AR6-WGI Atlas αποτελεί μέρος της Έκτης Έκθεσης Αξιολόγησης (AR6) της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC) και συγκεκριμένα ανήκει στην Ομάδα Εργασίας I (Working Group I - WGI). Ο Άτλαντας αυτός παρέχει μια εκτενή και λεπτομερή ανάλυση των παρατηρήσεων και προβλέψεων σχετικά με τις κλιματικές αλλαγές σε διάφορες περιοχές του κόσμου.

Ο Άτλαντας προσφέρει λεπτομερείς χάρτες και γραφήματα που δείχνουν πώς οι κλιματικές μεταβλητές, όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση και η υγρασία, μεταβάλλονται σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Αυτή η περιφερειακή ανάλυση βοηθά στην κατανόηση των κλιματικών επιπτώσεων σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο. Επιπλέον, περιλαμβάνει δεδομένα από παρατηρήσεις του παρελθόντος καθώς και μοντέλα προβλέψεων για το μέλλον, βοηθώντας στην κατανόηση των τάσεων και των πιθανών μελλοντικών κλιματικών σεναρίων, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά επίπεδα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Μια σημαντική πτυχή του Άτλαντα είναι η διαδραστική πλατφόρμα του στο διαδίκτυο, η οποία επιτρέπει στους χρήστες να εξερευνήσουν τα κλιματικά δεδομένα και τις προβλέψεις με τρόπο που είναι εύκολα κατανοητός και προσβάσιμος. Οι χρήστες μπορούν να επιλέξουν συγκεκριμένες περιοχές, χρονικές περιόδους και κλιματικές παραμέτρους για να δουν τις αλλαγές και τις προβλέψεις. Ο Άτλαντας παρέχει κρίσιμα δεδομένα και πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους υπεύθυνους για τη χάραξη πολιτικής, τους επιστήμονες και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς για να λάβουν ενημερωμένες αποφάσεις σχετικά με την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Οι πληροφορίες που περιέχονται στον Άτλαντα μπορούν να βοηθήσουν στον σχεδιασμό

προσαρμοστικών μέτρων και στρατηγικών μετριασμού των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

Επιπλέον, ο Άτλαντας εξετάζει διάφορα σενάρια εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, περιλαμβάνοντας τα σενάρια χαμηλών, μεσαίων και υψηλών εκπομπών. Αυτά τα σενάρια βοηθούν στην αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής υπό διαφορετικές συνθήκες και πολιτικές εκπομπών. Συνολικά, ο IPCC AR6-WGI Atlas είναι ένα πολύτιμο εργαλείο για την κατανόηση της κλιματικής αλλαγής σε περιφερειακό επίπεδο και παρέχει βασικές πληροφορίες που είναι απαραίτητες για την προετοιμασία και την αντίδραση στις προκλήσεις που αυτή επιφέρει.

### **3.5.1 Το σενάριο SSP245**

Το σενάριο SSP245 (Shared Socioeconomic Pathway 2-4.5) του IPCC AR6-WGI Atlas είναι ένα από τα πέντε κύρια σενάρια που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν πιθανά μελλοντικά μονοπάτια κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης και τις αντίστοιχες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Το σενάριο αυτό συνδυάζει μια μέτρια κοινωνικοοικονομική πορεία με έναν μέτριο βαθμό δράσης για τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, και αποσκοπεί να αποτυπώσει έναν πιθανό μελλοντικό κόσμο όπου οι παγκόσμιες θερμοκρασίες αυξάνονται κατά περίπου 2,5°C έως το τέλος του 21ου αιώνα σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα.

Το SSP245 προϋποθέτει ότι οι πολιτικές περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου εφαρμόζονται, αλλά όχι στον βαθμό που απαιτείται για να επιτευχθούν οι πιο φιλόδοξοι στόχοι της Συμφωνίας των Παρισίων, οι οποίοι στοχεύουν στη διατήρηση της αύξησης της θερμοκρασίας κάτω από τους 2°C. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μειώνονται με αργούς ρυθμούς, καθώς οι χώρες προωθούν τη μετάβαση σε καθαρές ενεργειακές πηγές και βελτιώνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα. Παρόλα αυτά, οι προσπάθειες αυτές δεν είναι επαρκώς συντονισμένες ή εντατικές για να επιφέρουν τις απαραίτητες αλλαγές σε παγκόσμιο επίπεδο.

Στο σενάριο SSP245, η παγκόσμια κοινότητα αντιμετωπίζει τις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής με μικτή επιτυχία. Αν και γίνονται βήματα προς την κατεύθυνση της μείωσης των εκπομπών, τα κοινωνικοοικονομικά εμπόδια και οι πολιτικές αντιστάσεις περιορίζουν την αποτελεσματικότητα των μέτρων. Οι χώρες εφαρμόζουν μέτρα προσαρμογής για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής, όπως η βελτίωση των υποδομών, η ανάπτυξη ανθεκτικών γεωργικών πρακτικών και η ενίσχυση των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης για ακραία καιρικά φαινόμενα.

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο σενάριο SSP245 είναι σημαντικές αλλά όχι καταστροφικές. Η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2,5°C συνοδεύεται από την αύξηση της έντασης και της συχνότητας των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως οι καύσωνες, οι πλημμύρες και οι ξηρασίες. Οι παράκτιες περιοχές αντιμετωπίζουν μέτρια άνοδο της στάθμης της θάλασσας, η οποία προκαλεί διάβρωση των ακτών και αυξάνει τον κίνδυνο πλημμυρών. Τα οικοσυστήματα υφίστανται πίεση λόγω των αλλαγών στις κλιματικές συνθήκες, αλλά μερικά από αυτά μπορούν να προσαρμοστούν στις νέες συνθήκες.

Στο πλαίσιο του SSP245, οι κοινωνίες πρέπει να αναπτύξουν στρατηγικές προσαρμογής για να αντιμετωπίσουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Αυτό περιλαμβάνει τη βελτίωση των υποδομών για την ανθεκτικότητα στις ακραίες καιρικές συνθήκες, την προστασία των παράκτιων περιοχών από την άνοδο της στάθμης της θάλασσας και την υιοθέτηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών. Η διεθνής συνεργασία και η ανταλλαγή τεχνογνωσίας είναι κρίσιμες για την επιτυχία αυτών των προσπαθειών.

Το SSP245 αντανακλά έναν κόσμο όπου η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής γίνεται με μέτρια επιτυχία, ενώ οι κοινωνικοοικονομικές ανισότητες και τα πολιτικά εμπόδια περιορίζουν την αποτελεσματικότητα των μέτρων. Η πορεία αυτή υποδηλώνει ότι, αν και οι κοινωνίες κάνουν προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών και την προσαρμογή στις νέες κλιματικές συνθήκες, η επίτευξη των πιο φιλόδοξων στόχων για την κλιματική αλλαγή παραμένει μια πρόκληση. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής είναι αισθητές και οι κοινωνίες πρέπει να συνεχίσουν να προσαρμόζονται και να βελτιώνουν τις πολιτικές τους για να προστατεύσουν τις κοινότητες και τα οικοσυστήματα από τις μελλοντικές κλιματικές αλλαγές.

### **3.5.2 Το σενάριο SSP370**

Το σενάριο SSP370 (Shared Socioeconomic Pathway 3-7.0) του IPCC AR6-WGI Atlas απεικονίζει ένα μέλλον με υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και περιορισμένες πολιτικές δράσης για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Αντιπροσωπεύει ένα "business as usual" σενάριο, όπου οι εκπομπές συνεχίζουν να αυξάνονται σχεδόν ανεξέλεγκτα.

Στο σενάριο SSP370, οι παγκόσμιες θερμοκρασίες αναμένεται να αυξηθούν κατά περίπου 3,7°C έως το τέλος του 21ου αιώνα σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Αυτή η δραματική αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται στη συνεχή αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, καθώς οι πολιτικές περιορισμού είναι αδύναμες ή ανεπαρκείς. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου παραμένουν υψηλές,

κυρίως λόγω της συνεχιζόμενης εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και της αποτυχίας στην προώθηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η κοινωνικοοικονομική κατάσταση στο σενάριο SSP370 χαρακτηρίζεται από υψηλές ανισότητες και περιορισμένη διεθνή συνεργασία. Η κοινωνία δεν καταφέρνει να αντιμετωπίσει αποτελεσματικά τις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής, λόγω των βαθιών κοινωνικών και οικονομικών διαχωρισμών. Οι πλουσιότερες χώρες ενδεχομένως να διαθέτουν περισσότερους πόρους για την προσαρμογή στις αλλαγές του κλίματος, ενώ οι φτωχότερες χώρες και κοινότητες παραμένουν ιδιαίτερα ευάλωτες στις αρνητικές επιπτώσεις.

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο σενάριο SSP370 είναι σοβαρές και εκτεταμένες. Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί πιο συχνά και έντονα ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως καύσωνες, ξηρασίες και έντονες βροχοπτώσεις. Οι παράκτιες περιοχές αντιμετωπίζουν σημαντική άνοδο της στάθμης της θάλασσας, οδηγώντας σε διάβρωση των ακτών και αυξημένο κίνδυνο πλημμυρών. Οι δασικές πυρκαγιές γίνονται πιο συχνές και καταστροφικές, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και των ξηρών συνθηκών.

Η βιοποικιλότητα και τα οικοσυστήματα βρίσκονται υπό σοβαρή πίεση στο σενάριο SSP370. Οι αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες προκαλούν μεταβολές στους βιοτόπους, απειλώντας την επιβίωση πολλών ειδών. Τα θαλάσσια οικοσυστήματα πλήττονται από την αύξηση της θερμοκρασίας των ωκεανών και την οξίνιση των υδάτων, ενώ τα χερσαία οικοσυστήματα αντιμετωπίζουν αυξημένη ξηρασία και απώλεια βιοποικιλότητας.

Η γεωργία και η παραγωγή τροφίμων επηρεάζονται αρνητικά από την κλιματική αλλαγή στο σενάριο SSP370. Οι ακραίες καιρικές συνθήκες και οι αλλαγές στα πρότυπα των βροχοπτώσεων μειώνουν την απόδοση των καλλιεργειών και προκαλούν ζημιές στις γεωργικές εκτάσεις. Η αυξημένη ξηρασία και οι ακραίες θερμοκρασίες επιδεινώνουν την κατάσταση, οδηγώντας σε ελλείψεις τροφίμων και αυξημένες τιμές, πλήττοντας ιδιαίτερα τις φτωχότερες κοινότητες.

Η ανθρώπινη υγεία είναι επίσης ευάλωτη στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο σενάριο SSP370. Οι ακραίες θερμοκρασίες προκαλούν θερμικές ασθένειες και αυξάνουν τη θνησιμότητα, ενώ οι αλλαγές στις κλιματικές συνθήκες ευνοούν την εξάπλωση λοιμωδών νόσων. Οι πλημμύρες και οι ξηρασίες επιδεινώνουν την πρόσβαση σε καθαρό νερό και υγιεινή, οδηγώντας σε αυξημένο κίνδυνο υγειονομικών κρίσεων.

Η διαχείριση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο σενάριο SSP370 απαιτεί ριζοσπαστικές και καινοτόμες προσεγγίσεις. Η προσαρμογή στις νέες κλιματικές συνθήκες



γίνεται μια επιτακτική ανάγκη για τις κοινωνίες, που πρέπει να επενδύσουν σε ανθεκτικές υποδομές και βιώσιμες πρακτικές. Η διεθνής συνεργασία και η αλληλεγγύη είναι κρίσιμες για την αντιμετώπιση των προκλήσεων, καθώς καμία χώρα δεν μπορεί να αντιμετωπίσει μόνη της τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής.

Συνοψίζοντας, το σενάριο SSP370 του IPCC AR6-WGI Atlas απεικονίζει ένα μέλλον με υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και σοβαρές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Η κοινωνία αποτυγχάνει να εφαρμόσει αποτελεσματικές πολιτικές μετριασμού, οδηγώντας σε δραματική αύξηση της θερμοκρασίας και εκτεταμένες περιβαλλοντικές και κοινωνικές προκλήσεις. Η αντιμετώπιση αυτών των επιπτώσεων απαιτεί συντονισμένη διεθνή δράση, καινοτόμες λύσεις και επενδύσεις σε ανθεκτικές υποδομές και βιώσιμες πρακτικές, προκειμένου να προστατευθούν οι ανθρώπινες ζωές και τα οικοσυστήματα από τις καταστροφικές συνέπειες της κλιματικής αλλαγής.

## **4. Μεθοδολογία και υπολογιστική προσέγγιση μελέτης περιπτώσεων**

### **4.1 Επιλογή περιοχής μελέτης**

Ο νομός Χανίων επιλέχθηκε για τη σύγκριση πραγματικών πυρκαγιών με τα αποτελέσματα από υπολογιστικά εργαλεία λόγω διαφόρων λόγων, που σχετίζονται τόσο με την προσωπική εμπειρία του συντάκτη όσο και με τη διαθεσιμότητα λεπτομερών δεδομένων αλλά και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής. Ο συντάκτης του έργου είναι πυροσβεστικός υπάλληλος που υπηρετεί στο Νομό Χανίων και έχει προσωπική εμπειρία στην αντιμετώπιση των πυρκαγιών που έπληξαν τον νομό, της βλάστησης και των κλιματολογικών συνθηκών, γεγονός που του επιτρέπει να κατανοήσει και να αξιολογήσει καλύτερα την πραγματικότητα των συμβάντων.

Η διαθεσιμότητα δεδομένων είναι ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας για την επιλογή του νομού Χανίων. Οι πυρκαγιές που έχουν εκδηλωθεί στην περιοχή έχουν καταγραφεί λεπτομερώς από την Πυροσβεστική Υπηρεσία, παρέχοντας ένα πλούσιο σύνολο δεδομένων για την ανάλυση. Επιπλέον, οι μετεωρολογικοί σταθμοί στην περιοχή προσφέρουν ακριβή και συνεχώς ενημερωμένα δεδομένα για τις καιρικές συνθήκες, που είναι κρίσιμες για την κατανόηση της συμπεριφοράς των πυρκαγιών. Αυτά τα δεδομένα περιλαμβάνουν την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, τη θερμοκρασία, την υγρασία και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν την εξάπλωση της φωτιάς.

Ο νομός Χανίων έχει επίσης μοναδικά γεωγραφικά και κλιματικά χαρακτηριστικά που τον καθιστούν ιδανικό για μια τέτοια μελέτη. Η περιοχή διαθέτει ένα ποικιλόμορφο τοπίο που περιλαμβάνει βουνά, κοιλάδες, δάση και παράκτιες ζώνες, προσφέροντας ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών συνθηκών για την ανάλυση των πυρκαγιών. Αυτές οι διαφοροποιήσεις στο τοπίο επηρεάζουν τη συμπεριφορά των πυρκαγιών και παρέχουν μια πολύτιμη ευκαιρία για τη δοκιμή και την επαλήθευση των υπολογιστικών εργαλείων σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, το μεσογειακό κλίμα της περιοχής, με τα ζεστά και ξηρά καλοκαίρια, συμβάλλει στην αύξηση της συχνότητας και της έντασης των πυρκαγιών, καθιστώντας τον νομό Χανίων ένα καίριο σημείο για τη μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στην εμφάνιση και την εξάπλωση των πυρκαγιών.

Η επιλογή του νομού Χανίων για τη σύγκριση πραγματικών πυρκαγιών με τα αποτελέσματα από υπολογιστικά εργαλεία βασίζεται σε συνδυασμό προσωπικής εμπειρίας, διαθεσιμότητας λεπτομερών δεδομένων και μοναδικών γεωγραφικών και κλιματικών χαρακτηριστικών της περιοχής. Η προσωπική εμπειρία του συντάκτη παρέχει πολύτιμες γνώσεις και κατανόηση της πραγματικότητας των πυρκαγιών, ενώ τα λεπτομερή δεδομένα

από την Πυροσβεστική και τις μετεωρολογικές υπηρεσίες επιτρέπουν μια ακριβή και αξιόπιστη ανάλυση. Τα μοναδικά γεωγραφικά και κλιματικά χαρακτηριστικά του νομού Χανίων προσφέρουν ένα ευρύ φάσμα συνθηκών για τη δοκιμή των υπολογιστικών εργαλείων, καθιστώντας την περιοχή ιδανική για τη μελέτη των πυρκαγιών και των επιπτώσεών τους.

## **4.2 Χαρακτηριστικά της περιοχής των Χανίων**

Ο νομός Χανίων βρίσκεται στη δυτική Κρήτη και αποτελεί έναν από τους τέσσερις νομούς του νησιού. Διοικητικά, ο νομός περιλαμβάνει την πόλη των Χανίων, που είναι η πρωτεύουσα, καθώς και πολλές κωμοπόλεις και χωριά που διασπείρονται σε μια έκταση περίπου 2.376 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Η διοικητική δομή του νομού αποτελείται από πέντε δήμους: Χανίων, Πλατανιά, Κισσάμου, Αποκορώνου και Σφακίων. Η πόλη των Χανίων είναι γνωστή για την πλούσια ιστορία της και τα πολυάριθμα μνημεία από την ενετική και οθωμανική περίοδο, κάνοντάς την έναν δημοφιλή τουριστικό προορισμό.

Πληθυσμιακά, ο νομός Χανίων έχει περίπου 144.259 κατοίκους σύμφωνα με την απογραφή του 2021. Η πλειοψηφία του πληθυσμού ζει στην πόλη των Χανίων, ενώ οι υπόλοιποι κάτοικοι διαμένουν σε μικρότερα αστικά κέντρα και αγροτικές περιοχές. Η οικονομία του νομού βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στον τουρισμό, τη γεωργία και την κτηνοτροφία. Οι κάτοικοι ασχολούνται επίσης με την παραγωγή ελαιολάδου, κρασιού και άλλων γεωργικών προϊόντων, τα οποία είναι εξαιρετικής ποιότητας και αποτελούν σημαντικό μέρος των εξαγωγών της περιοχής.

Μορφολογικά, ο νομός Χανίων χαρακτηρίζεται από ένα ποικιλόμορφο τοπίο που περιλαμβάνει βουνά, κοιλάδες, φαράγγια και παράκτιες ζώνες. Τα Λευκά Όρη, που αποτελούν το κυρίαρχο ορεινό συγκρότημα της περιοχής, φτάνουν σε ύψη άνω των 2.450 μέτρων και καλύπτονται από χιόνια κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Το φαράγγι της Σαμαριάς, το μεγαλύτερο φαράγγι της Ευρώπης, είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς προορισμούς για πεζοπορία. Η παράκτια ζώνη του νομού περιλαμβάνει μερικές από τις πιο γνωστές παραλίες της Ελλάδας, όπως τα Φαλάσαρνα, ο Μπάλος και το Ελαφονήσι, που προσελκύουν χιλιάδες τουρίστες κάθε χρόνο.

Η χλωρίδα και η πανίδα του νομού Χανίων είναι εξαιρετικά πλούσιες και ποικιλόμορφες. Η περιοχή φιλοξενεί πολλά ενδημικά είδη φυτών, καθώς και δασώδεις περιοχές με πεύκα, κυπαρίσσια και ελαιώνες. Τα Λευκά Όρη είναι ιδιαίτερα σημαντικά για την χλωρίδα τους, καθώς φιλοξενούν πάνω από 450 είδη φυτών, από τα οποία πολλά είναι ενδημικά. Η πανίδα της περιοχής περιλαμβάνει είδη όπως το αγριοκάτσικο της Κρήτης

(κρι-κρι), αετούς, γύπες και πολλά άλλα πτηνά και θηλαστικά. Οι θαλάσσιες περιοχές γύρω από τα Χανιά είναι πλούσιες σε θαλάσσια ζωή, συμπεριλαμβανομένων δελφινιών και θαλάσσιων χελωνών.

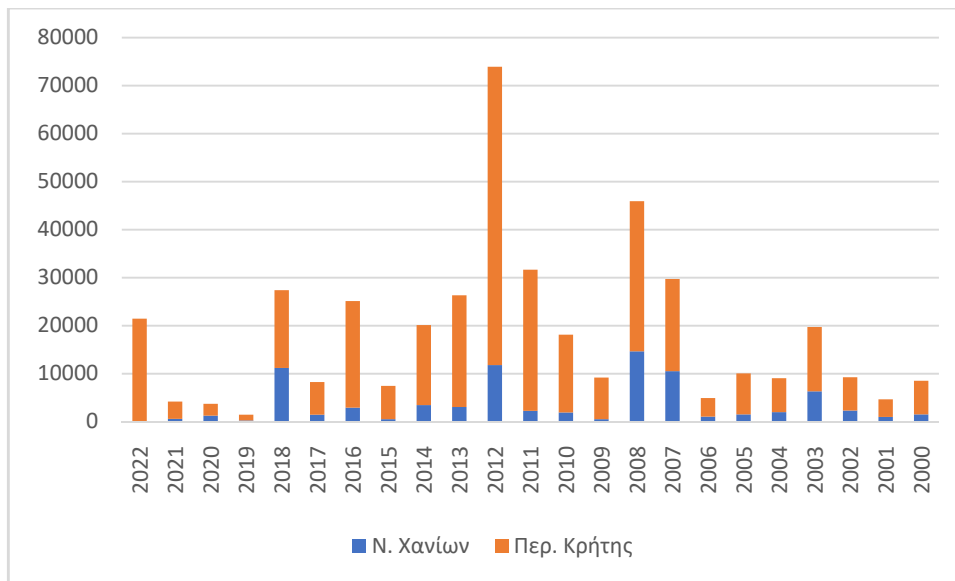
Κλιματικά, ο νομός Χανίων απολαμβάνει ένα μεσογειακό κλίμα με ήπιους χειμώνες και ζεστά, ξηρά καλοκαίρια. Η μέση θερμοκρασία το καλοκαίρι φτάνει τους 30°C, ενώ τον χειμώνα κυμαίνεται γύρω στους 15°C. Οι βροχοπτώσεις είναι συχνότερες κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ το καλοκαίρι οι ξηρασίες είναι συχνές. Αυτές οι κλιματικές συνθήκες δημιουργούν ιδανικό περιβάλλον για τη γεωργία, αλλά επίσης καθιστούν την περιοχή ευάλωτη σε πυρκαγιές κατά τη διάρκεια των ξηρών καλοκαιρινών μηνών.

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στον νομό Χανίων είναι πολυδιάστατες και ανησυχητικές. Η άνοδος της θερμοκρασίας και η αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως καύσωνες και έντονες βροχοπτώσεις, έχουν ήδη αρχίσει να γίνονται αισθητές. Οι παρατεταμένες ξηρασίες επηρεάζουν αρνητικά τη γεωργική παραγωγή και αυξάνουν τον κίνδυνο δασικών πυρκαγιών. Τα Λευκά Όρη, που παραδοσιακά καλύπτονται από χιόνια το χειμώνα, αντιμετωπίζουν μειωμένη χιονοκάλυψη, επηρεάζοντας τόσο τα τοπικά οικοσυστήματα όσο και την υδροδότηση της περιοχής.

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας είναι μια άλλη σοβαρή συνέπεια της κλιματικής αλλαγής που απειλεί τις παράκτιες περιοχές του νομού. Οι παραλίες, που αποτελούν σημαντικό πόλο έλξης για τον τουρισμό, κινδυνεύουν από διάβρωση και πλημμύρες. Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας της θάλασσας επηρεάζει την θαλάσσια ζωή και μπορεί να προκαλέσει αλλαγές στα οικοσυστήματα, όπως η εξάπλωση ξενικών ειδών που ανταγωνίζονται τα ενδημικά είδη.

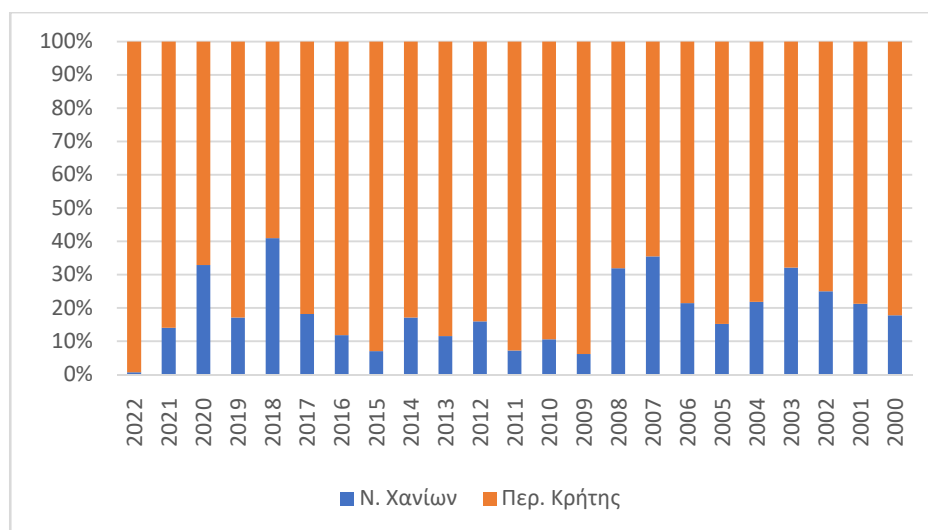
#### **4.2.1 Οι δασικές πυρκαγιές**

Σύμφωνα με στοιχεία από τα επίσημα δεδομένα δασικών πυρκαγιών του Πυροσβεστικού Σώματος, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα της εικόνας 4.1 με το σύνολο καμένων δασικών εκτάσεων (σε στρέμματα).



Εικόνα 4.1. Έκταση καμένων δασικών εκτάσεων Κρήτης και Χανίων (σε στρέμματα) ανά έτος

Παρατηρούμε λοιπόν ότι κατά μέσον όρο καίγονται σε ετήσια βάση 15.000 στρέμματα στην περιφέρεια Κρήτης και στον νομό Χανίων αυτά ανέρχονται σε περίπου 3.600 στρέμματα κατ' έτος κατά μέσο όρο. Η ποσοστιαία κατανομή των καμένων δασικών εκτάσεων αποτυπώνεται στο επόμενο διάγραμμα της εικόνας 4.2.



Εικόνα 4.2. Ποσοστό καμένων εκτάσεων ν. Χανίων επί του συνόλου της περιφέρειας

Σύμφωνα με τα ανωτέρω, το 25% των καμένων δασικών εκτάσεων της Κρήτης εντοπίζεται στο νομό Χανίων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τον πλούσιο φυσικό πλούτο του νομού, καθώς όπως αναφέρθηκε μεγάλο μέρος του αποτελεί προστατευόμενες περιοχές, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πρέπει να ληφθούν μέτρα για την μείωση των πυρκαγιών στον νομό άμεσα.

Αναφορικά με την κατανομή συμβάντων και καμένων εκτάσεων στα διάφορα κλιμάκια – Υπηρεσίες του νομού, παρατηρούμε τα ακόλουθα στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1. Στατιστικά στοιχεία κλιμακίων και Υπηρεσιών ν. Χανίων

Έτος	1ος Π.Σ. Χανίων		Π.Κ. Καμπάνου		Π.Υ. Καστελλίου		Π.Κ. Κάντανου		Π.Υ. Βρυσσών	
	Αρ. Συμβ.	Καμ. Εκτ.	Αρ. Συμβ.	Καμ. Εκτ.	Αρ. Συμβ.	Καμ. Εκτ.	Αρ. Συμβ.	Καμ. Εκτ.	Αρ. Συμβ.	Καμ. Εκτ.
2012	95	3364,9	0	0	66	8141,4	31	153	22	162,2
2013	94	1554,4	12	226,6	67	449	44	625,4	47	181
2014	46	93,7	5	5,2	37	3275,1 8	26	46,59	23	24,2
2015	45	241,94	8	21,3	43	51,63	29	192,75	14	18,61
2016	64	229,94	19	103,42	74	1858,8 6	20	210,32	35	556,19
2017	50	269,5	5	11,05	24	895,9	32	42,3	18	276,75
2018	53	224,62	11	9,5	33	523,14	21	2709,8	25	7757,2
2019	33	63,92	6	102,54	16	5,06	14	64,24	20	20,36
2020	35	30,46	10	128,25	46	122,22	31	467	20	491,2
2021	53	66,94	4	54,51	68	225,15	30	107,31	19	137,61
2022	34	40,28	5	6,7	38	31,55	20	49,64	28	10,91
Σύνολο	602	6140,3	85	669,07	512	15579	298	4668,3	271	9636,2
M.O	55	614	8	61	47	1416	27	424	25	876

Σύμφωνα με στοιχεία του ανωτέρω πίνακα, το Π.Κ. Κάντανου έχει στον τομέα ευθύνης του κατά μέσον όρο το 12.5% των καμένων δασικών εκτάσεων κατ' έτος. Συγκεκριμένα, κατά μέσο όρο καίγονται 424 στρέμματα σε 27 δασικές πυρκαγιές το έτος. Το μεγαλύτερο ποσοστό των καμένων εκτάσεων αφορά περιοχές χαμηλής βλάστησης.

Πίνακας 4.2. Μετεωρολογικά δεδομένα για Κάνδανο το έτος 2022

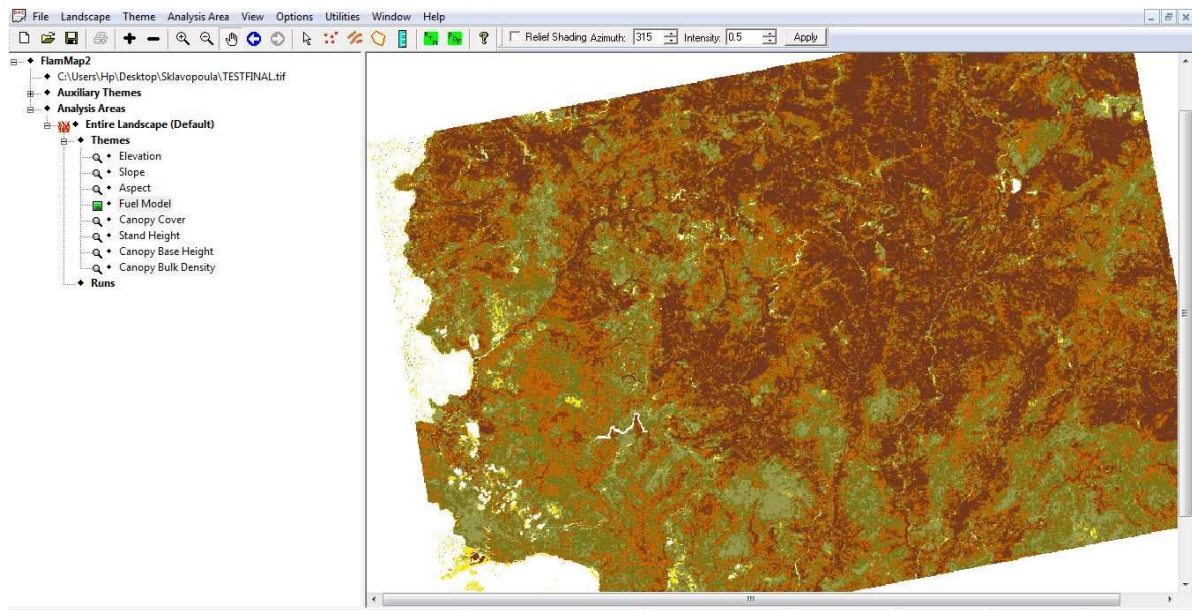
YearMonth	MeanTemp	MaxTemp	MinTemp	AbsHighTemp	AbsLowTemp	AbsRain	MaxDailyRain	MeanWindSpeed	AbsHighWindSpeed	Day	DomDir
2022-01	7,3	10,5	3,8	16,3	1	-2,0	24	306,6	50,8	12	13, NNE
2022-02	8,9	12,5	5,0	17,3	21	1,3	11	195,0	74,2	3	10, NNE
2022-03	7,4	11,3	3,7	20,1	31	-1,1	14	185,2	46,4	23	23, NNE

													0	
2022-04	14,8	20,7	8,8	27,2	5	3,6	12	8,4	5,6	19	4,9	56,3	17,0	NNE
2022-05	18,0	24,2	11,6	32,5	26	6,2	12	1,4	0,6	2	4,4	74,0	19,0	NNE
2022-06	23,3	27,8	18,1	36,1	23	14,9	12	0,4	0,4	11	7,1	57,9	4,0	NNE
2022-07	24,9	28,7	20,5	33,6	31	16,7	11	0,2	0,2	19	9,6	75,6	18,0	NNE
2022-08	24,0	28,6	19,5	33,2	20	15,7	16	67,0	32,8	22	5,5	56,3	5,0	NNE
2022-09	20,8	26,6	15,4	33,3	30	8,1	25	10,6	10,4	23	4,5	64,4	6,0	NNE
2022-10	16,8	21,4	12,8	34,7	1	6,6	23	96,4	59,6	15	6,7	61,2	17,0	NNE
2022-11	13,7	17,6	9,9	23,3	3	6,6	11	127,6	43,2	23	4,3	62,8	6,0	NNE
2022-12	11,6	16,1	8	21,5	17	3,7	23	110,4	35	14	3,1	59,5	20	NNE
2022	16,0	20,5	11,4	36,1	6	-2,0	1	1109,2	74,2	2	5,8	78,9	2	NNE

Παρατηρούμε ότι, σύμφωνα με τα κλιματικά δεδομένα του παραπάνω πίνακα 4.2, η περιοχή της Κανδάνου χαρακτηρίζεται ως μία περιοχή με γενικά μέτριες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του έτους, ικανοποιητικές βροχοπτώσεις αλλά και έντονους ανέμους.

### 4.3 Το πρόγραμμα FlamMap

Το πρόγραμμα FLAMMAP είναι ένα εξειδικευμένο λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση της συμπεριφοράς της φωτιάς σε δασικές περιοχές. Αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Δασών των Ηνωμένων Πολιτειών (US Forest Service) για να υποστηρίξει την επιστημονική έρευνα και τη διαχείριση της δασοπυρόσβεσης. Η πρώτη έκδοση του FLAMMAP κυκλοφόρησε στις αρχές της δεκαετίας του 2000 και έχει εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου μέσω συνεχών ενημερώσεων και βελτιώσεων.



*Εικόνα 4.3 Το περιβάλλον εργασίας του FLAMMAP*

Το FLAMMAP χρησιμοποιείται κυρίως από δασολόγους, πυροσβέστες, και ειδικούς στη διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Οι χρήστες του λογισμικού περιλαμβάνουν κυβερνητικές υπηρεσίες, ερευνητικά ιδρύματα, και ιδιωτικούς φορείς που ασχολούνται με τη διαχείριση και την πρόληψη των δασικών πυρκαγιών. Μέσω του FLAMMAP, οι επαγγελματίες μπορούν να δημιουργούν χάρτες καύσης, να αξιολογούν τις συνθήκες που επικρατούν και να προβλέπουν την εξέλιξη της φωτιάς, λαμβάνοντας υπόψη μια ποικιλία παραγόντων όπως οι μετεωρολογικές συνθήκες, η βλάστηση, η τοπογραφία και τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του FLAMMAP είναι η δυνατότητα του να εκτιμά τη συμπεριφορά της φωτιάς υπό διάφορες συνθήκες και να παρέχει αποτελέσματα σε μορφή χαρτών και γραφικών. Το λογισμικό χρησιμοποιεί δεδομένα από γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (GIS) και εφαρμόζει πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα για να προσομοιώσει τη διάδοση της φωτιάς. Οι χρήστες μπορούν να εισάγουν δεδομένα σχετικά με τη δομή της βλάστησης, τις κλιματικές συνθήκες και τη μορφολογία του εδάφους, προκειμένου να δημιουργήσουν ακριβείς και λεπτομερείς προβλέψεις.

Επιπλέον, το FLAMMAP διαθέτει εργαλεία για την αξιολόγηση της επικινδυνότητας της φωτιάς και τη σχεδίαση στρατηγικών καταστολής. Τα αποτελέσματα που παράγει μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση των σχεδίων δράσης και την καλύτερη κατανομή των πόρων κατά τη διάρκεια δασικών πυρκαγιών. Η ικανότητα του λογισμικού να παρέχει προσομοιώσεις σε πραγματικό χρόνο είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την



αντιμετώπιση έκτακτων καταστάσεων και την προστασία των ανθρώπων και των περιουσιών τους.

Η βιβλιογραφία που αναφέρεται στο FLAMMAP είναι εκτενής και περιλαμβάνει πολλές μελέτες που εξετάζουν την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια του λογισμικού. Οι ερευνητές έχουν αξιολογήσει το FLAMMAP σε διάφορα περιβάλλοντα και έχουν συγκρίνει τα αποτελέσματα του με πραγματικές πυρκαγιές για να διαπιστώσουν την αξιοπιστία του. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το FLAMMAP έχει αποδειχθεί ένα αξιόπιστο εργαλείο για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της φωτιάς και έχει συμβάλει σημαντικά στην επιστήμη της δασοπυρόσβεσης.

Για παράδειγμα, σε μια μελέτη του Finney (2004), εξετάζεται η εφαρμογή του FLAMMAP σε πραγματικά σενάρια δασικών πυρκαγιών και αναλύεται η ακρίβεια των προβλέψεων του σε σύγκριση με τις πραγματικές συνθήκες. Η μελέτη καταλήγει ότι το FLAMMAP παρέχει αξιόπιστες προβλέψεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική διαχείριση των δασικών πυρκαγιών. Επίσης, σε άλλη μελέτη των Stratton (2006), αξιολογείται η χρησιμότητα του FLAMMAP στη δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας και η συνεισφορά του στην κατανόηση των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν τη διάδοση της φωτιάς.

#### **4.3.1 Μοντέλα εξάπλωσης πυρκαγιάς**

Το FLAMMAP χρησιμοποιεί διάφορα μοντέλα για να προσομοιώσει τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών και να παρέχει ακριβείς προβλέψεις για την εξάπλωση και την ένταση της φωτιάς. Τα κύρια μοντέλα που χρησιμοποιεί το FLAMMAP περιλαμβάνουν τα μοντέλα διάδοσης επιφανειακής φωτιάς, τα μοντέλα εξάπλωσης κόμης, τα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας και τα μοντέλα κατακόρυφης εξάπλωσης.

Τα μοντέλα διάδοσης επιφανειακής φωτιάς στο FLAMMAP βασίζονται στο μοντέλο Rothermel, το οποίο αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1970 από τον Richard Rothermel για την Υπηρεσία Δασών των Ηνωμένων Πολιτειών. Αυτό το μοντέλο είναι θεμελιώδες για την πρόβλεψη της ταχύτητας εξάπλωσης της φωτιάς και της έντασης της καύσης στην επιφάνεια του εδάφους. Το μοντέλο Rothermel προβλέπει την ταχύτητα με την οποία η φωτιά θα κινηθεί κατά μήκος της επιφάνειας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η καύσιμη ύλη, η υγρασία, η κλίση του εδάφους και ο άνεμος. Επιπλέον, υπολογίζει την ποσότητα της θερμότητας που παράγεται ανά μονάδα επιφάνειας καθώς η φωτιά καίει την καύσιμη ύλη. Τέλος, κατηγοριοποιεί τη βλάβη σε διάφορους τύπους καύσιμης ύλης,

καθένας από τους οποίους έχει διαφορετικές ιδιότητες καύσης, που επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά της φωτιάς.

Τα μοντέλα εξάπλωσης κόμης στο FLAMMAP εξετάζουν τη μετάδοση της φωτιάς μέσω της κόμης των δέντρων. Αυτά τα μοντέλα είναι κρίσιμα για την κατανόηση της συμπεριφοράς των κορυφοπυρκαγιών, που μπορεί να είναι ιδιαίτερα καταστροφικές. Τα κύρια χαρακτηριστικά των μοντέλων εξάπλωσης κόμης περιλαμβάνουν την πρόβλεψη των συνθηκών υπό τις οποίες η φωτιά μπορεί να μεταδοθεί από την επιφάνεια του εδάφους στην κόμη των δέντρων. Λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα και το ύψος της καύσιμης ύλης, καθώς και τις μετεωρολογικές συνθήκες, τα μοντέλα αυτά υπολογίζουν την ταχύτητα και την κατεύθυνση εξάπλωσης της φωτιάς στην κόμη, καθώς και την ποσότητα της θερμότητας που παράγεται καθώς η φωτιά καίει τη βλάστηση στην κόμη των δέντρων.

Τα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας στο FLAMMAP χρησιμοποιούνται για να υπολογίσουν την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται από τη φωτιά στο περιβάλλον. Η μεταφορά θερμότητας είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η φωτιά επηρεάζει το περιβάλλον και προωθείται μέσω του δάσους. Αυτά τα μοντέλα εξετάζουν την ακτινοβολία, δηλαδή την ποσότητα της θερμότητας που μεταδίδεται μέσω της ακτινοβολίας από τη φωτιά στο περιβάλλον. Επίσης, υπολογίζουν την ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται μέσω αγωγής από τη φωτιά στο έδαφος και στη βλάστηση, καθώς και τη θερμότητα που μεταφέρεται μέσω της κίνησης του αέρα από τη φωτιά στο περιβάλλον.

Τα μοντέλα κατακόρυφης εξάπλωσης στο FLAMMAP αναλύουν τη μετάδοση της φωτιάς από την επιφάνεια του εδάφους προς τα πάνω στην κόμη των δέντρων. Αυτά τα μοντέλα είναι ζωτικής σημασίας για την πρόβλεψη της κατακόρυφης κίνησης της φωτιάς και τη μετάβαση από μια επιφανειακή φωτιά σε μια κορυφοπυρκαγιά. Τα μοντέλα αυτά εκτιμούν την ταχύτητα και τις συνθήκες υπό τις οποίες η φωτιά μπορεί να ανέβει από την επιφάνεια του εδάφους στην κόμη των δέντρων. Επιπλέον, αναλύουν την αλληλεπίδραση μεταξύ της καύσιμης ύλης στην επιφάνεια του εδάφους και της καύσιμης ύλης στην κόμη των δέντρων και πώς αυτή επηρεάζει τη μετάδοση της φωτιάς. Επίσης, λαμβάνουν υπόψη την επίδραση των μετεωρολογικών συνθηκών, όπως ο άνεμος και η υγρασία, στην κατακόρυφη εξάπλωση της φωτιάς.

Το FLAMMAP χρησιμοποιεί αυτά τα μοντέλα για να παρέχει μια ολοκληρωμένη ανάλυση της συμπεριφοράς της φωτιάς σε δασικές περιοχές. Καθένα από αυτά τα μοντέλα συνεισφέρει στην κατανόηση της δυναμικής της φωτιάς και βοηθά τους διαχειριστές δασών

και τους πυροσβέστες να λαμβάνουν ενημερωμένες αποφάσεις για την πρόληψη και την καταστολή των δασικών πυρκαγιών. Οι δυνατότητες του λογισμικού να ενσωματώνει δεδομένα από διάφορες πηγές και να προσομοιώνει τη φωτιά με βάση πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα το καθιστούν ένα ισχυρό εργαλείο στην επιστήμη της δασοπυρόσβεσης και της διαχείρισης των φυσικών πόρων.

Η ακρίβεια και η αποτελεσματικότητα του FLAMMAP ενισχύονται μέσω της χρήσης αυτών των μοντέλων, που επιτρέπουν μια λεπτομερή κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν τη φωτιά. Η ταχύτητα εξάπλωσης, η ένταση καύσης, η διάδοση στην κόμη, η μεταφορά θερμότητας και η κατακόρυφη εξάπλωση είναι όλοι κρίσιμοι παράγοντες που συνδυάζονται για να παράσχουν μια ολοκληρωμένη εικόνα της δυναμικής της φωτιάς. Με αυτό τον τρόπο, το FLAMMAP παρέχει στους χρήστες τα εργαλεία που χρειάζονται για να αναπτύξουν στρατηγικές διαχείρισης καύσιμης ύλης, να βελτιώσουν τις προγνώσεις για την εξάπλωση της φωτιάς και να λάβουν αποτελεσματικά μέτρα για την προστασία των δασικών περιοχών και των κοινοτήτων που τις περιβάλλουν.

#### **4.3.2 Το υπο-πρόγραμμα FARSITE**

Το FARSITE (Fire Area Simulator) είναι ένα προηγμένο λογισμικό προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών, το οποίο αναπτύχθηκε για να βοηθήσει στη μοντελοποίηση και την ανάλυση της διάδοσης της φωτιάς σε φυσικά περιβάλλοντα. Το πρόγραμμα αναπτύχθηκε από τον Mark Finney, ερευνητή του Υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών (USDA Forest Service) στο Missoula Fire Sciences Laboratory. Η ανάπτυξη του FARSITE ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1990 και το λογισμικό έχει έκτοτε εξελιχθεί με τη συνεχή προσθήκη νέων δυνατοτήτων και βελτιώσεων.

Το FARSITE περιλαμβάνει εργαλεία για την ανάλυση της επίδρασης της φωτιάς σε διάφορα περιβάλλοντα και τη δημιουργία σεναρίων πρόληψης και καταστολής. Οι χρήστες μπορούν να εισάγουν δεδομένα σχετικά με την κατάσταση της βλάστησης, τις αλλαγές στις καιρικές συνθήκες και τις ανθρώπινες παρεμβάσεις για να εξετάσουν πώς αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν τη διάδοση της φωτιάς. Αυτή η δυνατότητα είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση στρατηγικών πρόληψης και καταστολής.

Η βιβλιογραφία που αφορά το FARSITE είναι πλούσια και περιλαμβάνει πολλές επιστημονικές μελέτες που αξιολογούν την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα του λογισμικού. Οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει το FARSITE για να προσομοιώσουν πραγματικές δασικές πυρκαγιές και να συγκρίνουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τις πραγματικές συνθήκες. Οι μελέτες δείχνουν ότι το FARSITE είναι ένα αξιόπιστο

εργαλείο για την προσομοίωση της διάδοσης της φωτιάς και έχει σημαντική συμβολή στην κατανόηση και τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών.

Για παράδειγμα, σε μια μελέτη των Finney και Cohen (2003), εξετάζεται η χρήση του FARSITE για την προσομοίωση της διάδοσης της φωτιάς σε περιοχές με διαφορετική τοπογραφία και βλάστηση. Η μελέτη δείχνει ότι το FARSITE μπορεί να παρέχει ακριβείς προβλέψεις που βοηθούν στη λήψη αποφάσεων για την καταστολή των πυρκαγιών. Επίσης, σε άλλη μελέτη των Stratton (2006), αξιολογείται η χρήση του FARSITE στη δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας και η συμβολή του στην ανάλυση των παραγόντων που επηρεάζουν τη διάδοση της φωτιάς.

### **4.3.3 Παράμετροι του προγράμματος FLAMMAP**

Το λογισμικό FLAMMAP χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών και βασίζεται σε διάφορα στοιχεία για να προσδιορίσει τις συνθήκες που επηρεάζουν την εξάπλωση της φωτιάς. Τα κύρια στοιχεία που χρησιμοποιεί περιλαμβάνουν το Forest Canopy Cover, το Forest Canopy Height, το Forest Canopy Bulk Density και το Forest Canopy Base Height. Καθένα από αυτά τα στοιχεία διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ανάλυση και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της φωτιάς. Ας δούμε λεπτομερέστερα τι είναι το καθένα και πώς συμβάλλει στη λειτουργία του FLAMMAP.

#### **4.3.3.1 Forest Canopy Cover**

Το Forest Canopy Cover (Κάλυψη Σκέπης Δάσους) αναφέρεται στο ποσοστό της επιφάνειας του εδάφους που καλύπτεται από το φύλλωμα και τα κλαδιά των δέντρων όταν κοιτάζουμε από ψηλά. Πρόκειται για έναν δείκτη της πυκνότητας της βλάστησης και είναι σημαντικός για την εκτίμηση της σκίασης του εδάφους και της διαθεσιμότητας του φωτός. Στο πλαίσιο του FLAMMAP, το Forest Canopy Cover χρησιμοποιείται για να υπολογίσει πόσο η βλάστηση μπορεί να επηρεάσει τη θερμοκρασία του εδάφους, την υγρασία, και τη ροή του αέρα, που με τη σειρά τους επηρεάζουν την εξάπλωση και την ένταση της φωτιάς. Ένα υψηλό ποσοστό κάλυψης στεφάνου μπορεί να μειώσει την ταχύτητα του ανέμου στο έδαφος και να επηρεάσει τη μετάδοση της φωτιάς μέσω της κορυφής των δέντρων, ενώ ένα χαμηλό ποσοστό μπορεί να επιτρέψει πιο γρήγορη εξάπλωση της φωτιάς.

#### **4.3.3.2 Forest Canopy Height**

Το Forest Canopy Height (Ύψος Σκέπης Δάσους) αναφέρεται στο μέσο ύψος των δέντρων σε μια δασική περιοχή. Αυτό το στοιχείο είναι ζωτικής σημασίας για την κατανόηση της δομής του δάσους και της δυναμικής της φωτιάς. Στο FLAMMAP, το ύψος

του σκέπης χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η απόσταση που η φωτιά πρέπει να διανύσει για να εξαπλωθεί από το έδαφος στην κόμη των δέντρων. Το ύψος της σκέπης επηρεάζει επίσης τη διασπορά των σπινθήρων και των φλεγόμενων υπολειμμάτων, που μπορεί να προκαλέσουν νέες εστίες φωτιάς σε διαφορετικές περιοχές. Ένα ψηλό δάσος με υψηλό ύψος σκέπης μπορεί να λειτουργήσει ως φράγμα για τη φωτιά που εξαπλώνεται στο έδαφος, αλλά μπορεί επίσης να επιτρέψει τη γρήγορη μετάδοση της φωτιάς από δέντρο σε δέντρο στην κόμη.

#### 4.3.3.3 Forest Canopy Bulk Density

Το Forest Canopy Bulk Density (Πυκνότητα Σκέπης Δάσους) μετρά τη μάζα της καύσιμης ύλης ανά μονάδα όγκου στον χώρο της κόμης των δέντρων. Αυτό το στοιχείο είναι κρίσιμο για την κατανόηση της έντασης της φωτιάς και της ταχύτητας εξαπλώσής της μέσω της κόμης. Η πυκνότητα σκέπης καθορίζει την ποσότητα της καύσιμης ύλης που είναι διαθέσιμη για καύση και επηρεάζει την ποσότητα της θερμότητας που παράγεται. Στο FLAMMAP, η πυκνότητα αυτή χρησιμοποιείται για να εκτιμήσει πόσο εύκολα η φωτιά μπορεί να μεταδοθεί από το ένα δέντρο στο άλλο μέσω της κόμης και να υπολογίσει την ένταση της φωτιάς. Μια υψηλή ογκομετρική πυκνότητα υποδηλώνει ότι υπάρχει αρκετή καύσιμη ύλη για να υποστηρίξει μια έντονη και γρήγορα εξαπλούμενη φωτιά.

#### 4.3.3.4 Forest Canopy Base Height

Το Forest Canopy Base Height (Υψος Σκέπης Δάσους) αναφέρεται στο ύψος από το έδαφος μέχρι το χαμηλότερο επίπεδο του φυλλώματος των δέντρων. Αυτό το στοιχείο είναι σημαντικό για την κατανόηση της μεταφοράς της φωτιάς από το έδαφος στην κόμη των δέντρων. Στο FLAMMAP, το ύψος της βάσης σκέπης χρησιμοποιείται για να εκτιμηθεί πόσο εύκολα η φωτιά μπορεί να "ανέβει" από την καύσιμη ύλη στο έδαφος στην καύσιμη ύλη στην κόμη των δέντρων. Ένα χαμηλό ύψος βάσης σκέπης σημαίνει ότι η φωτιά μπορεί εύκολα να μεταφερθεί στην κόμη, οδηγώντας σε πυρκαγιές κόμης που είναι δύσκολο να κατασταλούν. Αντίθετα, ένα υψηλό ύψος βάσης σκέπης μπορεί να λειτουργήσει ως εμπόδιο για την άνοδο της φωτιάς από το έδαφος στην κόμη.

### 4.4 Μοντέλα βλάστησης

Τα μοντέλα βλάστησης που χρησιμοποιεί το FLAMMAP είναι εξειδικευμένα εργαλεία που περιγράφουν τις ιδιότητες της καύσιμης ύλης στο δάσος, όπως η πυκνότητα, η υγρασία, η διάταξη και η κατανομή της βλάστησης. Αυτά τα μοντέλα παίζουν ζωτικό ρόλο στην προσομοίωση της συμπεριφοράς της φωτιάς, επιτρέποντας στους διαχειριστές δασών

και τους πυροσβέστες να προβλέπουν την εξάπλωση και την ένταση των δασικών πυρκαγιών. Οι πληροφορίες αυτές βοηθούν στην ανάπτυξη στρατηγικών για την πρόληψη και την καταστολή των πυρκαγιών.

Τα μοντέλα βλάστησης που χρησιμοποιούνται στο FLAMMAP προέρχονται από διάφορες πηγές και έχουν αναπτυχθεί από ειδικούς στον τομέα της δασοπονίας και της διαχείρισης πυρκαγιών. Αυτά τα μοντέλα περιλαμβάνουν δεδομένα για τη φυσιογνωμία των φυτών, την πυκνότητα της βλάστησης, την περιεκτικότητα σε υγρασία και άλλες σημαντικές παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της φωτιάς. Οι πληροφορίες αυτές συλλέγονται μέσω επιτόπιων παρατηρήσεων, δορυφορικών εικόνων και άλλων τεχνικών τηλεπισκόπησης.

Ένα από τα πιο σημαντικά και ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα βλάστησης είναι το μοντέλο «40 Scott and Burgan Fire Behavior Fuel Models». Αυτό το σύνολο μοντέλων αναπτύχθηκε από τους Joe H. Scott και Robert E. Burgan και δημοσιεύτηκε το 2005. Το «40 Scott and Burgan Fire Behavior Fuel Models» αποτελεί μια εκτενή αναθεώρηση και επέκταση των παλαιότερων μοντέλων καύσιμης ύλης που είχαν αναπτυχθεί από την Υπηρεσία Δασών των Ηνωμένων Πολιτειών. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει 40 διαφορετικούς τύπους καύσιμης ύλης, καθένας από τους οποίους αντιπροσωπεύει συγκεκριμένες συνθήκες βλάστησης και καύσιμης ύλης που συναντώνται σε διάφορες δασικές περιοχές.

Τα «40 Scott and Burgan Fire Behavior Fuel Models» καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα τύπων καύσιμης ύλης, από χόρτα και χαμηλή βλάστηση μέχρι δάση και θαμνώδη περιοχές. Κάθε τύπος καύσιμης ύλης περιγράφεται λεπτομερώς με βάση την πυκνότητα της βλάστησης, την περιεκτικότητα σε υγρασία, το ύψος της βλάστησης και άλλες παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της φωτιάς. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο μπορεί να περιγράψει την καύσιμη ύλη σε μια περιοχή με πυκνή βλάστηση και υψηλή υγρασία, ενώ ένα άλλο μοντέλο μπορεί να περιγράψει την καύσιμη ύλη σε μια ξηρή, αραιοφυτεμένη περιοχή.

Η κύρια πηγή για τα «40 Scott and Burgan Fire Behavior Fuel Models» είναι η δημοσίευση "Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model" από τους Scott και Burgan. Αυτή η δημοσίευση παρέχει αναλυτικές πληροφορίες για κάθε τύπο καύσιμης ύλης και είναι διαθέσιμη μέσω της Υπηρεσίας Δασών των Ηνωμένων Πολιτειών και άλλων οργανισμών που ασχολούνται με την έρευνα και τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών. Οι πληροφορίες αυτές είναι

επίσης διαθέσιμες σε διάφορες βάσεις δεδομένων και διαδικτυακές πλατφόρμες που παρέχουν εργαλεία για τη διαχείριση της καύσιμης ύλης και την προσομοίωση της συμπεριφοράς της φωτιάς.

Τα μοντέλα βλάστησης, και ειδικά το μοντέλο «40 Scott and Burgan Fire Behavior Fuel Models», είναι εξαιρετικά χρήσιμα για την προσομοίωση και την κατανόηση της συμπεριφοράς της φωτιάς σε διαφορετικές συνθήκες βλάστησης. Χρησιμοποιούνται ευρέως από διαχειριστές δασών, πυροσβέστες και ερευνητές για να βελτιώσουν τις στρατηγικές πρόληψης και καταστολής των πυρκαγιών. Μέσω της χρήσης αυτών των μοντέλων, είναι δυνατή η εκτίμηση της ταχύτητας εξάπλωσης της φωτιάς, της έντασης της καύσης και της δυναμικής της φωτιάς σε διαφορετικούς τύπους βλάστησης.

Η αξία των μοντέλων βλάστησης είναι εμφανής στην ικανότητά τους να παρέχουν ακριβείς προβλέψεις για τη συμπεριφορά της φωτιάς, επιτρέποντας στους διαχειριστές δασών να λαμβάνουν ενημερωμένες αποφάσεις. Αυτά τα μοντέλα συμβάλλουν στην κατανόηση του πώς η καύσιμη ύλη, η υγρασία και άλλες παράμετροι επηρεάζουν την εξάπλωση της φωτιάς, και παρέχουν τα απαραίτητα δεδομένα για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης της καύσιμης ύλης και της πρόληψης των πυρκαγιών.

Επιπλέον, τα μοντέλα βλάστησης όπως το μοντέλο που επιλέχθηκε, μπορούν να προσαρμοστούν και να ενημερωθούν με βάση νέα δεδομένα και εξελίξεις στην επιστήμη της διαχείρισης των δασικών πόρων. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να ανταποκρίνονται στις αλλαγές που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή, τις αλλαγές στη χρήση της γης και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν τα οικοσυστήματα των δασών.

#### **4.5 Δεδομένα για τις προσομοιώσεις**

Για την επιλογή των δεδομένων βλάστησης για τις προσομοιώσεις μας, επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε την πλατφόρμα Copernicus, η οποία αποτελεί μια από τις πιο προηγμένες και αξιόπιστες πηγές γεωχωρικών δεδομένων παγκοσμίως. Το Copernicus είναι ένα πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης που στοχεύει στην ανάπτυξη ενός ενιαίου ευρωπαϊκού συστήματος παρακολούθησης της Γης, το οποίο παρέχει δεδομένα για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και της ασφάλειας. Το πρόγραμμα αυτό χρησιμοποιεί μια σειρά από δορυφόρους, γνωστούς ως δορυφόρους Sentinel, οι οποίοι συλλέγουν δεδομένα υψηλής ανάλυσης για την επιφάνεια της Γης, την ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς και την κρυόσφαιρα.

Τα δεδομένα που εξάγονται από το Copernicus χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες εφαρμογές, όπως η χαρτογράφηση των χρήσεων γης, η παρακολούθηση της βλάστησης, η ανάλυση των αλλαγών στη χρήση της γης, καθώς και η πρόβλεψη και διαχείριση φυσικών καταστροφών, συμπεριλαμβανομένων των δασικών πυρκαγιών. Η επιλογή αυτής της πλατφόρμας για την εξαγωγή των δεδομένων βλάστησης για τις προσομοιώσεις μας βασίζεται στην υψηλή ακρίβεια και την αξιοπιστία των δεδομένων που παρέχει, καθώς και στην ευκολία πρόσβασης και χρήσης τους.

Ένα από τα πιο σημαντικά δεδομένα που εξάγουμε από το Copernicus για την παρακολούθηση της βλάστησης είναι ο Δείκτης Κανονικοποιημένης Διαφοράς Βλάστησης (NDVI). Ο NDVI είναι ένας δείκτης που χρησιμοποιείται ευρέως για την αξιολόγηση της υγείας και της πυκνότητας της βλάστησης. Υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη διαφορά μεταξύ της αντανάκλασης του κοντινού υπέρυθρου φάσματος και του κόκκινου φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, διαιρεμένη με το άθροισμά τους. Ο τύπος για τον υπολογισμό του NDVI είναι:  $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$ , όπου NIR είναι η αντανάκλαση στο κοντινό υπέρυθρο φάσμα και Red είναι η αντανάκλαση στο κόκκινο φάσμα.

Ο NDVI παρέχει μια ποσοτική μέτρηση της βλάστησης, με τιμές που κυμαίνονται από -1 έως 1. Τιμές κοντά στο 1 υποδηλώνουν υψηλή πυκνότητα βλάστησης, ενώ τιμές κοντά στο 0 ή αρνητικές τιμές υποδηλώνουν έλλειψη βλάστησης ή παρουσία άλλων επιφανειών, όπως νερό, βράχια ή γυμνό έδαφος. Η εξαγωγή του NDVI από τα δεδομένα του Copernicus μας επιτρέπει να δημιουργήσουμε ακριβείς χάρτες βλάστησης, που είναι ζωτικής σημασίας για τις προσομοιώσεις δασικών πυρκαγιών.

Αφού εξάγουμε τα δεδομένα NDVI, χρησιμοποιούμε αυτά τα δεδομένα για να δημιουργήσουμε τους χάρτες βλάστησης που απαιτεί το FLAMMAP για τις προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα, δημιουργούμε τους ακόλουθους χάρτες: Forest Canopy Cover (CC), Forest Canopy Height (CH), Forest Canopy Bulk Density (CBD), Forest Canopy Base Height (CBH) και καύσιμης ύλης (FUEL).

Τέλος, για τα μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία είναι ίσως και από τις σημαντικότερες παραμέτρους για την εξάπλωση της πυρκαγιάς γενικότερα αλλά και ειδικά για το πρόγραμμα και την εξέλιξη των αλγορίθμων, χρησιμοποιήσαμε τα πραγματικά καταγεγραμμένα δεδομένα από τοπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς.



## **5. Μελέτη περιπτώσεων**

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να μελετήσουμε, μέσω υπολογιστικών εργαλείων αλλά και πραγματικών δεδομένων, συγκεκριμένες περιπτώσεις πυρκαγιών οι οποίες και απασχόλησαν το Πυροσβεστικό Σώμα τα τελευταία έτη και να μελετήσουμε την επίδραση των διαφόρων παραγόντων στην εξέλιξη αυτών αλλά βεβαίως και την ακρίβεια των υπολογιστικών εργαλείων στην μοντελοποίηση μιας πυρκαγιάς και ιδιαίτερα την συνεισφορά της θερμοκρασίας και υγρασίας στην εξάπλωση αυτών.

Τα υπολογιστικά εργαλεία αποτελούν αναπόσπαστο μέρος πολλών κλάδων τις τελευταίες δεκαετίες. Χαρακτηριστικότερο ίσως παράδειγμα αποτελεί η πρόβλεψη του καιρού, η οποία γίνεται μέσω της χρήσης ηλεκτρονικών υπολογιστών και μαθηματικών μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί. Τα υπολογιστικά αυτά μοντέλα λαμβάνουν κάποιες τιμές – αρχικές παραμέτρους, οι οποίες έχουν μετρηθεί με άλλα συστήματα, όπως λχ. ένα μετεωρολογικό μπαλόνι ή ένα ραντάρ και είναι σε θέση να παράσχουν διάφορες προβλέψεις σχετικά με την εξέλιξη του καιρού.

Η χρήση υπολογιστικών μοντέλων για την μοντελοποίηση και πρόβλεψη της συμπεριφοράς μίας πυρκαγιάς, είτε αστικής είτε δασικής, δεν αποτελεί κάτι το νέο. Ειδικότερα, η μοντελοποίηση αστικών πυρκαγιών βρίσκεται υπό ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια σχεδόν παράλληλα με την ανάπτυξη των διαφόρων μοντέλων υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Όμως, τα μοντέλα αυτά δεν χρησιμοποιούνται ευρέως στην πράξη, ιδίως κατά την διάρκεια συμβάντων. Συνήθως, χρησιμοποιούνται ως εκ των υστέρων εργαλεία για την διενέργεια μελετών πραγματογνωμοσύνης.

### **5.1 Οι πυρκαγιές που επιλέχθηκαν.**

Στα πλαίσια της παρούσης επιλέχθηκε να μελετηθεί η επίδραση της θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας στην ταχύτητα εξάπλωσης μίας έρπουσας δασικής πυρκαγιάς σε ορεινό τοπίο. Ως εκ τούτου, θα μελετήσουμε δύο (2) δασικές πυρκαγιές στο Νομό Χανίων Κρήτης και συγκεκριμένα πρόκειται για πυρκαγιές στον τομέα ευθύνης του Π.Κ. Κάνδανου, για τις οποίες και υπάρχουν καταγεγραμμένα δεδομένα τόσο για την έκταση που κάηκε όσο και για τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούσαν κατά την διάρκεια της πυρκαγιάς.

### **5.2 Πιθανοί παράγοντες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα**

Το φαινόμενο της πυρκαγιάς είναι σύνθετο και πολυπαραγοντικό. Αυτό εξάλλου διαφαίνεται και από την πολυπλοκότητα και την πληθώρα παραμέτρων των υπολογιστικών

προγραμμάτων που υιοθετήθηκαν. Κάθε παράγοντας επιφέρει τη δική του επίδραση αλλά και το σύνολο των παραγόντων αλληλοεπιδρούν μοναδικά σε κάθε σενάριο.

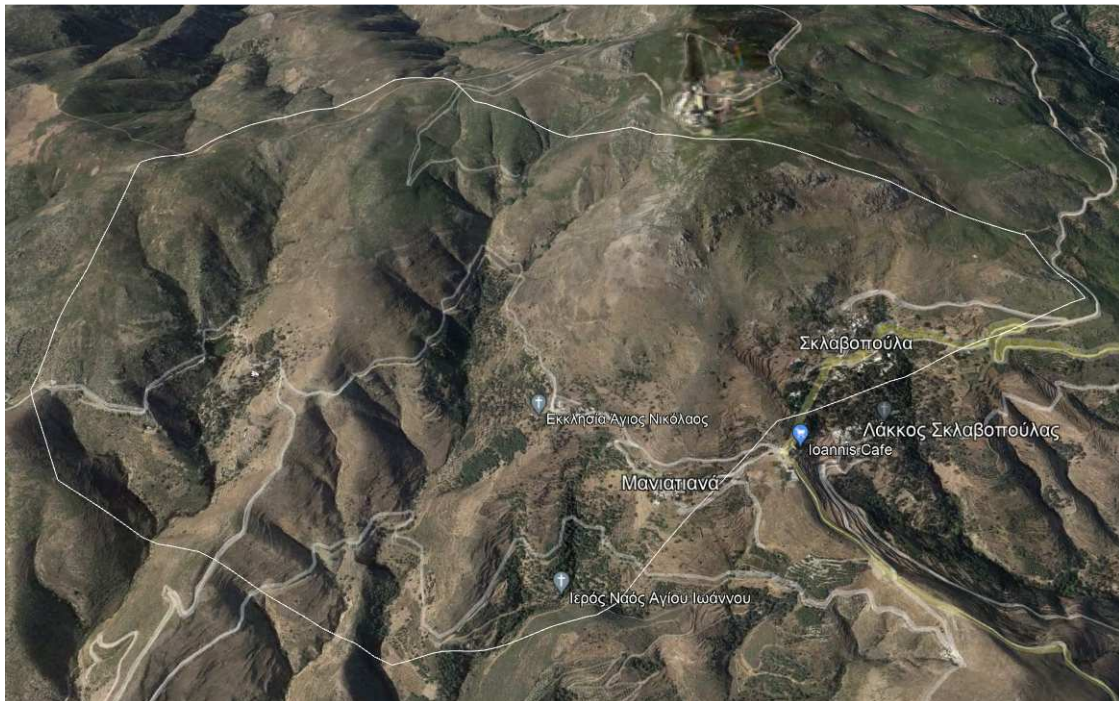
Ο πρώτος παράγοντας που επιδρά σημαντικά είναι το ανάγλυφο της περιοχής. Οι δύο περιοχές που επιλέξαμε παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς το ανάγλυφο μεταξύ τους και μας βοηθούν να κατανοήσουμε τις δυνατότητες του προγράμματος στην μοντελοποίηση και υπολογισμό της επίδρασης αυτού.

Επίσης, η βλάστηση είναι διαφορετική στις δύο ανωτέρω περιπτώσεις. Η πρώτη πυρκαγιά στην θέση Σκλαβοπούλα χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλή, θαμνώδη βλάστηση με ελάχιστα δένδρα, σε αντίθεση με την δεύτερη πυρκαγιά στην θέση Κακοδίκι όπου η βλάστηση είναι θαμνώδες και δενδρώδες με αρκετά ελαιόδεντρα. Αν και οι πυρκαγιές έχουν εξελιχθεί σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, και οι δύο έχουν λάβει χώρα τους θερινούς μήνες και συνεπώς η βλάστηση βρίσκεται στην ίδια περίπου κατάσταση, όπως και οι αντίστοιχες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Σαφώς παράγοντας ο οποίος επιδρά καθοριστικά είναι και η κατεύθυνση του ανέμου, καθώς το ανάγλυφο είναι σύνθετο. Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η κατεύθυνση του ανέμου είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν υπάρχουν πλαγιές ή άλλα ιδιαίτερα τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Δυστυχώς στην περίπτωσή μας, οι δύο πυρκαγιές διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς την διεύθυνση του ανέμου σχετικά με το τοπογραφικό ανάγλυφο.

### 5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

#### 5.3.1 Πυρκαγιά στην θέση «Σκλαβοπούλα»



Εικόνα 5.1 Εικόνα της περιοχής από το GoogleMaps (μετά την πυρκαγιά)



Εικόνα 5.2 Η πυρκαγιά από τον δορυφόρο Sentinel-2

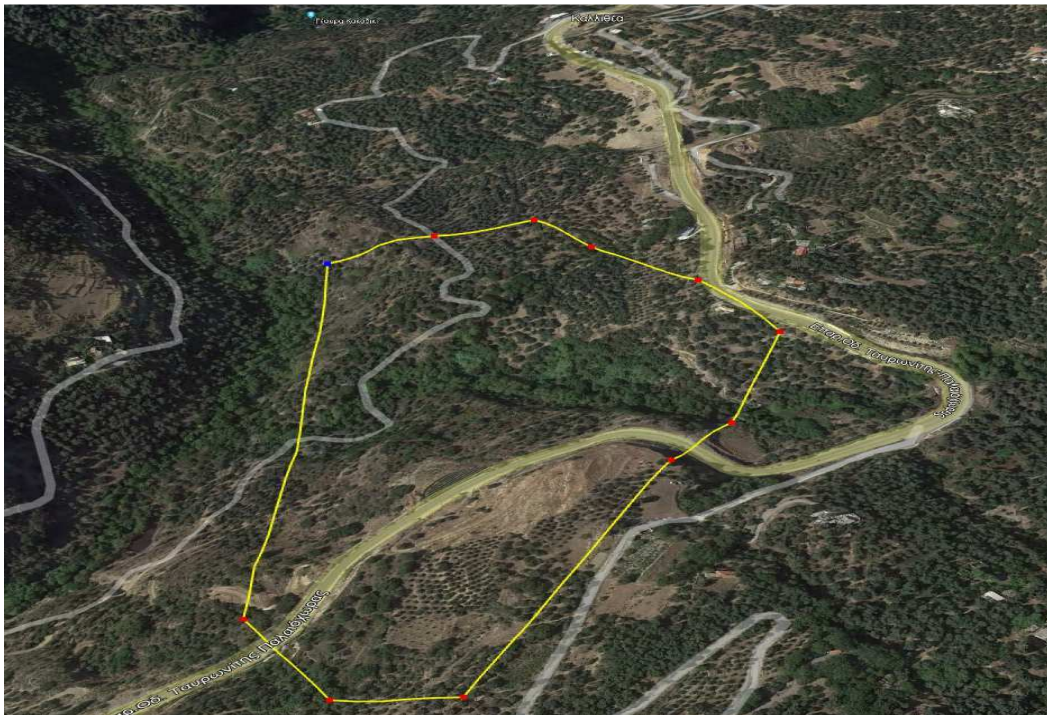
Η πυρκαγιά στη θέση Σκλαβοπούλα (εικόνες 5.1 και 5.2) έλαβε χώρα στις 13-08-2020. Ο άνεμος που έπνεε ήταν της τάξεως των 5 – 6 Beaufort και είχε ΒΑ κατεύθυνση. Η



συνολική καμένη επιφάνεια ανέρχεται σε 3.50 km<sup>2</sup> ενώ η μέγιστη απόσταση που διένυσε η πυρκαγιά από την αρχική της εστία είναι 2.50 km. Ο συνολικός χρόνος της πυρκαγιάς είναι περίπου 16 ώρες.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πυρκαγιά αυτή εξελίχθηκε σε ιδιαίτερα δύσβατο έδαφος και εξαιτίας της κατεύθυνσης του ανέμου κινήθηκε σε δύο ρέματα.

### 5.3.2 Πυρκαγιά στην θέση «Κακοδίκι»



Εικόνα 5.3 Εικόνα της περιοχής από το GoogleMaps



*Εικόνα 5.4Η πυρκαγιά από τον δορυφόρο Sentinel-2*

Η πυρκαγιά στη θέση Κακοδικί (εικόνες 5.3 και 5.4) έλαβε χώρα στις 04-07-2021. Ο άνεμος που έπνεε ήταν της τάξεως των 2 – 3 Beaufort και είχε ΝΝΔ κατεύθυνση. Η συνολική καμένη επιφάνεια ανέρχεται σε  $0.28\text{km}^2$  ενώ η μέγιστη απόσταση που διένυσε η πυρκαγιά από την αρχική της εστία είναι 0.74km. Ο συνολικός χρόνος της πυρκαγιάς είναι περίπου 3 ώρες και 30 λεπτά.

Εξαιτίας των ανέμων που έπνεαν, η πυρκαγιά κινήθηκε ανοδικά σε πλαγιά με κλίση περίπου 20 μοιρών (40%).

### **5.3.3 Επιλογή μετεωρολογικών δεδομένων**

Για την προσομοίωση των πυρκαγιών στην παρούσα εργασία, βασικό στοιχείο αποτελούν τα μετεωρολογικά δεδομένα, καθώς επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά της φωτιάς. Η καταγραφή αυτών των δεδομένων έγινε κυρίως από μετεωρολογικούς σταθμούς που βρίσκονται σε σχετικά κοντινές αποστάσεις από τις περιοχές των πυρκαγιών. Η επιλογή των σταθμών βασίστηκε στην εγγύτητά τους στα σημεία ενδιαφέροντος, αλλά και στην αξιοπιστία των δεδομένων τους. Καθώς η ακριβής καταγραφή παραμέτρων όπως η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου είναι κρίσιμη για την προσομοίωση, έπρεπε να ληφθούν υπόψη οι μικροκλιματικές διαφορές μεταξύ του σημείου μέτρησης και του πραγματικού σημείου εκδήλωσης της φωτιάς.

Για την προσομοίωση της πυρκαγιάς στη θέση Σκλαβοπούλα, χρησιμοποιήθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα από σταθμό που βρισκόταν σε απόσταση περίπου 12 χιλιομέτρων

από το σημείο της φωτιάς. Η απόσταση αυτή δημιουργεί μια λογική απόκλιση στα δεδομένα του ανέμου, λόγω των τοπικών γεωγραφικών και κλιματικών συνθηκών, όπως η μορφολογία του εδάφους, τα υψομετρικά χαρακτηριστικά, και η βλάστηση που μπορούν να διαφοροποιήσουν τη συμπεριφορά του ανέμου. Για παράδειγμα, οι λόφοι ή οι χαράδρες στην περιοχή ενδέχεται να επιβραδύνουν ή να επιταχύνουν τον άνεμο ή να επηρεάσουν την κατεύθυνσή του. Στην περίπτωση αυτή, έχοντας παρατηρήσει τα φαινόμενα από κοντά, ήταν εφικτό να τροποποιηθούν τα δεδομένα για να ανταποκρίνονται καλύτερα στην πραγματική κατάσταση. Η τροποποίηση αφορούσε κυρίως την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου, ώστε να προσομοιωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η εξέλιξη της πυρκαγιάς.

Η λογική απόκλιση που παρατηρήθηκε στα δεδομένα ανέμου από τον σταθμό, εξαιτίας της απόστασης των 12 χλμ, οφείλεται στο γεγονός ότι οι συνθήκες εντός του μικροκλίματος της πυρκαγιάς διαφέρουν σημαντικά από τις γενικές μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής. Αυτή η απόκλιση είναι αναμενόμενη, καθώς τα τοπικά φαινόμενα ανέμου μπορούν να διαφέρουν ακόμη και σε μικρές αποστάσεις. Η προσαρμογή αυτή έγινε βάσει πραγματικών δεδομένων που συλλέχθηκαν επί τόπου, γεγονός που προσδίδει μεγαλύτερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Αντίθετα, για την πυρκαγιά στη θέση Κακοδίκι, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα ανέμου απευθείας από τον πλησιέστερο μετεωρολογικό σταθμό, χωρίς να τροποποιηθούν. Παρόλο που ο σταθμός βρίσκεται σχετικά κοντά στην περιοχή της πυρκαγιάς, δεν υπήρχαν διαθέσιμες πραγματικές μετρήσεις από το ακριβές σημείο, γεγονός που καθιστά απαραίτητο να διατηρηθούν τα δεδομένα του σταθμού ως έχουν. Η απόφαση να μην τροποποιηθούν τα δεδομένα βασίστηκε στο γεγονός ότι, παρά την απόσταση, οι συνθήκες στην περιοχή δεν παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις από αυτές που καταγράφει ο σταθμός.

Επιπλέον, η γεωμορφολογία της περιοχής Κακοδίκι είναι λιγότερο έντονη σε σχέση με αυτή της Σκλαβοπούλας. Το ανάγλυφο είναι πιο ήπιο, με μικρότερες διαφοροποιήσεις σε ύψος και μορφολογία, κάτι που μειώνει την πιθανότητα μεγάλων διαφορών στα τοπικά φαινόμενα ανέμου. Κατά συνέπεια, οποιαδήποτε απόκλιση στα δεδομένα που καταγράφονται από τον σταθμό αναμένεται να είναι μικρότερη και εντός αποδεκτών ορίων για τη συγκεκριμένη προσομοίωση. Έτσι, τα δεδομένα του σταθμού αξιοποιήθηκαν χωρίς προσαρμογές, επιτρέποντας μια ρεαλιστική απεικόνιση των συνθηκών ανέμου κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς.

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης πυρκαγιών, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία αποτελούν δύο κρίσιμες παραμέτρους που επηρεάζουν την ένταση και την εξάπλωση της

φωτιάς. Στα σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη, τα οποία βασίζονται στις προβλέψεις του IPCC AR6-WGI, τροποποιήσαμε τη θερμοκρασία με βάση τα διαφορετικά κλιματικά σενάρια. Η αύξηση της θερμοκρασίας σε κάθε σενάριο αντικατοπτρίζει τις αλλαγές που αναμένεται να σημειωθούν μελλοντικά, καθώς τα ακραία καιρικά φαινόμενα γίνονται πιο συχνά και πιο έντονα.

Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι τα σενάρια αυτά παρέχουν σαφείς προβλέψεις για τις μεταβολές στη θερμοκρασία, δεν περιλαμβάνουν συγκεκριμένες πληροφορίες για τις αντίστοιχες μεταβολές στη σχετική υγρασία. Η σχετική υγρασία παίζει καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά της φωτιάς, καθώς επηρεάζει την ευφλεκτότητα της βλάστησης και την ταχύτητα με την οποία εξαπλώνεται η πυρκαγιά. Σε συνθήκες υψηλότερης θερμοκρασίας, η σχετική υγρασία τείνει να μειώνεται, αυξάνοντας τον κίνδυνο ταχύτερης ανάφλεξης και εξάπλωσης της φωτιάς.

Για να αντιμετωπίσουμε αυτήν την αβεβαιότητα και να προσομοιώσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τα μελλοντικά κλιματικά σενάρια, βασιστήκαμε σε σχετική βιβλιογραφία και ερευνητικά δεδομένα που υποδεικνύουν ότι μια αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1 βαθμό Κελσίου οδηγεί σε μείωση της σχετικής υγρασίας κατά περίπου 2%. Αυτή η υπόθεση θεωρείται αρκετά ρεαλιστική, δεδομένου ότι η σχέση μεταξύ θερμοκρασίας και υγρασίας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ικανότητα του ατμοσφαιρικού αέρα να συγκρατεί υγρασία σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο λιγότερη υγρασία μπορεί να συγκρατήσει ο αέρας, γεγονός που οδηγεί σε μείωση της σχετικής υγρασίας.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση των μελλοντικών κλιματικών συνθηκών, καθώς λαμβάνει υπόψη τη σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ θερμοκρασίας και υγρασίας. Οι αλλαγές αυτές συμβάλλουν στην κατανόηση της συμπεριφοράς των πυρκαγιών σε συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας και μειωμένης υγρασίας, ενισχύοντας την ακρίβεια των προβλέψεων μας για τα μελλοντικά σενάρια.

Στους πίνακες που ακολουθούν αποτυπώνονται τα μετεωρολογικά δεδομένα βάσης που χρησιμοποιήσαμε καθώς και τα δεδομένα για την αρχική προσομοίωση που αποτέλεσε το σενάριο βάσης για την σύγκριση με την πραγματική πυρκαγιά. Για τα διάφορα σενάρια, η θερμοκρασία και η υγρασία του πίνακα τροποποιήθηκαν κατάλληλα σύμφωνα με τα όσα αναφέραμε παραπάνω.

*Πίνακας 5.1. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Παλαιοχώρας για την πυρκαγιά στη θέση Σκλαβοπούλα*

Date	Time	Temp	RH	Precipitation	Rain	Wind speed	Wind dir
13/8/2020	11:00	33.2	33.0	1009.0	0.0	17.7	NNE
13/8/2020	12:00	34.1	32.0	1009.6	0.0	19.3	NNE
13/8/2020	13:00	34.2	33.0	1009.6	0.0	17.7	NE
13/8/2020	14:00	33.9	34.0	1009.5	0.0	16.1	NE
13/8/2020	15:00	33.8	34.0	1009.2	0.0	17.7	NE
13/8/2020	16:00	33.6	35.0	1009.1	0.0	14.5	E
13/8/2020	17:00	32.9	35.0	1009.2	0.0	12.9	NE
13/8/2020	18:00	32.6	35.0	1009.2	0.0	11.3	NE
13/8/2020	19:00	31.5	36.0	1009.1	0.0	8.0	NE
13/8/2020	20:00	30.7	36.0	1009.6	0.0	9.7	N
13/8/2020	21:00	30.0	37.0	1010.0	0.0	6.4	NW
13/8/2020	22:00	29.6	38.0	1010.4	0.0	4.8	NW
13/8/2020	23:00	29.1	40.0	1010.4	0.0	6.4	NW
14/8/2020	0:00	29.2	39.0	1010.2	0.0	3.2	NNW
14/8/2020	1:00	29.6	36.0	1009.7	0.0	4.8	NNW
14/8/2020	2:00	29.7	36.0	1009.1	0.0	6.4	WNW
14/8/2020	3:00	29.4	37.0	1008.8	0.0	3.2	WSW
14/8/2020	4:00	28.9	37.0	1008.2	0.0	3.2	NE
14/8/2020	5:00	28.4	41.0	1008.6	0.0	6.4	E
14/8/2020	6:00	27.8	45.0	1008.7	0.0	9.7	E
14/8/2020	7:00	27.7	48.0	1008.8	0.0	11.3	NE
14/8/2020	8:00	28.6	47.0	1009.0	0.0	12.9	NE

*Πίνακας 5.2. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Κανδάνου για την πυρκαγιά στη θέση Κακοδίκι*

Date	Time	Temp	RH	Precipitation	Rain	Wind speed	Hi_speed	Wind dir
1/7/2021	12:00	35.4	26.0	1011.3	0.0	8.0	14.5	N
1/7/2021	13:00	36.3	22.0	1011.6	0.0	8.0	16.1	NNE
1/7/2021	14:00	37.5	18.0	1011.1	0.0	8.0	19.3	NNE
1/7/2021	15:00	38.6	16.0	1010.5	0.0	11.3	24.1	N
1/7/2021	16:00	38.8	15.0	1010.4	0.0	9.7	22.5	NNE
1/7/2021	17:00	38.4	16.0	1010.3	0.0	6.4	14.5	WNW
1/7/2021	18:00	37.4	16.0	1010.3	0.0	8.0	17.7	W
1/7/2021	19:00	35.6	17.0	1010.1	0.0	6.4	17.7	NW
1/7/2021	20:00	34.2	19.0	1010.3	0.0	4.8	11.3	NNE
1/7/2021	21:00	33.1	20.0	1010.2	0.0	3.2	9.7	NNE



*Πίνακας 5.3. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Παλαιοχώρας για την πυρκαγιά στη θέση Σκλαβοπούλα (μετά την τροποποίηση), όπως χρησιμοποιήθηκαν στο βασικό σενάριο*

Date	Time	Temp	RH	Precipitation	Wind speed	Wind dir	Cloud cover
13/8/2020	12:00	34	32	0.0	50	35	0
13/8/2020	13:00	34	33	0.0	50	35	0
13/8/2020	14:00	34	34	0.0	50	35	0
13/8/2020	15:00	34	34	0.0	50	35	0
13/8/2020	16:00	34	35	0.0	45	35	0
13/8/2020	17:00	33	35	0.0	45	35	0
13/8/2020	18:00	33	35	0.0	45	35	0
13/8/2020	19:00	32	36	0.0	45	35	0
13/8/2020	20:00	30	36	0.0	40	35	0
13/8/2020	21:00	30	37	0.0	40	35	0
13/8/2020	22:00	30	38	0.0	40	35	0
13/8/2020	23:00	29	40	0.0	40	35	0
13/8/2020	0:00	29	39	0.0	40	35	0
14/8/2020	1:00	29	36	0.0	40	35	0
14/8/2020	2:00	30	36	0.0	35	35	0
14/8/2020	3:00	29	37	0.0	30	35	0
14/8/2020	4:00	29	37	0.0	25	35	0
14/8/2020	5:00	28	41	0.0	25	35	0
14/8/2020	6:00	28	45	0.0	20	35	0
14/8/2020	7:00	27	50	0.0	15	35	0
14/8/2020	8:00	34	32	0.0	50	35	0
14/8/2020	9:00	34	33	0.0	50	35	0

*Πίνακας 5.4. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Κανδάνου για την πυρκαγιά στη θέση Κακοδίκι, όπως χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση*

Date	Time	Temp	RH	Precipit.	Wind speed	Wind dir	Cloud cover
1/7/2021	15:00	38	16	0.00	24	330	0
1/7/2021	16:00	38	15	0.00	22	330	0
1/7/2021	17:00	38	16	0.00	14	330	0
1/7/2021	18:00	37	16	0.00	17	320	0

### 5.3.4 Δεδομένα καύσιμης ύλης

Για την προσομοίωση της πυρκαγιάς και την ανάλυση της συμπεριφοράς της, η επιλογή κατάλληλων μοντέλων καύσιμης ύλης είναι κρίσιμη, καθώς αυτά καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο με τον οποίο θα εξαπλωθεί η φωτιά. Στην παρούσα εργασία,

επιλέχθηκε το Scott and Burgan Fire Behavior Fuel Model (FBFM40) μέσω του προγράμματος FLAMMAP, ένα αξιόπιστο εργαλείο για τη μοντελοποίηση της καύσιμης ύλης και της συμπεριφοράς της φωτιάς. Η επιλογή του FBFM40 βασίστηκε στην ευελιξία και την ακρίβεια που προσφέρει, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με δεδομένα από σύγχρονες πηγές, όπως το πρόγραμμα COPERNICUS, αλλά και από τη φυσική αυτοψία που πραγματοποιήθηκε στις περιοχές ενδιαφέροντος.

Με βάση τις πληροφορίες που συλλέχθηκαν για την κατανομή της καύσιμης ύλης στις περιοχές των πυρκαγιών, επιλέχθηκαν τα μοντέλα καύσιμης ύλης 104, 121, 122, 141, 142 και 145. Για τις δύο περιοχές που μελετήθηκαν, η επιλογή των μοντέλων καύσιμης ύλης ήταν κοινή, αλλά με προσαρμογές στην κατανομή και την πυκνότητα της καύσιμης ύλης, σύμφωνα με τα δεδομένα που προέκυψαν από το πεδίο.

Το μοντέλο 104(ShortGrass and Tall Grass Mix) αφορά την καύσιμη ύλη που περιλαμβάνει κυρίως μείγματα κοντών και ψηλών χόρτων. Αυτό το μοντέλο επιλέχθηκε για περιοχές με ανοιχτές εκτάσεις, όπου τα χόρτα κυριαρχούν ως καύσιμη ύλη. Η παρουσία τόσο κοντών όσο και ψηλών χόρτων μπορεί να δημιουργήσει ένα περιβάλλον στο οποίο η φωτιά εξαπλώνεται γρήγορα, κυρίως λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε υγρασία της καύσιμης ύλης. Η δομή της βλάστησης επιτρέπει τη γρήγορη καύση, ενώ η διάταξη της ύλης σε σχέση με την επιφάνεια ενισχύει τη μεταφορά της φωτιάς.

Το μοντέλο 121(Light Brush) περιγράφει κυρίως την καύσιμη ύλη ελαφριάς βούρτσας και χαμηλών θάμνων, συχνά σε συνδυασμό με μικρές ποσότητες χόρτου. Αυτές οι περιοχές εμφανίζουν χαμηλή αλλά συνεχή καύσιμη ύλη, με τη φωτιά να εξαπλώνεται μέσω της βλάστησης χαμηλού ύψους. Οι θάμνοι και η ελαφριά βούρτσα αποτελούν σημαντικό στοιχείο της καύσιμης ύλης, με την ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς να επηρεάζεται άμεσα από την πυκνότητα και την κατανομή τους στην περιοχή.

Το μοντέλο 122(Heavy Brush) αναφέρεται σε περιοχές με πυκνή βούρτσα και θάμνους. Η καύσιμη ύλη αυτής της κατηγορίας είναι πιο πυκνή και συσσωρευμένη σε σχέση με το μοντέλο 121, γεγονός που αυξάνει την ένταση και τη διάρκεια της καύσης. Η παρουσία μεγαλύτερων ποσοτήτων βιομάζας και η υψηλότερη πυκνότητα θάμνων σημαίνουν ότι οι πυρκαγιές σε αυτές τις περιοχές μπορεί να γίνουν πιο έντονες και να εξαπλωθούν ταχύτερα, καθώς η πυκνή βλάστηση παρέχει συνεχή καύσιμη ύλη.

Το μοντέλο 141(Timber Understory) αφορά καύσιμη ύλη που βρίσκεται κάτω από δασικές εκτάσεις, συνήθως υπό τη μορφή βλάστησης χαμηλού ύψους, θάμνων και χόρτου κάτω από δέντρα. Αυτές οι περιοχές παρουσιάζουν έναν συνδυασμό καύσιμης ύλης τόσο

στην επιφάνεια του εδάφους όσο και σε υψηλότερα επίπεδα, καθιστώντας τη φωτιά ικανή να εξαπλωθεί τόσο στο χαμηλό όσο και στο μεσαίο στρώμα της βλάστησης. Η διάδοση της φωτιάς σε αυτό το είδος καύσιμης ύλης εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των χαμηλών θάμνων με τα ξηρά κλαδιά και το χόρτο.

Το μοντέλο 142(Timber Litter) αναφέρεται στη λεγόμενη "καύσιμη ύλη απορριμμάτων" που συγκεντρώνεται στα δάση. Αυτή περιλαμβάνει κλαδιά, φύλλα και άλλα υπολείμματα που βρίσκονται στο έδαφος κάτω από δασικά δέντρα. Η καύσιμη ύλη αυτού του είδους παρουσιάζει υψηλότερο κίνδυνο σε περιόδους ξηρασίας, καθώς μπορεί να καεί εύκολα και να συμβάλει στη γρήγορη εξάπλωση της φωτιάς μέσω της επιφάνειας του εδάφους. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για περιοχές με πυκνή δασική κάλυψη και ξηρά υπολείμματα.

Το μοντέλο 145(Low Load Timber Understory) είναι παρόμοιο με το μοντέλο 141, αλλά με χαμηλότερη ποσότητα καύσιμης ύλης. Πρόκειται για περιοχές με μειωμένο φορτίο βιομάζας στον υπόροφο, όπως σε αραιά δάση όπου η βλάστηση είναι πιο περιορισμένη. Η φωτιά σε αυτό το περιβάλλον διαδίδεται πιο αργά, καθώς η καύσιμη ύλη δεν είναι τόσο πυκνή όσο σε άλλες περιοχές με περισσότερη βιομάζα. Αυτό το μοντέλο είναι ιδανικό για προσομοιώσεις σε περιοχές με χαμηλότερη πιθανότητα εκτεταμένων και έντονων πυρκαγιών.

Σε κάθε περίπτωση, τα επιλεγμένα μοντέλα καύσιμης ύλης προσαρμόστηκαν στις τοπικές συνθήκες των περιοχών μελέτης, αλλάζοντας την κατανομή και την πυκνότητα της καύσιμης ύλης βάσει των δεδομένων που συλλέχθηκαν. Αυτές οι προσαρμογές εξασφάλισαν μεγαλύτερη ακρίβεια στις προσομοιώσεις, επιτρέποντας την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και επίπεδα καύσιμης ύλης.

Ειδικότερα, ως προς το σκέλος της ισοδυναμίας του NDVI με τον χρησιμοποιούμενο τύπο καυσίμου ανά περίπτωση, με βάση τα όσα έχουν αναφερθεί σε προηγούμενα για κάθε έναν από τους πέντε τύπους καυσίμου και τον σχετικό δείκτη NDVI από το σύστημα Copernicus, χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας 5.5 που ακολουθεί. Στον ίδιο πίνακα αποτυπώνονται και συνοπτικά ορισμένα περαιτέρω χαρακτηριστικά.

*Πίνακας 5.5 Αντιστοιχία NDVI και καυσίμων*

NDVI	Canopy Cover [%]	Fuel Model [class]	CBH [meters*10]	CH [meters*10]	CBD [kg*m2/100]
0-0,1	0	99	0	0	0
0,1-	10	104	0	3	3

0,2					
0,2-0,3	20	121	0	4	4
0,3-0,4	30	121	0	4	4
0,4-0,5	40	122	0	5	5
0,5-0,6	50	141	5	10	10
0,6-0,7	60	142	10	20	20
0,7-0,8	70	145	20	35	30

Το πρόγραμμα FLAMMAP υπολογίζει την περιεχόμενη υγρασία καυσίμου (fuel moisture content) με βάση προκαθορισμένες τιμές ή τιμές που εισάγονται από τον χρήστη, ανάλογα με τον τύπο της καύσιμης ύλης και τις συνθήκες περιβάλλοντος. Η περιεχόμενη υγρασία καυσίμου, όπως αναφέραμε σε προηγούμενα, είναι ένας καθοριστικός παράγοντας στην διάδοση της πυρκαγιάς.

Το FLAMMAP, για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας καυσίμου, χρησιμοποιεί δύο βασικούς τρόπους: τη χρήση στατικών τιμών και τον υπολογισμό βάσει καιρικών δεδομένων. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από την ακρίβεια και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, καθώς και από τους στόχους της προσομοίωσης.

Η πρώτη μέθοδος, η χρήση στατικών τιμών (Static Values), επιτρέπει στον χρήστη να εισάγει προκαθορισμένες τιμές υγρασίας για κάθε τύπο καυσίμου. Αυτές οι τιμές παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, ανεξάρτητα από τις μεταβολές των καιρικών συνθηκών. Αυτή η προσέγγιση είναι χρήσιμη όταν η προσομοίωση διεξάγεται για σταθερές συνθήκες ή όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα πεδίου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αναφορά. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για περιπτώσεις όπου δεν υπάρχει επαρκής πληροφόρηση για την καθημερινή μεταβολή της υγρασίας ή όταν οι συνθήκες θεωρούνται σταθερές κατά την περίοδο της προσομοίωσης.

Η δεύτερη μέθοδος, ο υπολογισμός βάσει καιρικών δεδομένων (Weather Data Inputs), χρησιμοποιεί λεπτομερή καιρικά δεδομένα όπως θερμοκρασία, σχετική υγρασία και βροχόπτωση για να εκτιμήσει την περιεχόμενη υγρασία των καυσίμων. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει μια πιο δυναμική και ρεαλιστική αναπαράσταση της υγρασίας του καυσίμου, καθώς λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στις καιρικές συνθήκες κατά την περίοδο της προσομοίωσης. Ο υπολογισμός γίνεται μέσω αλγορίθμων που προσαρμόζονται στους

διαφορετικούς τύπους καυσίμων και στον ρυθμό με τον οποίο τα καύσιμα απορροφούν ή αποβάλλουν υγρασία. Έτσι, η μέθοδος αυτή είναι ιδανική για σενάρια όπου οι καιρικές συνθήκες μεταβάλλονται σημαντικά ή για μακροχρόνιες προσομοιώσεις που καλύπτουν διαφορετικές εποχές.

Η περιεχόμενη υγρασία των καυσίμων είναι κρίσιμη για τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς, καθώς επηρεάζει άμεσα τη δυνατότητα ανάφλεξης, τον ρυθμό καύσης και την ένταση της πυρκαγιάς. Καύσιμα με υψηλή υγρασία απαιτούν περισσότερη θερμική ενέργεια για να αναφλεγούν, ενώ καύσιμα με χαμηλή υγρασία μπορούν να αναφλεγούν και να καούν πολύ πιο εύκολα, αυξάνοντας την ένταση και την ταχύτητα εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Επομένως, η ακριβής εκτίμηση της περιεχόμενης υγρασίας είναι απαραίτητη για μια αξιόπιστη προσομοίωση.

Η ακρίβεια του υπολογισμού της υγρασίας εξαρτάται από την ποιότητα των εισαγόμενων δεδομένων. Για παράδειγμα, αν οι μετρήσεις της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας είναι ακριβείς και αντιπροσωπεύουν επαρκώς τις συνθήκες της περιοχής μελέτης, τότε και η εκτίμηση της υγρασίας του καυσίμου θα είναι ακριβής. Επίσης, η χρήση δεδομένων από πολλαπλές πηγές, όπως τοπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς και δορυφορικές μετρήσεις, μπορεί να βελτιώσει την αξιοπιστία του υπολογισμού.

### **5.3.5 Σύγκριση βασικής προσομοίωσης με τα πραγματικά αποτελέσματα**

Στην παρούσα φάση της ανάλυσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των πυρκαγιών στις περιοχές Σκλαβοπούλα και Κακοδίκι, τα οποία συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των συμβάντων. Η προσομοίωση έχει βασιστεί σε μετεωρολογικά δεδομένα, καθώς και σε δεδομένα καύσιμης ύλης και τοπογραφίας, με στόχο να αποτυπώσει όσο το δυνατόν πιο ακριβώς τη συμπεριφορά των πυρκαγιών. Η σύγκριση των προσομοιωμένων αποτελεσμάτων με τα πραγματικά γεγονότα προσφέρει πολύτιμες πληροφορίες για την ακρίβεια και την αξιοπιστία των μοντέλων.



*Εικόνα 5.5 Σύγκριση προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα για την πυρκαγιά Σκλαβοπούλα*

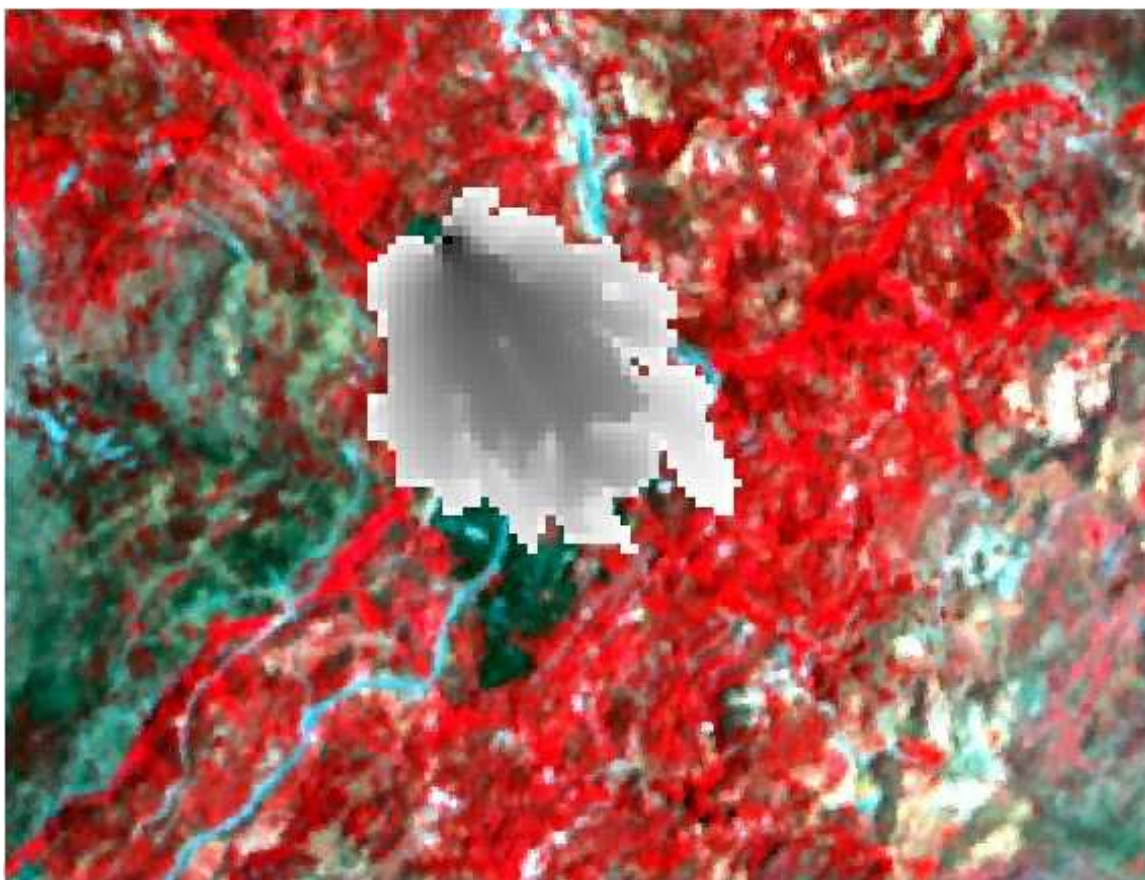
Στην περίπτωση της Σκλαβοπούλας, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η κατεύθυνση της φωτιάς και ο ρυθμός εξάπλωσής της αντιστοιχούν σε μεγάλο βαθμό με τα πραγματικά δεδομένα. Η συνολική επιφάνεια που επηρεάστηκε από την πυρκαγιά προσεγγίζεται αρκετά καλά από την προσομοίωση, με μία σημαντική παρατήρηση: η επικάλυψη μεταξύ της προσομοιωμένης και της πραγματικής περιοχής ανέρχεται στο 42%. Αυτή η διαφορά μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της φωτιάς σε μικροκλίμακα και σε τοπικές συνθήκες που ενδεχομένως να μην αποτυπώνονται πλήρως στην προσομοίωση.

Ένας από τους βασικούς παράγοντες που ενδέχεται να ευθύνονται για την απόκλιση στη Σκλαβοπούλα είναι η ακρίβεια των δεδομένων του ανέμου. Όπως έχουμε αναφέρει, τα δεδομένα ανέμου τροποποιήθηκαν με βάση πραγματικές παρατηρήσεις, καθώς ο πλησιέστερος μετεωρολογικός σταθμός βρίσκεται περίπου 12 χιλιόμετρα μακριά από την περιοχή. Η απόσταση αυτή μπορεί να έχει επηρεάσει την ακρίβεια των δεδομένων, καθώς οι τοπικές συνθήκες ανέμου διαφοροποιούνται συχνά λόγω της μορφολογίας του εδάφους και του μικροκλίματος που δημιουργείται από την ίδια την πυρκαγιά. Οι πυρκαγιές παράγουν το δικό τους μικροκλίμα, το οποίο περιλαμβάνει αυξημένες θερμοκρασίες, ενισχυμένους ανέμους και χαμηλότερα επίπεδα υγρασίας. Αυτές οι τοπικές συνθήκες δεν καταγράφονται πλήρως από τους σταθμούς και είναι πιθανό να μην έχουν ενσωματωθεί με ακρίβεια στην προσομοίωση.



Επιπλέον, η τοπογραφία της περιοχής στη Σκλαβοπούλα είναι έντονα ανώμαλη, με απότομες αλλαγές στο υψόμετρο και την κλίση του εδάφους. Το ανάγλυφο της περιοχής επηρεάζει σημαντικά την κατεύθυνση και την ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς, κυρίως λόγω της αλληλεπίδρασης με τον άνεμο. Μικρές διαφοροποιήσεις στην τοπογραφία που μπορεί να μην έχουν αποτυπωθεί ακριβώς στο μοντέλο θα μπορούσαν να προκαλέσουν αποκλίσεις στην προσομοίωση. Για παράδειγμα, σε περιοχές με έντονη κλίση, οι φωτιές έχουν την τάση να εξαπλώνονται ταχύτερα προς τα ανάντη τμήματα, κάτι που ίσως να μην αποτυπώθηκε επαρκώς στην προσομοίωση.

Ένας τρίτος παράγοντας που πρέπει να εξεταστεί είναι η κατανομή και η πυκνότητα της καύσιμης ύλης. Παρά τη χρήση δεδομένων από το πρόγραμμα COPENICUS και τη φυσική αυτοψία που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή, είναι πιθανό να υπάρχουν μικρές αποκλίσεις στην πραγματική κατανομή της βλάστησης και της καύσιμης ύλης. Οι πυρκαγιές μπορούν να επιβραδυνθούν ή να ενισχυθούν ανάλογα με την πυκνότητα και την υγρασία της βλάστησης, στοιχεία που είναι δύσκολο να αποτυπωθούν με απόλυτη ακρίβεια στην προσομοίωση. Μικρές αλλαγές στη συγκέντρωση της καύσιμης ύλης ή στη φρεσκάδα της βλάστησης μπορεί να έχουν σημαντική επίδραση στην εξέλιξη της πυρκαγιάς.



*Εικόνα 5.6 Σύγκριση προσομοίωσης για την πυρκαγιά στη θέση Κακοδίκι*

Στην περίπτωση του Κακοδικίου, η προσομοίωση έδειξε υψηλή ταύτιση της περιοχής που επηρεάστηκε από την πυρκαγιά, δηλαδή η προσομοίωση αποτυπώνει σε μεγάλο βαθμό την έκταση φωτιάς από αυτή που καταγράφηκε στην πραγματικότητα. Ενώ η κατεύθυνση και ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς φαίνεται να αντιστοιχούν στις πραγματικές συνθήκες, η συνολική έκταση που επηρεάστηκε στην προσομοίωση είναι ελαφρώς μεγαλύτερη από την πραγματική. Αυτή η απόκλιση μπορεί να εξηγηθεί εν μέρει από τα δεδομένα του ανέμου, τα οποία δεν τροποποιήθηκαν, καθώς ο πλησιέστερος μετεωρολογικός σταθμός βρίσκεται σχετικά κοντά και θεωρήθηκε επαρκής για την περιοχή. Ωστόσο, όπως συμβαίνει και στη Σκλαβοπούλα, το τοπικό μικροκλίμα της πυρκαγιάς μπορεί να διαφοροποιήσει τις συνθήκες σε μικρή κλίμακα.

Επιπλέον, στο Κακοδίκι, το ανάγλυφο της περιοχής είναι πιο ήπιο σε σύγκριση με τη Σκλαβοπούλα, κάτι που θεωρητικά μειώνει τις πιθανές αποκλίσεις στην προσομοίωση. Παρά το πιο ομαλό τοπίο, όμως, οι μικρές αλλαγές στην τοπογραφία και η διαμόρφωση του εδάφους μπορούν επίσης να επηρεάσουν τη συμπεριφορά της φωτιάς. Η τοπογραφία είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην εξάπλωση των πυρκαγιών, καθώς επηρεάζει την κίνηση του αέρα, τη θερμοκρασία και την υγρασία της περιοχής. Εάν το μοντέλο δεν έχει αποτυπώσει επαρκώς αυτές τις παραμέτρους, η απόκλιση στην επιφάνεια της φωτιάς θα μπορούσε να οφείλεται σε τέτοιου είδους σφάλματα.

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας είναι το μικροκλίμα της πυρκαγιάς. Καθώς η φωτιά αναπτύσσεται, δημιουργεί ένα δικό της μικροκλίμα, το οποίο μπορεί να ενισχύσει τις τοπικές συνθήκες. Το μικροκλίμα αυτό περιλαμβάνει ενισχυμένους ανέμους και μειωμένη υγρασία, παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την εξάπλωση της φωτιάς. Η μοντελοποίηση αυτών των παραγόντων είναι πολύπλοκη και ενδέχεται να μην έχει ενσωματωθεί πλήρως στην προσομοίωση, γεγονός που θα μπορούσε να εξηγήσει την υπερκάλυψη της περιοχής στην προσομοίωση.

Συνοψίζοντας, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται μεταξύ των προσομοιωμένων και των πραγματικών δεδομένων στις περιπτώσεις της Σκλαβοπούλας και της Κακοδικίου μπορούν να αποδοθούν σε διάφορους παράγοντες. Η ακρίβεια των μετεωρολογικών δεδομένων, η επίδραση του μικροκλίματος της πυρκαγιάς, η τοπογραφία της περιοχής και η κατανομή της καύσιμης ύλης αποτελούν καθοριστικά στοιχεία για την εξάπλωση των πυρκαγιών. Παρότι υπάρχουν κάποιες αποκλίσεις, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι αρκετά κοντά στα πραγματικά γεγονότα, γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των δεδομένων και των μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν.



Τα αποτελέσματα κρίνονται συνολικά ικανοποιητικά για την παρούσα εργασία, δεδομένου ότι ο πρωταρχικός στόχος είναι να αξιολογηθεί η εξέλιξη της πυρκαγιάς υπό διαφορετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής. Το γεγονός ότι η προσομοίωση πλησιάζει σε μεγάλο βαθμό τα πραγματικά δεδομένα παρέχει τη βάση για να προχωρήσουμε στη μελέτη των μελλοντικών τάσεων, υπό τις μεταβολές που αναμένεται να προκύψουν λόγω της αλλαγής του κλίματος. Τα σενάρια που θα εξεταστούν στο επόμενο στάδιο της μελέτης επικεντρώνονται κυρίως στην επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας και στη μεταβολή της σχετικής υγρασίας, και οι μέχρι τώρα δοκιμές δείχνουν ότι το μοντέλο είναι κατάλληλο για να αποτυπώσει με ικανοποιητική ακρίβεια τις μελλοντικές τάσεις.

Η χρήση του μοντέλου προσομοίωσης σε συνδυασμό με τα σενάρια του IPCC επιτρέπει την πρόβλεψη της εξέλιξης των πυρκαγιών υπό διαφορετικές κλιματικές συνθήκες. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να μελετήσουμε όχι μόνο τη μελλοντική εξάπλωση των πυρκαγιών, αλλά και την ένταση και την ταχύτητά τους, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση της θερμοκρασίας και τις αλλαγές στη βλάστηση. Συνολικά, η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε δείχνει ότι, αν και υπάρχουν περιορισμοί και αβεβαιότητες, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι επαρκώς ακριβή ώστε να επιτρέπουν τη μελέτη της συμπεριφοράς των πυρκαγιών στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής.

Έτσι, το επόμενο στάδιο της εργασίας μας, που θα επικεντρωθεί στη μελέτη της τάσης των πυρκαγιών με βάση τις μεταβολές των κλιματικών παραμέτρων, μπορεί να βασιστεί σε αυτά τα αποτελέσματα. Εφόσον τα μοντέλα έχουν ήδη δώσει ικανοποιητικές προσομοιώσεις για τις τρέχουσες συνθήκες, μπορούμε με ασφάλεια να τα χρησιμοποιήσουμε για να εξετάσουμε τις μελλοντικές τάσεις, λαμβάνοντας υπόψη την αναμενόμενη κλιματική αλλαγή.

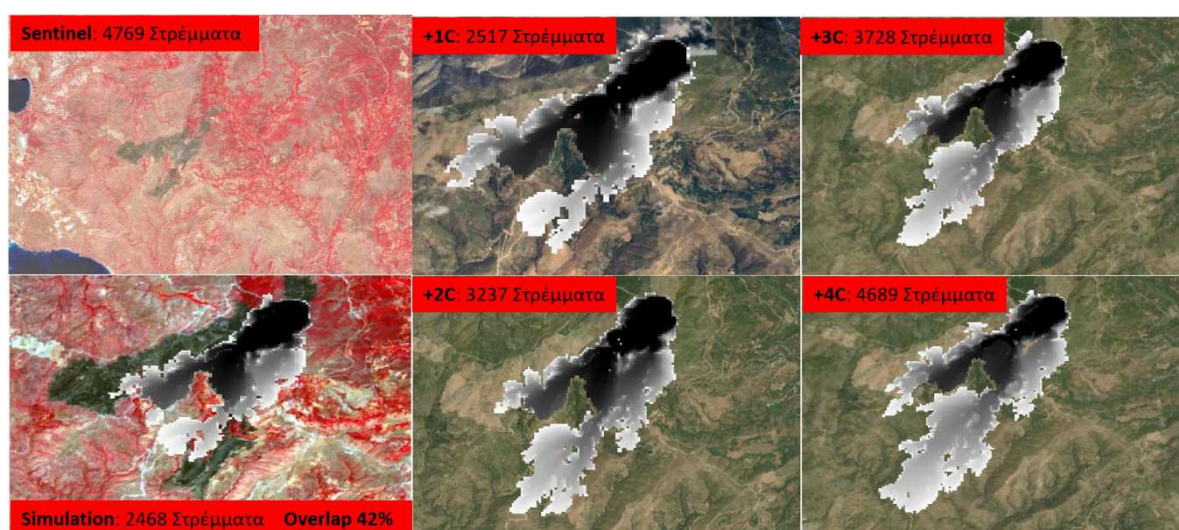
### 5.3.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων για τις παραμέτρους των σεναρίων SSP245 και SSP370

*Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων*

	Καμένη Έκταση [Στρέμματα]					
	Sentinel	Άνευ Σεναρίου	Σενάριο +1°C	Σενάριο +2°C	Σενάριο +3°C	Σενάριο +4°C
Πυρκαγιά «Σκλαβοπούλα»	4769	2468 (42%)	2517(+2%)	3237 (+31%)	3728 (+51%)	4689 (+90%)

Πυρκαγιά «Κακοδίκι»	362	403 (45%)	532 (+32%)	567 (+41%)	700 (+74%)	789 (+96%)
------------------------	-----	--------------	------------	------------	------------	------------

Ο Πίνακας 5.6 αποτελεί έναν σημαντικό άξονα της μελέτης μας, καθώς αποτυπώνει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην εξάπλωση δασικών πυρκαγιών στην περιοχή του νομού Χανίων, υπό διάφορα σενάρια θερμοκρασιακών αυξήσεων. Τα δεδομένα αυτά βασίζονται σε προσομοιώσεις με το πρόγραμμα FLAMMAP, ενώ η πραγματική καμένη έκταση έχει υπολογιστεί με βάση δεδομένα από τον δορυφόρο Sentinel. Παράλληλα, στην πρώτη στήλη με την ένδειξη «Άνευ Σεναρίου», παρουσιάζεται η καμένη έκταση με τα πραγματικά δεδομένα της πυρκαγιάς, δίχως κάποια υπόθεση για αύξηση της θερμοκρασίας.



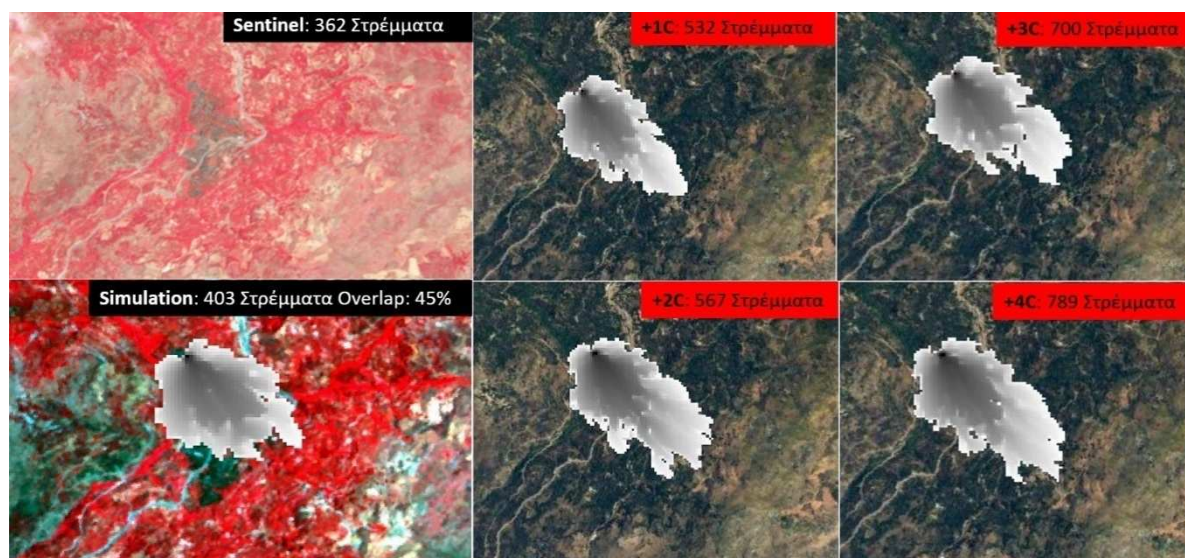
Εικόνα 5.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για την πυρκαγιά στη θέση Σκλαβοπούλα

Για την πυρκαγιά στη Σκλαβοπούλα, η καμένη έκταση, όπως καταγράφεται από τον Sentinel, ήταν 4769 στρέμματα. Ωστόσο, η αρχική προσομοίωση δίχως σενάριο δείχνει καμένη έκταση 2468 στρεμμάτων, με επικάλυψη περίπου 42% της πραγματικής έκτασης. Η διαφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους παράγοντες. Πρώτον, τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση ήταν από έναν μετεωρολογικό σταθμό που απέχει 12 χιλιόμετρα από την περιοχή της πυρκαγιάς. Η απόσταση αυτή μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ανακρίβειες, ειδικά στις μετρήσεις του ανέμου, οι οποίες είναι εξαιρετικά κρίσιμες για τη συμπεριφορά και την εξάπλωση της πυρκαγιάς. Επιπλέον, το ανάγλυφο της περιοχής και η τοπογραφία γενικότερα μπορεί να διαμορφώνουν μικροκλίματα που να επηρεάζουν την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου. Τέτοιες διακυμάνσεις είναι δύσκολο να αναπαραχθούν με ακρίβεια στο μοντέλο.

Πέραν των παραπάνω, οι προσπάθειες κατάσβεσης που έγιναν στην περιοχή της πυρκαγιάς δεν έχουν ληφθεί υπόψη στο μοντέλο, γεγονός που μπορεί να εξηγήει την απόκλιση στην καμένη έκταση. Η ανθρώπινη παρέμβαση, όπως οι ρίψεις νερού από αέρος ή η δημιουργία αντιπυρικών ζωνών, μπορεί να έχουν επιβραδύνει ή να έχουν σταματήσει την εξάπλωση της πυρκαγιάς, γεγονός που το μοντέλο δεν είναι σε θέση να προβλέψει.

Όσον αφορά τα σενάρια θερμοκρασιακών αυξήσεων, παρατηρούμε μια σταδιακή και έντονη αύξηση της καμένης έκτασης. Συγκεκριμένα, για την πυρκαγιά στη Σκλαβοπούλα, η αύξηση της θερμοκρασίας κατά  $1^{\circ}\text{C}$  αυξάνει την καμένη έκταση κατά 2% σε σχέση με το αρχικό σενάριο, ενώ με την αύξηση κατά  $2^{\circ}\text{C}$ , η καμένη έκταση φτάνει τα 3237 στρέμματα, δηλαδή μια αύξηση της τάξης του 31%. Όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, η επίπτωση στην καμένη έκταση γίνεται ακόμα πιο δραματική, με το σενάριο  $+3^{\circ}\text{C}$  να αγγίζει τα 3728 στρέμματα, δηλαδή 51% αύξηση, ενώ στο πιο ακραίο σενάριο των  $+4^{\circ}\text{C}$  η καμένη έκταση πλησιάζει τα 4689 στρέμματα, δηλαδή σχεδόν διπλασιάζεται σε σχέση με το αρχικό σενάριο (90% αύξηση).

Αυτό υποδεικνύει ότι η κλιματική αλλαγή και οι αυξήσεις της θερμοκρασίας έχουν σημαντική επίδραση στην εξάπλωση των πυρκαγιών, εντείνοντας τη σοβαρότητα και την ένταση του φαινομένου. Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την περιεχόμενη υγρασία των καυσίμων, γεγονός που τα καθιστά πιο εύφλεκτα, ενώ οι ξηρότερες συνθήκες συνεισφέρουν στην ταχύτερη εξάπλωση της φωτιάς και στη δυσκολία ελέγχου της.



Εικόνα 5.8 Αποτελέσματα προσομοιώσεων πυρκαγιάς στη θέση Κακοδίκι

Στην περίπτωση της πυρκαγιάς στο Κακοδίκι, η πραγματική καμένη έκταση ήταν 362 στρέμματα, ενώ η αρχική προσομοίωση δείχνει ελαφρώς μεγαλύτερη έκταση, 403 στρέμματα, με επικάλυψη περίπου 45%. Η διαφορά αυτή είναι μικρότερη από ότι στη

Σκλαβοπούλα και μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η περιοχή είναι πιο ομαλή και η τοπογραφία της δεν δημιουργεί έντονα μικροκλίματα που να διαφοροποιούν τη συμπεριφορά της φωτιάς. Ωστόσο, παρά την αρχική αυτή μικρή απόκλιση, τα σενάρια θερμοκρασιακής αύξησης έχουν σαφή επίπτωση και στην περίπτωση αυτή. Με αύξηση 1°C, η καμένη έκταση αυξάνεται κατά 32%, φτάνοντας τα 532 στρέμματα, ενώ με αύξηση 2°C η έκταση αυξάνεται στα 567 στρέμματα, δηλαδή 41% παραπάνω από την αρχική προσομοίωση. Στα σενάρια των +3°C και +4°C, η καμένη έκταση αυξάνεται δραματικά, φτάνοντας τα 700 στρέμματα (+74%) και τα 789 στρέμματα (+96%) αντίστοιχα.

Τα αποτελέσματα αυτά υποδεικνύουν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει αρνητικά και τις περιοχές με πιο ήπια τοπογραφία, αυξάνοντας τη δυσκολία ελέγχου των πυρκαγιών και οδηγώντας σε μεγαλύτερες καμένες εκτάσεις. Παρόλο που η αρχική διαφορά δεν ήταν τόσο έντονη όσο στη Σκλαβοπούλα, η επίδραση της κλιματικής αλλαγής είναι και εδώ εμφανής.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι ικανοποιητικά για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης, καθώς δείχνουν την τάση και την κατεύθυνση των μεταβολών της καμένης έκτασης υπό διαφορετικά σενάρια κλιματικής αλλαγής. Ο στόχος της μελέτης δεν είναι απαραίτητα η τέλεια προσομοίωση της πραγματικής πυρκαγιάς, αλλά η διερεύνηση της επίδρασης των μελλοντικών κλιματικών σεναρίων στην εξάπλωση των πυρκαγιών. Επομένως, η γενική συμφωνία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πραγματικά δεδομένα μας επιτρέπει να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα για τη μελλοντική τάση της επικινδυνότητας των πυρκαγιών στην περιοχή.

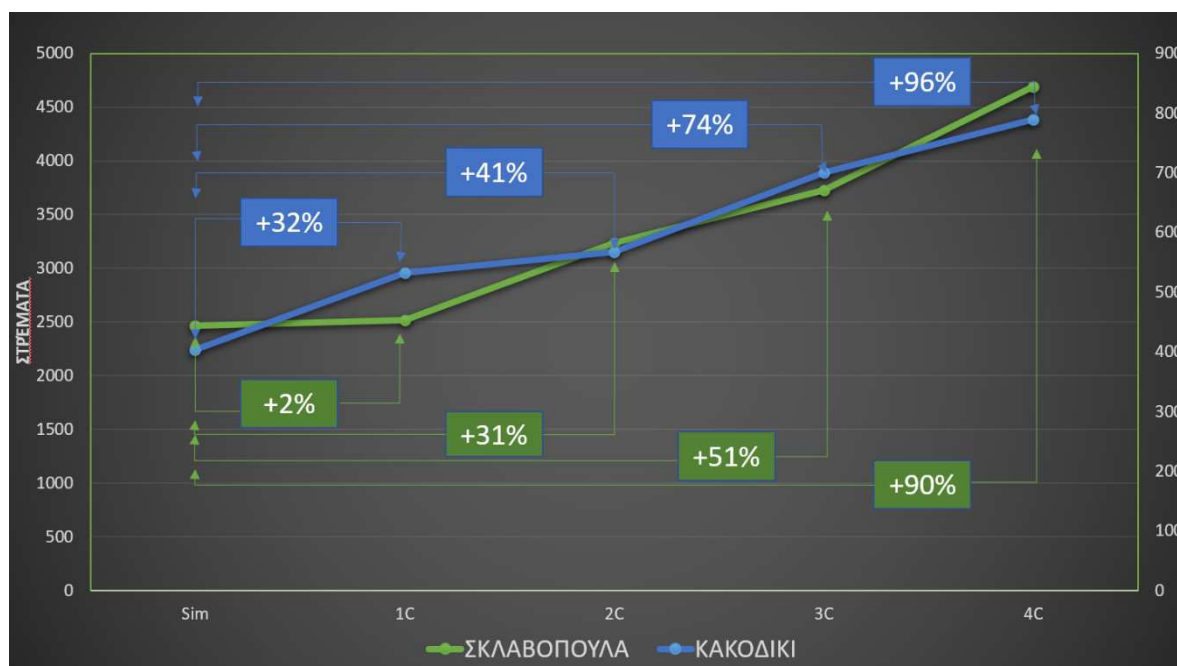
Αυτό που γίνεται ξεκάθαρο είναι ότι η κλιματική αλλαγή θα οδηγήσει σε μεγαλύτερες και πιο έντονες πυρκαγιές, ιδιαίτερα στις περιοχές με υψηλή βλάστηση και έντονο ανάγλυφο, όπως η Σκλαβοπούλα. Οι αυξήσεις της θερμοκρασίας θα επιδεινώσουν τις συνθήκες ξηρασίας και θα καταστήσουν τις πυρκαγιές πιο δύσκολα διαχειρίσιμες. Ακόμα και στις περιοχές με πιο ομαλή τοπογραφία, όπως το Κακοδίκι, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε σημαντικές αυξήσεις της καμένης έκτασης, γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη για προσαρμογή των στρατηγικών διαχείρισης και καταστολής των πυρκαγιών υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών μας, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3, μπορούν να συσχετιστούν με τα σενάρια κλιματικής αλλαγής SSP245 και SSP370, τα οποία περιλαμβάνονται στην Έκθεση Αξιολόγησης του IPCC (AR6). Παρόλο που το FLAMMAP δεν υποστηρίζει δεκαδικές αυξήσεις της θερμοκρασίας, τα σενάρια μας με αύξηση της



θερμοκρασίας κατά 1°C, 2°C, 3°C και 4°C παρέχουν μια γενική ένδειξη της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στις πυρκαγιές.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών μας δείχνουν ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας, η καμένη έκταση αυξάνεται δραματικά. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της πυρκαγιάς στη Σκλαβοπούλα, η αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C οδηγεί σε αύξηση της καμένης έκτασης κατά 2%, ενώ με αύξηση 4°C η καμένη έκταση σχεδόν διπλασιάζεται (+90%). Αυτό υποδεικνύει ότι ακόμα και μικρές αυξήσεις της θερμοκρασίας μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην εξάπλωση των πυρκαγιών, ιδιαίτερα σε περιοχές με υψηλή δασική κάλυψη και έντονο ανάγλυφο.



Εικόνα 5.9 Τάση σεναρίων για τις δύο πυρκαγιές

Σύμφωνα με το σενάριο SSP245, όπου η αύξηση της θερμοκρασίας είναι πιο μετριασμένη, μπορούμε να υποθέσουμε ότι η περιοχή των Χανίων θα αντιμετωπίσει λιγότερο ακραία σενάρια καμένων εκτάσεων. Οι προσομοιώσεις μας για αύξηση 1°C και 2°C μπορούν να θεωρηθούν ενδεικτικές για την καμένη έκταση που μπορεί να αναμένουμε σε ένα μέλλον όπου η μέση θερμοκρασία αυξηθεί σύμφωνα με το σενάριο SSP245. Στην περίπτωση αυτή, η καμένη έκταση στη Σκλαβοπούλα αυξάνεται από τα 2468 στρέμματα στα 3237 στρέμματα (31% αύξηση), ενώ στο Κακοδίκι από τα 403 στα 567 στρέμματα (41% αύξηση). Αυτό δείχνει μια αισθητή αλλά όχι καταστροφική αύξηση στις καμένες εκτάσεις, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για λήψη προληπτικών μέτρων.

Από την άλλη πλευρά, το σενάριο SSP370, με τη μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας, αντικατοπτρίζεται καλύτερα στα σενάρια των προσομοιώσεών μας με

αύξηση 3°C και 4°C. Στη Σκλαβοπούλα, η καμένη έκταση αυξάνεται στα 3728 στρέμματα (51% αύξηση) και στα 4689 στρέμματα (90% αύξηση) αντίστοιχα, ενώ στο Κακοδίκι η καμένη έκταση φτάνει τα 789 στρέμματα (96% αύξηση). Τα αποτελέσματα αυτά είναι πιο κοντά στις προβλέψεις του SSP370 και δείχνουν μια δραματική αύξηση της επικινδυνότητας των πυρκαγιών και την ανάγκη για εκτεταμένη προσαρμογή στις στρατηγικές διαχείρισης των πυρκαγιών.

Είναι δύσκολο να γίνει μια απόλυτη ποσοτική σύγκριση των προσομοιώσεων μας με τα σενάρια SSP, καθώς αυτά αφορούν παγκόσμιες μέσες θερμοκρασίες και γενικές τάσεις. Ωστόσο, τα αποτελέσματά μας δείχνουν σαφώς μια αυξητική τάση στις καμένες εκτάσεις, με τον ρυθμό της αύξησης να είναι ανάλογος της αύξησης της θερμοκρασίας. Το σενάριο SSP245 μπορεί να συγκριθεί με τα σενάρια αύξησης 1°C και 2°C, τα οποία δείχνουν μια σχετικά ελεγχόμενη αύξηση στις καμένες εκτάσεις. Αντιθέτως, το σενάριο SSP370 αντανakλάται καλύτερα στα σενάρια αύξησης 3°C και 4°C, που παρουσιάζουν εκθετική αύξηση της καμένης έκτασης και σημαντικά μεγαλύτερο κίνδυνο.

Συνολικά, τα αποτελέσματά μας δείχνουν ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, η τάση είναι να αυξάνεται εκθετικά και η καμένη έκταση. Αυτό επιβεβαιώνει ότι ακόμα και μικρές αυξήσεις της θερμοκρασίας μπορούν να έχουν σοβαρές συνέπειες στην εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών, ιδιαίτερα σε περιοχές με χαρακτηριστικά όπως αυτά των Χανίων.

## ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να διερευνήσει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην εξάπλωση δασικών πυρκαγιών, επικεντρώνοντας τη μελέτη σε μια ορεινή περιοχή του νομού Χανίων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης πυρκαγιών, με δεδομένα που αφορούσαν τόσο τη δομή και την κατανομή της καύσιμης ύλης όσο και τις επικρατούσες καιρικές συνθήκες. Με βάση τα σενάρια του IPCC (SSP245 και SSP370) που υιοθετήθηκαν στην εργασία, διαπιστώθηκε μια σαφής αυξητική τάση στη δυνατότητα εξάπλωσης και στη συνολική καμένη έκταση των πυρκαγιών υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν ότι, ανεξαρτήτως των δεδομένων αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για την αναπαράσταση των πραγματικών πυρκαγιών, η κατεύθυνση και ο ρυθμός εξάπλωσης της πυρκαγιάς παρουσιάζουν ικανοποιητική προσαρμογή στις παρατηρήσεις πεδίου. Ειδικότερα, στην περίπτωση της πυρκαγιάς στη θέση "Σκλαβοπούλα", το μοντέλο κατάφερε να αναπαραστήσει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική εξάπλωση, με την κάλυψη της καμένης έκτασης να πλησιάζει το 42%. Παρά τις μικρές αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν, κυρίως λόγω της πολυπλοκότητας του ανάγλυφου και της μη πλήρους ακρίβειας των μετεωρολογικών δεδομένων, η προσομοίωση θεωρείται επιτυχημένη.

Αντίστοιχα, για την πυρκαγιά στη θέση "Κακοδίκι", η συνολική καμένη έκταση που προέκυψε από την προσομοίωση ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη από την πραγματική. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα παρείχαν σημαντικές πληροφορίες για τη δυνητική συμπεριφορά της πυρκαγιάς υπό διάφορες καιρικές συνθήκες και την πιθανή επίδραση των τοπικών παραγόντων. Ο περιορισμένος αριθμός διαθέσιμων μετεωρολογικών σταθμών και οι προσπάθειες κατάσβεσης στο πεδίο συνέβαλαν επίσης στις αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν, ενώ το μοντέλο δεν μπόρεσε να ενσωματώσει πλήρως τις επιπτώσεις του μικροκλίματος της πυρκαγιάς, το οποίο συχνά επηρεάζει τη συμπεριφορά της.

Η διερεύνηση της επίδρασης της κλιματικής αλλαγής στα χαρακτηριστικά των πυρκαγιών είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς αποκαλύπτει την αυξημένη επικινδυνότητα που θα αντιμετωπίσουν οι δασικές περιοχές στο μέλλον. Οι αυξήσεις στη θερμοκρασία που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία δείχνουν ότι ακόμα και μικρές μεταβολές (όπως  $+1^{\circ}\text{C}$ ) μπορούν να αυξήσουν σημαντικά την καμένη έκταση, και κατά συνέπεια την ένταση και τη διάρκεια των πυρκαγιών. Ενδεικτικά, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.3, μια

αύξηση θερμοκρασίας κατά 2°C και 4°C θα μπορούσε να οδηγήσει σε διπλασιασμό της καμένης έκτασης για την πυρκαγιά "Κακοδίκι", ενώ στη "Σκλαβοπούλα" η επιφάνεια της καμένης περιοχής θα μπορούσε να αγγίζει το 90% σε σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα.

Αυτό το γεγονός υπογραμμίζει την αναγκαιότητα αναπροσαρμογής των τακτικών διαχείρισης και κατάσβεσης δασικών πυρκαγιών, λαμβάνοντας υπόψη τα νέα δεδομένα που φέρνει η κλιματική αλλαγή. Ο σύγχρονος πυροσβέστης θα κληθεί να αντιμετωπίσει πιο έντονες και ταχέως εξελισσόμενες πυρκαγιές, γεγονός που απαιτεί ενισχυμένη εκπαίδευση, καλύτερο συντονισμό, και πιο στοχευμένη χρήση πόρων. Η κατανόηση των δυναμικών συνθηκών που επικρατούν σε κάθε περιοχή, όπως και η εκτίμηση των πιθανοτήτων εξάπλωσης της πυρκαγιάς βάσει των προβλεπόμενων κλιματικών μεταβολών, θα πρέπει να ενσωματωθούν σε όλα τα επίπεδα προετοιμασίας και απόκρισης.

Η ενσωμάτωση προγνωστικών μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη τις μελλοντικές κλιματικές συνθήκες θα μπορούσε να βοηθήσει σημαντικά στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών. Εργαλεία όπως το FLAMMAP, σε συνδυασμό με προηγμένα μετεωρολογικά μοντέλα, μπορούν να προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για τις επικείμενες προκλήσεις. Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης προσφέρουν μια σαφή εικόνα των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη δασοπροστασία, δίνοντας έμφαση στη σημασία της πρόληψης και της προετοιμασίας σε τοπικό και εθνικό επίπεδο. Το πυροσβεστικό σώμα πρέπει να προσαρμοστεί στις νέες συνθήκες που επιβάλλει η κλιματική αλλαγή. Η χρήση εργαλείων όπως το FLAMMAP και άλλων προγραμμάτων προσομοίωσης μπορεί να παρέχει στους πυροσβέστες κρίσιμες πληροφορίες για την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την καλύτερη προετοιμασία και την ταχύτερη απόκριση.

Η κλιματική κρίση, όπως έχει καταγραφεί στην παρούσα εργασία, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της συχνότητας και της έντασης των δασικών πυρκαγιών, καθιστώντας αναγκαία όχι μόνο την αντιμετώπισή τους, αλλά και την προσαρμογή και μετρίαση των επιπτώσεών τους. Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής είναι πλέον αδιαμφισβήτητες, και τα αποτελέσματα της μελέτης μας καταδεικνύουν πόσο επιτακτική είναι η ανάγκη για στρατηγικές προσαρμογής και πρόληψης, ειδικά σε ευάλωτες περιοχές όπως οι ορεινές ζώνες των Χανίων. Σε αυτό το πλαίσιο, η ευθύνη του κράτους, των πολιτών και των πυροσβεστικών δυνάμεων καθίσταται κρίσιμη.



Το κράτος οφείλει να αναγνωρίσει την κλιματική αλλαγή ως βασική παράμετρο στην πολιτική δασοπροστασίας και να ενσωματώσει τη διάσταση αυτή στον σχεδιασμό και την υλοποίηση μέτρων. Η ανάγκη για μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου είναι επιτακτική, αλλά παράλληλα πρέπει να αναπτυχθούν μέτρα προσαρμογής που να λαμβάνουν υπόψη τη νέα πραγματικότητα των εντεινόμενων πυρκαγιών. Η αναβάθμιση των μετεωρολογικών υποδομών και η δημιουργία ενός δικτύου επιτήρησης και έγκαιρης προειδοποίησης είναι απαραίτητη, ώστε να μπορούν οι αρμόδιες αρχές να προβλέπουν έγκαιρα τις συνθήκες που ευνοούν την έναρξη και εξάπλωση πυρκαγιών.

Εξίσου σημαντική είναι η ενσωμάτωση τεχνολογικών εργαλείων, όπως τα συστήματα προσομοίωσης πυρκαγιών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας έδειξαν ότι, παρά τις προκλήσεις και τους περιορισμούς, τα μοντέλα αυτά μπορούν να παράσχουν πολύτιμες πληροφορίες για την εξάπλωση και τη συμπεριφορά των πυρκαγιών υπό διάφορα σενάρια κλιματικής αλλαγής. Η υιοθέτηση τέτοιων εργαλείων από το πυροσβεστικό σώμα και τις αρμόδιες αρχές είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της απόκρισης σε έκτακτες καταστάσεις, την ορθή κατανομή των πόρων και την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών κατάσβεσης. Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών θα μπορούσε να βελτιώσει την ακρίβεια των επιχειρησιακών σχεδίων και να ενισχύσει την ετοιμότητα των δυνάμεων πυρόσβεσης σε περίπτωση συμβάντων.

Οι πολίτες, από την πλευρά τους, φέρουν μια σημαντική ευθύνη στην πρόληψη των πυρκαγιών. Η ενημέρωση και η ευαισθητοποίηση για τους κινδύνους που ενέχουν οι πυρκαγιές και οι πρακτικές που μπορούν να τις προλάβουν είναι απαραίτητες. Η αλλαγή συμπεριφοράς, όπως η αποφυγή επικίνδυνων πρακτικών σε δασικές περιοχές και η συμμετοχή σε εθελοντικές δράσεις δασοπροστασίας, μπορεί να συμβάλει στη μείωση των κινδύνων. Η προσαρμογή στην κλιματική κρίση περιλαμβάνει και την ενεργό συμμετοχή της κοινωνίας των πολιτών, μέσω της κατανόησης των κινδύνων και της ανάληψης ευθύνης για την προστασία του περιβάλλοντος.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Σύνολο Συμβάντων ανά έτος, την 5ετια 2017 – 2021. Επεξεργασία στοιχείων από <a href="https://www.fireservice.gr/en_US/drasteriotetes-p.s">https://www.fireservice.gr/en_US/drasteriotetes-p.s</a> .....	3
Εικόνα 1.2 Καμμένες εκτάσεις σε στρέμματα ανά έτος. Επεξεργασία στοιχείων από <a href="https://www.fireservice.gr/en_US/synola-dedomenon">https://www.fireservice.gr/en_US/synola-dedomenon</a> .....	4
Εικόνα 2.1 Ύψος, μήκος και γωνία φλόγας .....	30
Εικόνα 2.2 Υγρασία συναρτήσει του υψομέτρου .....	37
Εικόνα 2.3: Διακύμανση υγρασίας ανά ποσανατολισμό σε μία ημέρα .....	37
Εικόνα 2.4: Χαρακτηριστικά βόρειων και νότιων εκθέσεων.....	38
Εικόνα 2.5 Υγρασία νεκρών και ζωντανών καυσίμων μέσα στο έτος.....	41
Εικόνα 3.1: Το φαινόμενο του θερμοκηπίου σχηματικά.....	45
Εικόνα 3.2: Η εξέλιξη της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας (NASA, 2018) .....	46
Εικόνα 4.1. Έκταση καμένων δασικών εκτάσεων Κρήτης και Χανίων (σε στρέμματα) ανά έτος .....	58
Εικόνα 4.2. Ποσοστό καμένων εκτάσεων ν. Χανίων επί του συνόλου της περιφέρειας.....	58
Εικόνα 4.3 Το περιβάλλον εργασίας του FLAMMAP.....	61
Εικόνα 5.1 Εικόνα της περιοχής από το GoogleMaps (μετά την πυρκαγιά) .....	72
Εικόνα 5.2 Η πυρκαγιά από τον δορυφόρο Sentinel-2.....	72
Εικόνα 5.3 Εικόνα της περιοχής από το GoogleMaps .....	73
Εικόνα 5.4 Η πυρκαγιά από τον δορυφόρο Sentinel-2.....	74
Εικόνα 5.5 Σύγκριση προσομοίωσης με πραγματικά δεδομένα για την πυρκαγιά Σκλαβοπούλα.....	83
Εικόνα 5.6 Σύγκριση προσομοίωσης για την πυρκαγιά στη θέση Κακοδίκι .....	84
Εικόνα 5.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων για την πυρκαγιά στη θέση Σκλαβοπούλα.....	87
Εικόνα 5.8 Αποτελέσματα προσομοιώσεων πυρκαγιάς στη θέση Κακοδίκι.....	88
Εικόνα 5.9 Τάση σεναρίων για τις δύο πυρκαγιές .....	90

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Συμβάντα ανά Περιφέρεια την 5ετία 2017 – 2021 .....	3
Πίνακας 4.1. Στατιστικά στοιχεία κλιμακίων και Υπηρεσιών ν. Χανίων .....	59
Πίνακας 4.2. Μετεωρολογικά δεδομένα για Κάνδανο το έτος 2022 .....	59
Πίνακας 5.1. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Παλαιοχώρας για την πυρκαγιά στη θέση Σκλαβοπούλα.....	77
Πίνακας 5.2. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Κανδάνου για την πυρκαγιά στη θέση Κακοδίκι .....	77
Πίνακας 5.3. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Παλαιοχώρας για την πυρκαγιά στη θέση Σκλαβοπούλα (μετά την τροποποίηση), όπως χρησιμοποιήθηκαν στο βασικό σενάριο .....	78
Πίνακας 5.4. Μετεωρολογικά δεδομένα σταθμού Κανδάνου για την πυρκαγιά στη θέση Κακοδίκι, όπως χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση .....	78
Πίνακας 5.5 Αντιστοιχία NDVI και καυσίμων .....	80
Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα προσομοιώσεων .....	86

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Alexander, M., E., 2000. Fire Behaviour as a Factor in Forest and Rural Fire Suppression. Forest Research, Rotorua, in association with the National Rural Fire Authority, Wellington. Forest Research Bulletin No. 197, Forest and Rural Fire Scientific and Technical Series, Report No. 5. 30 pp.
- Anderson, H., E., 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior, USDA.
- Andrews, P., L., 1986. BEHAVE. Fire behavior prediction and fuel modeling system. Burn subsystem, USDA Forest Service. Ogden, UT.
- Andrews, P., Bevins, C., Seli, R., 2003. Behave Plus fire modeling system user's guide, version 2.0. USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS - GTR - 106 www.
- Albini, F, A, 1996. Iterative solution of the radiation transport equations governing spread of fire in wildland fuel. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 32: 534 – 543.
- Burgan, R., E. and Rothermel, R., C., 1984. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system — Fuel subsystem. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Gen. Tech. Rep. INT - 167. Ogden, Utah. 126 p.
- Bodrozic, L., Marasovic, J., Stipanicev, D., 2005. Fire modelling in forest fire management. Department for Modelling and Intelligent Systems. FESB - Faculty of Electrical Engineering, Machine Engineering, and Naval Architecture. University of Split, Croatia.
- Chandler, C., Cheney, P., Thomas, P., Traband, L. and Williams, D., 1983. Fire in Forestry, Volume I. Forest fire behavior and effects. A Willey - Interscience Publication. John Willey & sons, 449.
- Dupuy, J., L., 2009. Fire start and spread. In: Birot Y. (ed) Living with wildfire: what science can tell us, Joensuu, Finland: European Forest Institute, Discussion Paper 15, 27-31p.
- Fried, J. S., Torn, M. S. and Mills, E., 2004. The impact of climate change on wildfire severity: a regional forecast for northern California. Climatic change, 64: 169 - 191.
- Finney, M. A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In Proceedings of conference on fuels management—how to measure success: Portland, OR (pp. 213-220). USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

- Flannigan, M. D., Stocks, B. J., & Wotton, B. M. (2000). Climate change and forest fires. *The Science of the Total Environment*, 262(3), 221-229.
- Kalabokidis, K., D., Gatzojannis, S. and Galatsidas, S., 2002. Introducing wildfire into forest management planning: towards a conceptual approach. *Forest Ecology and Management*, 158, 1 - 3, 41 – 50 p.
- Keane, R. E., Cary, G. J., Davies, I. D., Flannigan, M. D., Gardner, R. H., Lavorel, S., ... & Veness, T. (2004). A classification of landscape fire succession models: spatial simulations of fire and vegetation dynamics. *Ecological Modelling*, 179(1), 3-27.
- Miller, C., & Ager, A. A. (2013). A review of recent advances in risk analysis for wildfire management. *International Journal of Wildland Fire*, 22(1), 1-14.
- Pyne, S., J., Andrews, P., L. and Laven, R., D., 1996. *Introduction to Wildland Fire*, second edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Rossa, & Fernandes. (2017). On the effect of live fuel moisture content on fire rate of spread. *Forest Systems*, 3(26).
- Rothermel, R., C. and Anderson E., 1966. Interm. For. Rang. Exp. Sta. USDA. Res. Pap. INT - 30. 1 - 34 p.
- Rothermel, R., C., 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, General Technical Report INT - 115.
- Rothermel, R., C., 1983. How to predict the spread and Intensity of Forest and Range Fires. Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, UT84401. General Technical Report INT - 143.
- Rothermel, R., C., 1991. Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. USDA Forest Service Research Paper int - 438.46 p.
- Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). Standard fire behavior fuel models: A comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. USDA Forest Service General Technical Report RMRS-GTR-153.
- Stratton, R. D. (2009). Guidebook on LANDFIRE fuels data acquisition, critique, modification, maintenance, and model calibration. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-220.
- Van Wagner, C., E., 1977. Conditions for the Start and Spread of Crown Fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 7: 23 - 34.

Weise, D., R. and Biging, G., S., 1997. A Qualitative Comparison of Fire Spread Models Incorporating Wind and Slope Effects. *Forest Science*, Vol 43, No 2.

Γκόφας, Α., 2001. Εγχειρίδιο δασοπροστασίας, εκδόσεις Γιαχούδη,

Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών. 2006. Καταβάτες Άνεμοι.

Ηλιόπουλος, Ν., 2013. Πυρομετεωρολογία, πυρκαγιές και κλιματική αλλαγή. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Γεωγραφίας

Ηλιόπουλος, Ν. 2017. Σημειώσεις Μαθήματος. Κηφισιά: Πυροσβεστική Ακαδημία.

Κολυδάς, Θ., Ν., 2016. Διδρυματικό διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών. Άνεμος και Γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας

Περογιαννάκης, Χ. 1974. Ναυτική Μετεωρολογία. Αθήνα: Ίδρυμα Ευγενίδου.

Τσαγκάρη, Κ. 2011. Δασικές Πυρκαγιές Ελλάδας. Αθήνα: ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε.

Χάλαρης, Μ. 2016. Δασικές Πυρκαγιές. Αθήνα: Atmitos.