



ΣΤΡΑΤΙΩΤΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΕΥΕΛΠΙΔΩΝ
Τμήμα Στρατιωτικών Επιστημών

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟΥ ΕΤΟΥΣ 2022-23

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ
ΛΗΨΗ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ –
MASTER OF SCIENCE IN OPERATIONAL
RESEARCH AND DECISION MAKING

(ΠΔ 59 /2021 /ΦΕΚ 145Α'/17.08.2021)



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Συνεργατική πλοήγηση με ανοχή σε σφάλματα δικτυωμένων σμηνών UAV για παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών

Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για
την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Υπό:

ΒΑΦΕΙΑΔΗ ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ

A.M.: 2021018103

MΑΡΤΙΟΣ 2025

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή του κ. ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΒΑΦΕΙΑΔΗ εγκρίνεται:

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Καθηγητής ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΙΩ.ΔΑΡΑΣ (Επιβλέπων)



Αναπληρωτής Καθηγητής ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ,



Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΤΕΛΙΟΣ ΤΣΑΦΑΡΑΚΗΣ

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

© Copyright υπό Βαφειάδη Απόστολου

Έτος 2025

Η διατριβή αφιερώνεται
στους γονείς μου

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. ΔΑΡΑ Νικόλαο για την αμέριστη καθοδήγηση και υπομονή του καθ' όλη τη διάρκεια της αγαστής συνεργασίας μας. Η συνεισφορά του κατέστησε εφικτή την επιτυχημένη ολοκλήρωση της εν λόγω διατριβής.

ΣΕΛΙΔΑ ΣΚΟΠΙΜΑ ΚΕΝΗ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Σφάλμα!

Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

5

ABSTRACT

6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

7

1.1. ΓΕΝΙΚΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ 7

1.1.1. Η σημασία των δασών στη βιωσιμότητα του πλανήτη 7

1.1.2. Προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα δάση στην εποχή
της κλιματικής αλλαγής 8

1.1.3. Η χρήση των UAVs για την προστασία του περιβάλλοντος 9

1.2. Η ΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ 10

1.2.1. Στατιστικά στοιχεία και επιπτώσεις δασικών πυρκαγιών
στην Ε.Ε. 10

1.2.2. Περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες 11

1.2.3. Παραδοσιακές μέθοδοι αντιμετώπισης και περιορισμοί 12

1.3 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ 14

1.3.1. Προκλήσεις στη χρήση UAVs σε συνεργατικά σμήνη 14

1.3.2. Περιορισμοί λόγω τεχνολογικών και φυσικών παραγόντων 15

1.3.3. Απαιτήσεις για βελτιστοποίηση και αντοχή σε σφάλματα 16

1.4. ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ 18

1.4.1. Δημιουργία συνεργατικής στρατηγικής για UAVs 18

1.4.2. Ενίσχυση της ανθεκτικότητας σε σφάλματα 19

1.4.3. Ανάπτυξη γεωμετρικής προσέγγισης
για αποφυγή συγκρούσεων 20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ 22

2.1. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	22
2.2 ΔΙΕΘΝΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΡΟΛΗΨΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ	27
2.3 ΜΗ ΕΠΙΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΕΝΑΕΡΙΑ ΟΧΗΜΑΤΑ (UAV) ΚΑΙ ΔΑΣΙΚΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ	30
2.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΦΩΤΟΓΡΑΜΜΕΤΡΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ UAV	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	40
3.1 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΠΛΟΗΓΗΣΗΣ	40
3.1.1 Θεωρητική βάση στη θεωρία γραφημάτων	40
3.1.2 Ανάλυση μοντέλων διπλής ολοκλήρωσης	41
3.1.3 Εφαρμογή της μεθόδου Lyapunov για την εξασφάλιση σταθερότητας	41
3.2 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΑΝΑΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	42
3.2.1 Εφαρμογή του αλγορίθμου Kuhn–Munkres (Hungarian Algorithm)	42
3.2.2 Προσαρμογές για δυναμικές συνθήκες και απώλειες UAVs	43
3.2.3 Διαδικασία ανακατανομής βάσει κόστους	44
3.3 ΑΠΟΦΥΓΗ ΣΥΓΚΡΟΥΣΕΩΝ	45
3.3.1 Εντοπισμός κινδύνων σύγκρουσης μέσω αισθητήρων	45
3.3.2 Σχεδιασμός γεωμετρικής προσέγγισης αποφυγής	46
3.3.3 Αλγόριθμος καθοδήγησης σημείων πορείας	47
3.4 ΕΝΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΩΝ ΣΕ ΣΥΝΕΡΓΑΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	47
3.4.1 Συνδυασμός των αλγορίθμων σε ενιαίο σύστημα	48
3.4.2 Ροή δεδομένων και επικοινωνία μεταξύ UAVs	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 50

4.1 ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ 50

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ 52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 54

5.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ 54

5.2 ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 55

5.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ 60

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ..... 65****ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 68**

Περίληψη

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη στρατηγικών πλοήγησης και αποφυγής συγκρούσεων για σμήνη UAVs σε σύνθετα περιβάλλοντα, με ιδιαίτερη έμφαση στη συνεργατικότητα και την ανθεκτικότητα του συστήματος. Εξετάζονται οι αλγόριθμοι εντοπισμού κινδύνων σύγκρουσης μέσω αισθητήρων, η γεωμετρική προσέγγιση για την αποφυγή συγκρούσεων και η καθοδήγηση σημείων πορείας. Παράλληλα, περιγράφεται η ενσωμάτωση αυτών των στρατηγικών σε ένα ενιαίο σύστημα που βασίζεται στην επικοινωνία και τη ροή δεδομένων μεταξύ UAVs. Επιπλέον, αναλύονται η εφαρμογή του αλγορίθμου Kuhn–Munkres για ανακατανομή εργασιών και οι προσαρμογές του σε δυναμικές συνθήκες, όπως η απώλεια UAVs. Το ολοκληρωμένο σύστημα πλοήγησης προσφέρει αυξημένη αποδοτικότητα, ακρίβεια και ασφάλεια, ενώ παράλληλα προτείνει μεθόδους που ενισχύουν τη δυνατότητα εφαρμογής σε κρίσιμα πεδία, όπως η διαχείριση δασικών πυρκαγιών.

Λέξεις-κλειδιά : UAVs, αποφυγή συγκρούσεων, ανακατανομή εργασιών, συνεργατική πλοήγηση, αλγόριθμος Kuhn–Munkres, γεωμετρική προσέγγιση, διαχείριση δασικών πυρκαγιών.

Abstract

This paper focuses on the development of navigation and collision avoidance strategies for UAV swarms in complex environments, with a particular emphasis on system interoperability and resilience. Sensor-based collision risk detection algorithms, geometric approach for collision avoidance, and waypoint guidance are examined. At the same time, the integration of these strategies into a single system based on communication and data flow between UAVs is described. In addition, the application of the Kuhn–Munkres algorithm for task redistribution and its adaptations to dynamic conditions, such as UAV loss, are analyzed. The integrated navigation system offers increased efficiency, accuracy, and safety, while at the same time proposing methods that enhance the applicability in critical fields, such as forest fire management.

Keywords: UAVs, collision avoidance, task redistribution, collaborative navigation, Kuhn–Munkres algorithm, geometric approach, forest fire management.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Γενική Επισκόπηση

1.1.1. Η σημασία των δασών στη βιωσιμότητα του πλανήτη

Τα δάση καλύπτουν περίπου το 31% της χερσαίας έκτασης του πλανήτη και αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για τη βιωσιμότητα της Γης. Στον πυρήνα της οικολογικής τους σημασίας βρίσκεται η συμβολή τους στην αποθήκευση άνθρακα, στη ρύθμιση του κλίματος και στη διατήρηση της βιοποικιλότητας (Alsammak et al., 2022). Οι δασικές εκτάσεις δρουν ως φυσικοί καταβόθρες άνθρακα, απορροφώντας περίπου το 30% των ετήσιων ανθρωπογενών εκπομπών CO₂. Αυτή η λειτουργία είναι καίρια για τον μετριασμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής.

Επιπλέον, τα δάση προσφέρουν ζωτικής σημασίας υπηρεσίες οικοσυστήματος, όπως η προστασία του εδάφους από τη διάβρωση, η διατήρηση της υδατικής ισορροπίας και η εξασφάλιση φυσικών πόρων, όπως το ξύλο και τα φαρμακευτικά φυτά (Ecke et al., 2022). Ταυτόχρονα, αποτελούν καταφύγιο για το 80% των χερσαίων ειδών της Γης, γεγονός που τα καθιστά αναντικατάστατα στη διατήρηση της παγκόσμιας βιοποικιλότητας (Torresan et al., 2017). Η αλληλεξάρτηση μεταξύ των δασών και του ανθρώπου εκτείνεται πέρα από τα οικολογικά οφέλη. Οι κοινότητες που εξαρτώνται από τα δάση, κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες, βασίζονται σε αυτά για τρόφιμα, ενέργεια και εισόδημα. Συνεπώς, η απώλεια δασών έχει άμεσες κοινωνικοοικονομικές συνέπειες, επιδεινώνοντας την ήδη υπάρχουσα φτώχεια και ανισότητα (Moayedi et al., 2020). Ωστόσο, τα δάση αντιμετωπίζουν αυξανόμενες πιέσεις, καθιστώντας απαραίτητη την κατανόηση του ρόλου τους όχι μόνο ως φυσικών πόρων, αλλά και ως πυλώνων για την επίτευξη βιώσιμης ανάπτυξης.

1.1.2. Προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα δάση στην εποχή της κλιματικής αλλαγής

Η κλιματική αλλαγή επιδεινώνει τις προκλήσεις που αντιμετωπίζουν τα δάση, με πιο εμφανή την αυξημένη συχνότητα και ένταση των δασικών πυρκαγιών. Οι δασικές πυρκαγιές, που συχνά συνδέονται με παρατεταμένες περιόδους ξηρασίας και υψηλές θερμοκρασίες, καταστρέφουν εκατομμύρια εκτάρια δάσους ετησίως, απελευθερώνοντας τεράστιες ποσότητες άνθρακα στην ατμόσφαιρα (Keerthinathan et al., 2023). Η απώλεια δασών λόγω πυρκαγιών δεν είναι απλώς ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα. Συμβάλλει σε έναν φαύλο κύκλο, όπου η καταστροφή των δασών ενισχύει την κλιματική αλλαγή, η οποία, με τη σειρά της, αυξάνει τη συχνότητα και την ένταση των πυρκαγιών (Hocraffer & Nam, 2017). Σύμφωνα με τον Boroujeni et al. (2024), η έλλειψη έγκαιρης ανίχνευσης και διαχείρισης των πυρκαγιών επιδεινώνει την απώλεια δασών και τη σχετική οικολογική ζημιά. Επιπλέον, τα δάση είναι ευάλωτα σε πληθώρα άλλων κινδύνων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή, όπως η διάβρωση του εδάφους, η μείωση της βιοποικιλότητας και οι διαταραχές στις εποχικές βροχοπτώσεις. Η υποβάθμιση των δασών έχει επίσης σημαντικές συνέπειες για τους αυτόχθονες πληθυσμούς που εξαρτώνται από αυτά για την επιβίωσή τους (Sadeghzadeh & Zhang, 2011).

Οι σύγχρονες τεχνολογίες, όπως τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs), παρουσιάζουν λύσεις για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Μέσω της χρήσης προηγμένων αλγορίθμων και αισθητήρων, τα UAVs μπορούν να παρακολουθούν την κατάσταση των δασών σε πραγματικό χρόνο, να ανιχνεύουν πρώιμα σημάδια πυρκαγιών και να διευκολύνουν τη λήψη αποφάσεων για την αποτροπή καταστροφών (Khachumov & Khachumov, 2022).

1.1.3. Η χρήση των UAVs για την προστασία του περιβάλλοντος

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAVs) αποτελούν επαναστατικό εργαλείο για την προστασία και διαχείριση των δασών. Με την ικανότητά τους να πετούν σε δύσβατες περιοχές και να συλλέγουν δεδομένα υψηλής ανάλυσης, τα UAVs ενισχύουν την παρακολούθηση των δασών και την ανίχνευση κινδύνων (Lee et al., 2022). Η ανάπτυξη τεχνολογιών swarm UAVs, δηλαδή ομάδων αεροσκαφών που λειτουργούν συνεργατικά, έχει επιτρέψει την κάλυψη μεγαλύτερων εκτάσεων σε συντομότερο χρόνο, καθιστώντας δυνατή την ταχύτερη αντίδραση σε κρίσιμα περιβαλλοντικά ζητήματα, όπως οι πυρκαγιές (Asaamoning et al., 2021). Στον τομέα της ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών, τα UAVs εξοπλισμένα με θερμικούς αισθητήρες και τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να εντοπίζουν εστίες πυρκαγιών και να παρέχουν κρίσιμες πληροφορίες στα σωστικά συνεργεία. Η χρήση των UAVs στη δασοπυρόσβεση περιλαμβάνει επίσης τη μεταφορά μικρών ποσοτήτων πυροσβεστικού υλικού σε απομονωμένες περιοχές, όπου τα παραδοσιακά μέσα είναι δύσκολο να φτάσουν (Pasek & Kaniewski, 2022).

Η ευελιξία των UAVs δεν περιορίζεται μόνο στην ανίχνευση πυρκαγιών. Οι αισθητήρες που φέρουν επιτρέπουν την εκτίμηση της υγείας των δασών μέσω της παρακολούθησης παραμέτρων, όπως η κάλυψη φυλλώματος, η παρουσία ασθενειών και η υγρασία του εδάφους (Ecke et al., 2022). Σύμφωνα με τον Khan et al. (2022), η δυνατότητα ενσωμάτωσης δικτύων 6G στα UAVs θα ενισχύσει περαιτέρω τις δυνατότητες ανάλυσης και λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Παρά τις δυνατότητές τους, τα UAVs δεν στερούνται προκλήσεων. Θέματα, όπως η αυτονομία πτήσης, οι περιορισμοί φόρτου και η διαχείριση δεδομένων, παραμένουν αντικείμενο έντονης έρευνας (Dybsjor, 2013). Ωστόσο, η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών, όπως τα fault-tolerant συστήματα ελέγχου πτήσης, υπόσχεται να αντιμετωπίσει αυτά τα εμπόδια, καθιστώντας τα UAVs ολοένα και πιο αποτελεσματικά για την προστασία του περιβάλλοντος (Saied et al., 2024).

1.2. Η Κρίση των Δασικών Πυρκαγιών

1.2.1. Στατιστικά στοιχεία και επιπτώσεις δασικών πυρκαγιών στην Ε.Ε.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) αντιμετωπίζει ολοένα και πιο συχνές και έντονες δασικές πυρκαγιές, κυρίως λόγω της κλιματικής αλλαγής και της αλλαγής στη χρήση της γης. Το 2022 σημειώθηκε ρεκόρ καμένων εκτάσεων σε όλη την Ε.Ε., με περισσότερα από 800.000 εκτάρια να καταστρέφονται (Lazzeri et al., 2021). Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφοριών για τις Δασικές Πυρκαγιές (EFFIS), οι χώρες της Νότιας Ευρώπης, όπως η Ισπανία, η Πορτογαλία, η Ελλάδα και η Ιταλία, κατατάσσονται στις πλέον ευάλωτες περιοχές. Αυτή η γεωγραφική διαφοροποίηση εξηγείται από την ένταση των θερμών καλοκαιριών, τις παρατεταμένες ξηρασίες και την άφθονη καύσιμη ύλη που συσσωρεύεται σε πολλά δάση αυτών των περιοχών (Balch & Higuera, 2022).

Η στατιστική ανάλυση των τελευταίων δεκαετιών δείχνει μια ανησυχητική τάση: η αύξηση της συχνότητας των πυρκαγιών συνοδεύεται από μεγαλύτερες εκτάσεις που καταστρέφονται και από υψηλότερο οικονομικό κόστος. Οι ετήσιες απώλειες δασικών εκτάσεων στην Ε.Ε. αγγίζουν το 1% της συνολικής δασικής κάλυψης, γεγονός που μειώνει δραστικά την ικανότητα των δασών να ανακάμψουν φυσικά (Gambella et al., 2016).

Παράλληλα, το οικονομικό κόστος των δασικών πυρκαγιών στην Ε.Ε. ξεπερνά τα 3 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως, περιλαμβάνοντας έξοδα για καταστολή πυρκαγιών, αποκατάσταση ζημιών και απώλεια φυσικών πόρων (Alsammak et al., 2022).

Ένα σημαντικό εύρημα αφορά τη σχέση ανάμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα και τις δασικές πυρκαγιές. Περίπου το 95% των πυρκαγιών στην Ε.Ε. προκαλούνται από ανθρώπινες ενέργειες, είτε ακούσια είτε σκόπιμα, ενώ μόνο το 5% οφείλεται σε φυσικές αιτίες, όπως οι κεραυνοί (Adoni et al., 2023). Επιπλέον, η έλλειψη διαχείρισης των δασών οδηγεί σε αύξηση της συσσώρευσης καύσιμης ύλης, γεγονός που διευκολύνει την εξάπλωση των πυρκαγιών. Η αυξανόμενη ευαισθητοποίηση για την κρίση των δασικών πυρκαγιών οδήγησε στην ενίσχυση των ερευνητικών προσπαθειών σχετικά με τις μεθόδους πρόληψης, ανίχνευσης και καταστολής. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις αποδεικνύονται ανεπαρκείς για την αντιμετώπιση των σύγχρονων προκλήσεων, με την επιστημονική κοινότητα να προτείνει τη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών, όπως τα UAVs, ως μέρος της λύσης (Popescu et al., 2019).

1.2.2. Περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες

Οι δασικές πυρκαγιές προκαλούν δραματικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καταστρέφοντας τη χλωρίδα και την πανίδα, ενώ ταυτόχρονα επιδεινώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Όταν καίγονται μεγάλες δασικές εκτάσεις, απελευθερώνονται τεράστιες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στην ατμόσφαιρα. Για παράδειγμα, οι πυρκαγιές του 2021 στην Ελλάδα απελευθέρωσαν πάνω από 3 εκατομμύρια τόνους CO_2 σε διάστημα λίγων εβδομάδων, ποσότητα που αντιστοιχεί στις ετήσιες εκπομπές μιας μικρής ευρωπαϊκής χώρας (Boroujeni et al., 2024). Επιπλέον, η καταστροφή της βλάστησης οδηγεί σε διάβρωση του εδάφους, απώλεια θρεπτικών ουσιών και αυξημένο κίνδυνο πλημμυρών. Τα δάση που καίγονται απαιτούν δεκαετίες για να ανακάμψουν, ενώ πολλές φορές η φυσική αναγέννηση εμποδίζεται από μεταβολές στο μικροκλίμα, που προκαλούνται από τις πυρκαγιές (Lazzeri et al., 2021).

Η οικονομική διάσταση της κρίσης είναι εξίσου σημαντική. Το άμεσο κόστος περιλαμβάνει τα έξοδα για την καταστολή των πυρκαγιών, την αποκατάσταση των υποδομών και την αναδάσωση. Το έμμεσο κόστος αφορά την απώλεια παραγωγικών πόρων, όπως η ξυλεία, και τη μείωση του τουριστικού ενδιαφέροντος στις περιοχές που πλήττονται (Mehta & Kumar, 2021). Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι οικονομικές ζημιές οδηγούν σε μακροπρόθεσμες επιπτώσεις για τις τοπικές κοινωνίες, με τη μείωση της απασχόλησης και την αποδυνάμωση των τοπικών οικονομιών (Sharma et al., 2021). Οι κοινωνικές συνέπειες είναι πιο δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν, αλλά εξίσου κρίσιμες. Οι δασικές πυρκαγιές συχνά αναγκάζουν χιλιάδες ανθρώπους να εγκαταλείψουν τα σπίτια τους, ενώ η ρύπανση του αέρα που προκαλείται από τον καπνό έχει σοβαρές επιπτώσεις στη δημόσια υγεία. Σύμφωνα με τον Campion et al. (2019), οι εκτεταμένες πυρκαγιές επηρεάζουν αρνητικά την ψυχολογία των κατοίκων των πληγισών περιοχών, προκαλώντας άγχος, κατάθλιψη και φόβο για μελλοντικές καταστροφές.

1.2.3. Παραδοσιακές μέθοδοι αντιμετώπισης και περιορισμοί

Οι παραδοσιακές μέθοδοι αντιμετώπισης δασικών πυρκαγιών βασίζονται κυρίως σε επίγειες δυνάμεις πυρόσβεσης, αεροπορικά μέσα και εθελοντικές ομάδες. Αν και αυτές οι μέθοδοι έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές σε τοπικό επίπεδο, παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς όταν οι πυρκαγιές είναι εκτεταμένες ή βρίσκονται σε δύσβατες περιοχές (Ivanov & Zhukov, 2017). Ένας από τους κύριους περιορισμούς είναι ο χρόνος απόκρισης. Οι πυρκαγιές συχνά ανιχνεύονται αφού έχουν ήδη εξαπλωθεί, γεγονός που καθιστά τον έλεγχό τους πιο δύσκολο. Επίσης, η πρόσβαση σε απομακρυσμένες περιοχές είναι περιορισμένη, καθυστερώντας την επέμβαση (Alsammak et al., 2022). Επιπλέον, οι παραδοσιακές μέθοδοι βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στην ανθρώπινη κρίση, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο λαθών σε καταστάσεις υψηλής πίεσης (Adoni et al., 2023).

Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση UAVs αναδεικνύεται ως μια λύση που μπορεί να αντιμετωπίσει πολλούς από αυτούς τους περιορισμούς. Τα UAVs μπορούν να λειτουργούν ανεξάρτητα ή σε ομάδες (swarms) και να καλύπτουν μεγάλες περιοχές γρήγορα και αποτελεσματικά (Campion et al., 2019). Εξοπλισμένα με θερμικούς αισθητήρες και τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης, τα UAVs ανιχνεύουν πυρκαγιές σε πρώιμα στάδια, προσφέροντας κρίσιμες πληροφορίες στα κέντρα συντονισμού (Pistori et al., 2018). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση UAVs στην Πορτογαλία, όπου συνδυάζονται δεδομένα από δορυφόρους, UAVs και επίγεια μέσα για τη δημιουργία μοντέλων πρόβλεψης εξάπλωσης πυρκαγιών (Lazzeri et al., 2021). Παρά τους τεχνολογικούς περιορισμούς, όπως η αυτονομία μπαταρίας και η περιορισμένη ανθεκτικότητα σε ακραίες καιρικές συνθήκες, οι τεχνολογικές εξελίξεις βελτιώνουν συνεχώς την απόδοση αυτών των συστημάτων (Mehta & Kumar, 2021).

1.3 Διατύπωση Προβλήματος

1.3.1. Προκλήσεις στη χρήση UAVs σε συνεργατικά σμήνη

Η χρήση UAVs σε συνεργατικά σμήνη (swarm systems) έχει προσελκύσει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω των πλεονεκτημάτων που προσφέρει στην περιβαλλοντική διαχείριση, τη δασοπυρόσβεση και την παρακολούθηση φυσικών καταστροφών. Ωστόσο, η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων συνοδεύεται από σοβαρές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την αποτελεσματική εφαρμογή τους. Μία από τις βασικές προκλήσεις αφορά τον συντονισμό και την επικοινωνία μεταξύ των UAVs μέσα σε ένα συνεργατικό σμήνος. Η ανάγκη για σταθερή και χαμηλής καθυστέρησης επικοινωνία είναι κρίσιμη, καθώς οποιαδήποτε διακοπή μπορεί να προκαλέσει σύγχυση ή αποτυχία στην ολοκλήρωση της αποστολής (Adoni et al., 2023). Επιπλέον, τα UAVs που λειτουργούν σε σμήνη απαιτούν αποτελεσματικούς αλγορίθμους για την κατανομή των εργασιών και την αποφυγή συγκρούσεων κατά την πτήση. Η αδυναμία υλοποίησης τέτοιων αλγορίθμων μπορεί να οδηγήσει σε ατυχήματα ή χαμηλή απόδοση (Campion et al., 2019).

Επίσης, η διαχείριση της ενέργειας αποτελεί μια σημαντική πρόκληση για τα συνεργατικά σμήνη. Τα UAVs έχουν περιορισμένη αυτονομία πτήσης λόγω της περιορισμένης χωρητικότητας των μπαταριών τους. Αυτό περιορίζει τη διάρκεια της αποστολής και καθιστά αναγκαίο τον συντονισμό για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης (Lee et al., 2022). Όπως επισημαίνει η έρευνα των Khachumov και Khachumov (2022), η χρήση προηγμένων μοντέλων σχεδιασμού διαδρομών είναι απαραίτητη για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και την επέκταση της λειτουργικής αυτονομίας.

Τέλος, η ανθεκτικότητα των UAVs σε εξωτερικές παρεμβολές, όπως οι φυσικοί παράγοντες (άνεμος, βροχή) και οι σκόπιμες παρεμβολές, αποτελεί ένα ακόμη πεδίο προκλήσεων. Τα UAVs που λειτουργούν σε σμήνη είναι ευάλωτα σε επιθέσεις που μπορούν

να παραβιάσουν τη λειτουργικότητά τους, καθιστώντας αναγκαία την ενσωμάτωση μηχανισμών ανθεκτικότητας (Gambella et al., 2016).

1.3.2. Περιορισμοί λόγω τεχνολογικών και φυσικών παραγόντων

Παρά τις σημαντικές δυνατότητες που προσφέρουν τα UAVs, οι περιορισμοί που προκύπτουν από τεχνολογικούς και φυσικούς παράγοντες μειώνουν τη συνολική τους αποτελεσματικότητα. Ένας από τους σημαντικότερους τεχνολογικούς περιορισμούς είναι η περιορισμένη χωρητικότητα επεξεργασίας και αποθήκευσης δεδομένων. Τα UAVs που συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο απαιτούν ισχυρούς υπολογιστικούς πόρους για την επεξεργασία μεγάλου όγκου πληροφοριών, κάτι που συχνά δεν είναι εφικτό με τις τρέχουσες τεχνολογίες (Alsammak et al., 2022). Επιπλέον, η εξάρτηση από δίκτυα επικοινωνίας υψηλής ταχύτητας, όπως τα 5G και 6G, δημιουργεί πρόσθετους περιορισμούς, ειδικά σε απομακρυσμένες περιοχές με χαμηλή κάλυψη δικτύου (Khan et al., 2022). Η αστάθεια αυτών των δικτύων μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια δεδομένων ή διακοπή της επικοινωνίας μεταξύ των UAVs και του κεντρικού συστήματος ελέγχου, μειώνοντας έτσι την αποδοτικότητα των αποστολών.

Οι φυσικοί παράγοντες, όπως οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες, επηρεάζουν σημαντικά την πτητική ικανότητα των UAVs. Ο ισχυρός άνεμος, η βροχή και η έντονη ηλιοφάνεια μπορεί να βλάψουν τους αισθητήρες ή να μειώσουν την ακρίβεια των δεδομένων που συλλέγονται. Επιπλέον, το γεωγραφικό ανάγλυφο, όπως τα βουνά ή οι δασώδεις εκτάσεις με πυκνή βλάστηση, μπορεί να περιορίσει τη δυνατότητα των UAVs να πλοηγηθούν ή να παρακολουθήσουν συγκεκριμένους στόχους (Pistori et al., 2018).

Η ανεπάρκεια ενεργειακών αποθεμάτων αποτελεί έναν ακόμη κρίσιμο περιορισμό. Όπως σημειώνουν οι Asaamoning et al. (2021), τα UAVs χρειάζονται συνεχείς

ανατροφοδοτήσεις ενέργειας, ενώ οι προσπάθειες ανάπτυξης αποδοτικότερων μπαταριών έχουν προχωρήσει με βραδύ ρυθμό. Ως αποτέλεσμα, οι αποστολές που απαιτούν μεγάλη διάρκεια πτήσης είναι συχνά αδύνατες χωρίς διακοπές για φόρτιση ή αντικατάσταση μπαταριών. Τέλος, οι περιορισμοί στους αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τη συλλογή δεδομένων είναι εμφανείς σε περιπτώσεις χαμηλής ορατότητας ή πυκνού καπνού. Σύμφωνα με τους Lazzeri et al. (2021), οι αισθητήρες θερμοικής απεικόνισης έχουν δυσκολίες στην ακριβή ανίχνευση πυρκαγιών σε περιοχές με υψηλή θερμοκή διακύμανση, μειώνοντας την ακρίβεια των δεδομένων.

1.3.3. Απαιτήσεις για βελτιστοποίηση και αντοχή σε σφάλματα

Η αποτελεσματική εφαρμογή των UAVs απαιτεί τη συνεχή βελτιστοποίηση των συστημάτων και των τεχνολογιών που ενσωματώνουν. Η αντοχή σε σφάλματα (fault tolerance) αποτελεί μία από τις σημαντικότερες απαιτήσεις για την ανάπτυξη προηγμένων συνεργατικών σμηνών. Σύμφωνα με τον Saied et al. (2024), η ανάπτυξη αλγορίθμων που επιτρέπουν την προσαρμογή των UAVs σε περιπτώσεις αποτυχίας ενός ή περισσότερων μονάδων είναι απαραίτητη για την επίτευξη αξιόπιστης λειτουργίας. Η βελτιστοποίηση των αλγορίθμων πλοήγησης και σχεδιασμού διαδρομών παίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και της απόδοσης των αποστολών. Οι Khachumov και Khachumov (2022) προτείνουν τη χρήση μοντέλων μη γραμμικού προγραμματισμού που λαμβάνουν υπόψη παράγοντες, όπως η ταχύτητα του ανέμου και η κατανάλωση ενέργειας, για τη βελτίωση της ακρίβειας και της απόδοσης του σμήνους.

Επιπλέον, οι τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης (AI) είναι καίριες για τη βελτίωση της συνεργασίας και της λήψης αποφάσεων εντός του σμήνους. Η χρήση μηχανικής μάθησης

(machine learning) επιτρέπει στα UAVs να προσαρμόζονται σε δυναμικές συνθήκες, να εντοπίζουν ανωμαλίες και να βελτιστοποιούν τη λειτουργία τους σε πραγματικό χρόνο (Pasek & Kaniewski, 2022). Για παράδειγμα, η εφαρμογή ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) επιτρέπει στα UAVs να μαθαίνουν πώς να συνεργάζονται αποτελεσματικά, ακόμη και σε περιβάλλοντα με υψηλή αβεβαιότητα (Hocraffer & Nam, 2017).

Η ανοχή σε σφάλματα περιλαμβάνει επίσης την προστασία από κυβερνοεπιθέσεις και παρεμβολές. Τα UAVs είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε επιθέσεις που στοχεύουν την επικοινωνία και τα δεδομένα τους. Σύμφωνα με τους Mehta και Kumar (2021), η εφαρμογή ασφαλών πρωτοκόλλων επικοινωνίας και η χρήση κρυπτογράφησης αποτελούν βασικές προτεραιότητες για την προστασία των συστημάτων από κακόβουλες ενέργειες. Τέλος, η βελτιστοποίηση της ενσωμάτωσης δεδομένων από πολλαπλές πηγές, όπως δορυφορικά δεδομένα και δεδομένα εδάφους, μπορεί να αυξήσει την ακρίβεια και την αποδοτικότητα των UAVs. Η συνεργασία μεταξύ διαφόρων πλατφορμών παρακολούθησης είναι κρίσιμη για την αντιμετώπιση περίπλοκων προβλημάτων, όπως η πρόληψη και η καταστολή δασικών πυρκαγιών (Lazzeri et al., 2021).

1.4. Σκοπός και Στόχοι της Εργασίας

1.4.1. Δημιουργία συνεργατικής στρατηγικής για UAVs

Ένας από τους πρωταρχικούς σκοπούς της μελέτης είναι η ανάπτυξη συνεργατικών στρατηγικών πλοήγησης για UAVs, προκειμένου να διασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία τους σε συνθήκες παρακολούθησης δασικών πυρκαγιών. Τα UAVs, όταν λειτουργούν ως σμήνη, απαιτούν έναν συντονισμένο και συνεργατικό μηχανισμό, ώστε να καλύπτουν μεγάλες γεωγραφικές περιοχές, να ανιχνεύουν εστίες πυρκαγιάς και να ανταλλάσσουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (Adoni et al., 2023). Η συνεργατική στρατηγική βασίζεται στη χρήση αλγορίθμων που επιτρέπουν την κατανομή των καθηκόντων μεταξύ των UAVs, διασφαλίζοντας ότι κάθε μονάδα καλύπτει ένα συγκεκριμένο μέρος της περιοχής ενδιαφέροντος. Αυτό όχι μόνο μειώνει την πιθανότητα επικάλυψης αλλά και μεγιστοποιεί την αποτελεσματικότητα της αποστολής. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, συστήματα swarm έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτικά στην ανίχνευση πολλαπλών στόχων σε δυναμικές συνθήκες, όπως είναι οι δασικές πυρκαγιές (Campion et al., 2019; Asaamoning et al., 2021).

Η στρατηγική αυτή ενσωματώνει επίσης τη χρήση προσαρμοστικών δικτύων επικοινωνίας, όπως αυτά που βασίζονται σε τεχνολογίες 6G. Τα δίκτυα αυτά επιτρέπουν τη γρήγορη και αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των UAVs, ακόμη και σε περιοχές με χαμηλή υποδομή επικοινωνίας (Khan et al., 2022). Για παράδειγμα, οι Khachumov και Khachumov (2022) παρουσίασαν μοντέλα βελτιστοποίησης διαδρομών που λαμβάνουν υπόψη τόσο την επικοινωνία όσο και την κατανάλωση ενέργειας, επιτυγχάνοντας βελτιωμένη απόδοση στα σμήνη. Επιπρόσθετα, η στρατηγική συνεργασίας περιλαμβάνει τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης (AI) για τη δυναμική προσαρμογή της λειτουργίας των UAVs. Με αλγόριθμους ενισχυτικής μάθησης, τα UAVs μπορούν να προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους σε πραγματικό χρόνο, ανταποκρινόμενα σε αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες ή στις απαιτήσεις της αποστολής (Mehta & Kumar, 2021).

1.4.2. Ενίσχυση της ανθεκτικότητας σε σφάλματα

Η ανθεκτικότητα σε σφάλματα αποτελεί κρίσιμο στόχο για τη λειτουργία των UAVs σε δασικές πυρκαγιές, όπου οι ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες και οι πιέσεις χρόνου απαιτούν υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας. Στα συνεργατικά σμήνη, η αποτυχία ενός ή περισσότερων UAVs μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα ολόκληρης της αποστολής. Ως εκ τούτου, η παρούσα μελέτη στοχεύει στην ανάπτυξη συστημάτων πλοήγησης με ανοχή σε σφάλματα (fault-tolerant systems) (Saied et al., 2024). Η ανοχή σε σφάλματα επιτυγχάνεται μέσω αλγορίθμων που επιτρέπουν στα UAVs να αναπροσαρμόζουν τη λειτουργία τους όταν ανιχνεύονται αποτυχίες. Για παράδειγμα, εάν ένα UAV αποτύχει λόγω μηχανικού προβλήματος ή χαμηλής μπαταρίας, τα υπόλοιπα UAVs του σμήνους μπορούν να αναλάβουν τα καθήκοντά του, εξασφαλίζοντας τη συνέχιση της αποστολής (Hocraffer & Nam, 2017). Οι Pasek και Kaniewski (2022) υπογραμμίζουν τη σημασία της χρήσης κατανεμημένων συστημάτων λήψης αποφάσεων, τα οποία ενισχύουν την ανθεκτικότητα των UAVs σε τέτοιες περιπτώσεις.

Η ανθεκτικότητα σε σφάλματα περιλαμβάνει επίσης την προστασία από εξωτερικές παρεμβολές, όπως οι κυβερνοεπιθέσεις ή οι παρεμβολές σήματος. Σύμφωνα με τους Adoni et al. (2023), η χρήση ασφαλών πρωτοκόλλων επικοινωνίας και τεχνικών κρυπτογράφησης είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της λειτουργίας των UAVs σε περιβάλλοντα υψηλής επικινδυνότητας. Παράλληλα, η ενίσχυση της ανθεκτικότητας περιλαμβάνει την ανάπτυξη συστημάτων πρόβλεψης αποτυχιών, τα οποία χρησιμοποιούν δεδομένα από αισθητήρες για την ανίχνευση πιθανών προβλημάτων πριν αυτά επηρεάσουν τη λειτουργία. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν τη λήψη προληπτικών μέτρων, όπως η προσαρμογή της πτήσης ή η αλλαγή του σχεδίου της αποστολής, βελτιώνοντας τη συνολική αξιοπιστία του σμήνους (Saied et al., 2024).

1.4.3. Ανάπτυξη γεωμετρικής προσέγγισης για αποφυγή συγκρούσεων

Η αποφυγή συγκρούσεων αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη λειτουργία σημικών UAVs, ιδίως σε δυναμικά περιβάλλοντα, όπως οι δασικές πυρκαγιές. Η ανάπτυξη γεωμετρικών προσεγγίσεων που επιτρέπουν στα UAVs να πλοηγούνται με ασφάλεια είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της αποδοτικότητας και της ασφάλειας των αποστολών. Μια γεωμετρική προσέγγιση βασίζεται στη χρήση αλγορίθμων που λαμβάνουν υπόψη τη θέση, την ταχύτητα και την κατεύθυνση των UAVs για τον υπολογισμό ασφαλών διαδρομών. Οι Khachumov και Khachumov (2022) προτείνουν τη χρήση μοντέλων που βασίζονται στη θεωρία των πολυγώνων Voronoi, τα οποία επιτρέπουν την κατανομή του εναέριου χώρου σε ζώνες ευθύνης για κάθε UAV, μειώνοντας τον κίνδυνο συγκρούσεων.

Επιπλέον, η χρήση αισθητήρων υψηλής ακρίβειας, όπως οι LiDAR και οι κάμερες θερμικής απεικόνισης, επιτρέπει στα UAVs να ανιχνεύουν εμπόδια σε πραγματικό χρόνο και να προσαρμόζουν τις διαδρομές τους ανάλογα. Οι Pistori et al. (2018) σημειώνουν ότι οι αισθητήρες αυτοί, σε συνδυασμό με αλγορίθμους μηχανικής μάθησης, μπορούν να βελτιώσουν την ακρίβεια της αποφυγής εμποδίων, ακόμη και σε περιβάλλοντα με πυκνό καπνό ή χαμηλή ορατότητα. Παράλληλα, η γεωμετρική προσέγγιση ενσωματώνει δυναμικά μοντέλα πτήσης που λαμβάνουν υπόψη τις περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως ο άνεμος και η θερμοκρασία. Αυτά τα μοντέλα επιτρέπουν στα UAVs να διατηρούν ασφαλείς αποστάσεις μεταξύ τους και να προσαρμόζουν τις κινήσεις τους με βάση τις απαιτήσεις της αποστολής (Lee et al., 2022).

Η εφαρμογή αυτών των προσεγγίσεων απαιτεί την ενσωμάτωση κατανεμημένων συστημάτων λήψης αποφάσεων, τα οποία διασφαλίζουν ότι κάθε UAV μπορεί να λαμβάνει αποφάσεις ανεξάρτητα, χωρίς να επηρεάζεται από τις καθυστερήσεις στην επικοινωνία με το κεντρικό σύστημα ελέγχου (Mehta & Kumar, 2021). Αυτή η αυτονομία είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική λειτουργία των UAVs σε περιβάλλοντα υψηλής αβεβαιότητας.

Η παρούσα μελέτη στοχεύει στη βελτίωση της αποδοτικότητας και της ανθεκτικότητας των σμηνών UAVs για την παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών, ενσωματώνοντας συνεργατικές στρατηγικές, ανθεκτικά σε σφάλματα συστήματα και γεωμετρικές προσεγγίσεις αποφυγής συγκρούσεων. Οι στόχοι αυτοί ανταποκρίνονται στις ανάγκες για καινοτόμες λύσεις στη διαχείριση των φυσικών καταστροφών, παρέχοντας ένα πλαίσιο για την ανάπτυξη τεχνολογιών αιχμής που μπορούν να εφαρμοστούν σε διάφορους τομείς περιβαλλοντικής προστασίας.

.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1. Συστήματα Πρόληψης και Διαχείρισης δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα

Με τα χρόνια έχει αναπτυχθεί μια σειρά προηγμένων τεχνολογιών για τον εντοπισμό και τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα. Αυτές οι εξελίξεις βασίζονται στην ενοποίηση εξελιγμένων υποδομών επικοινωνίας, τεχνολογικών συστημάτων αιχμής και στην εξειδικευμένη τεχνογνωσία του ανθρώπινου δυναμικού. Ένας βασικός τομέας καινοτομίας ήταν η ανάπτυξη συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) που διευκολύνουν την καταγραφή, διαχείριση, ανάλυση και χαρτογράφηση γεωχωρικών δεδομένων. Αυτά τα συστήματα διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη βελτίωση των διαδικασιών λήψης αποφάσεων που σχετίζονται με τις προσπάθειες πρόληψης και καταστολής των δασικών πυρκαγιών.

Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι το σύστημα Sithon, το οποίο σχεδιάστηκε ειδικά για την ελληνική επικράτεια. Αυτό το σύστημα στοχεύει να βελτιώσει τις μεθόδους για την παρακολούθηση της εξέλιξης των δασικών πυρκαγιών και τη μείωση του χρόνου απόκρισης κατά τη διάρκεια των προσπαθειών διαχείρισης. Δημιουργεί επίσης μια κεντρική βάση δεδομένων προσβάσιμη σε όλους τους σχετικούς ενδιαφερόμενους φορείς, επιτρέποντας συντονισμένες ενέργειες για την πρόληψη και την καταστολή πυρκαγιών (Christodoulou et al., 2007). Στο πλαίσιο αυτής της πρωτοβουλίας, έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο επίγειες όσο και εναέριες τεχνολογίες τηλεπισκόπησης, διασφαλίζοντας ότι οι μεθοδολογίες είναι προσαρμοσμένες στις μοναδικές περιβαλλοντικές συνθήκες της Ελλάδας. Το σύστημα αξιολογεί περαιτέρω τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και τη λειτουργική του απόδοση σε σχέση με τα παραδοσιακά δίκτυα πυροσβεστικών σταθμών, με απώτερο στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου απόκρισης για τις επεμβάσεις των πυροσβεστικών οχημάτων (Christodoulou et al., 2007).

Για την υποστήριξη αυτών των στόχων, το πρόγραμμα Sithon περιλαμβάνει αξιολογήσεις εύφλεκτων υλικών και κινδύνου πυρκαγιάς σε καθορισμένες περιοχές. Αυτά τα κρίσιμα δεδομένα στηρίζουν τον στρατηγικό σχεδιασμό των δραστηριοτήτων πρόληψης και διαχείρισης πυρκαγιών. Ένα δίκτυο ασύρματων κάμερών εγκαταστάθηκε στη Σιθωνία, τοποθετημένο στρατηγικά σε βασικά σημεία παρατήρησης. Αυτές οι κάμερες παρακολουθούν συνεχώς την περιοχή και μεταδίδουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο στο συντονιστικό κέντρο του προγράμματος, διασφαλίζοντας ταχεία επίγνωση της κατάστασης (Χριστοδούλου κ.ά., 2007).

Μια άλλη σημαντική πρωτοβουλία στην Ελλάδα είναι το σύστημα G-FMIS, το οποίο έχει αναπτυχθεί σε περιοχές όπως ο Όλυμπος, η Χίος και άλλες δασικές περιοχές υψηλού κινδύνου. Αυτό το σύστημα δίνει έμφαση στην πρόβλεψη δασικών πυρκαγιών και εμπλέκει διάφορους τοπικούς οργανισμούς στο επιχειρησιακό του πλαίσιο. Ιδιαίτερα στη Χίο, με το απαιτητικό έδαφος και τα απομακρυσμένα τοπία της, το σύστημα G-FMIS έχει γίνει προτεραιότητα για τη διαχείριση πυρκαγιών. Έχει επίσης εφαρμοστεί στο Νότιο Αιγαίο, την Κρήτη και άλλες δασικές περιοχές, αποδεικνύοντας την προσαρμοστικότητά του σε διαφορετικές γεωγραφικές και περιβαλλοντικές συνθήκες (Kochilakis et al., 2016).

Ομοίως, το σύστημα InfoFire αντιπροσωπεύει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την πρόληψη, τη διαχείριση και τον έλεγχο των δασικών πυρκαγιών. Αρχικά εφαρμόστηκε στο όρος Βόρας, το σύστημα αυτό υποβλήθηκε σε πέντε φάσεις ανάπτυξης, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας ορθοφωτογραφικών χαρτών, της ψηφιοποίησης των χαρτογραφικών δεδομένων, της δημιουργίας υποδομής GIS, της διαμόρφωσης μετεωρολογικών σταθμών και της εκπαίδευσης του προσωπικού. Ξεκίνησαν επίσης πρωτοβουλίες ευαισθητοποίησης του κοινού και μια διαδικτυακή πύλη για την υποστήριξη των ευρύτερων στόχων του συστήματος (Infodim.gr, 2023).

Μεταγενέστερες εγκαταστάσεις του συστήματος InfoFire πραγματοποιήθηκαν στην Κρήτη, καλύπτοντας κρίσιμες περιοχές όπως το φαράγγι της Σαμαριάς και το φοινικόδασος της Πρέβελης, αξιοποιώντας ασύρματα δίκτυα για τη μετάδοση δεδομένων υψηλής ταχύτητας και τη σύνδεση κέντρων διαχείρισης κρίσεων με τεχνολογίες επιτόπιας παρακολούθησης (Infodim.gr, 2023).

Αυτά τα παραδείγματα υπογραμμίζουν τον κρίσιμο ρόλο προηγμένων συστημάτων όπως το Sithon, το G-FMIS και το InfoFire στην ενίσχυση της ικανότητας της Ελλάδας για πρόληψη και διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Συνδυάζοντας εργαλεία σχεδιασμού που βασίζονται σε GIS, συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και ολοκληρωμένα δίκτυα επικοινωνίας, αυτά τα συστήματα προσφέρουν αποτελεσματικές λύσεις προσαρμοσμένες στις μοναδικές προκλήσεις του ελληνικού τοπίου.

Η αρχιτεκτονική των σύγχρονων συστημάτων πρόληψης και διαχείρισης δασικών πυρκαγιών ενσωματώνει εξελιγμένες υπολογιστικές τεχνικές για τη βελτίωση της ταχύτητας και της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας. Μεταξύ αυτών, χρησιμοποιούνται υπολογιστικές μεθοδολογίες cloud computing και υψηλής απόδοσης για να διασφαλιστεί η ταχεία και ακριβής ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων. Αυτά τα συστήματα παρέχουν ανοιχτή πρόσβαση δεδομένων σε εξουσιοδοτημένους χρήστες, διευκολύνοντας τις τακτικές ενημερώσεις και τη συνεχή ανάπτυξη. Βασικό χαρακτηριστικό είναι η απεριόριστη πρόσβαση που παρέχεται στις Δασικές Πυροσβεστικές Υπηρεσίες και στις Αρχές Πολιτικής Προστασίας, δίνοντάς τους τη δυνατότητα να λαμβάνουν έγκαιρες και καλά ενημερωμένες αποφάσεις για τον μετριασμό των κινδύνων πυρκαγιάς (Kalampokidis et al., 2014).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το σύστημα Firetactic, που αναπτύχθηκε για τη Νομαρχιακή Αυτοδιοίκηση Κορινθίας. Πρωταρχικός στόχος της ήταν η παροχή εξειδικευμένων υπηρεσιών και χωρικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης, παρέχοντας κρίσιμη υποστήριξη στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων που είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση του κινδύνου πυρκαγιάς.

Ως μέρος αυτού του προγράμματος, πραγματοποιήθηκαν εκτενείς εναέριες έρευνες σε συνεργασία με τη Map Ltd. και την Blom Aerofilms Ltd. Χρησιμοποιώντας μια προηγμένη φωτογραμμετρική εναέρια κάμερα (Vexcel UltraCam-D), καταγράφηκαν πάνω από 4.100 εικόνες υψηλής ανάλυσης. Αυτές συμπληρώθηκαν με μετρήσεις GPS/IMU, διασφαλίζοντας ακριβή γεωεντοπισμό. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν πληρούσαν αυστηρά πρότυπα ακρίβειας με μειωμένο αριθμό φωτοσταθέων, εκσυγχρονίζοντας έτσι τις ροές εργασιών παραγωγής και ελαχιστοποιώντας τις απαιτήσεις επιτόπιας εργασίας. Αυτή η αποτελεσματικότητα συνέβαλε σημαντικά στη συνολική αποτελεσματικότητα του συστήματος (Ifanti, 2015). Ο πρωταρχικός στόχος του έργου ήταν να δημιουργηθεί ένα ισχυρό πλαίσιο για την πρόληψη και διαχείριση κινδύνου δασικών πυρκαγιών, αξιοποιώντας εξοπλισμό αιχμής και εξειδικευμένες υπηρεσίες. Με την ενσωμάτωση της υποδομής πληροφορικής και των γεωχωρικών αναλύσεων, το Firetactic επέτρεψε στις τοπικές αρχές να βελτιώσουν την ετοιμότητά τους και την ανταπόκρισή τους σε απειλές από πυρκαγιές.

Μια άλλη καινοτόμος λύση είναι το σύστημα ARCFIRE, ειδικά σχεδιασμένο για το ελληνικό τοπίο. Αυτό το σύστημα συνδυάζει μεθοδολογίες αξιολόγησης κινδύνου, μετεωρολογικά δεδομένα, γεωπληροφορική και ανάλυση καυσίμων για να παρέχει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη διαχείριση πυρκαγιάς. Χρησιμοποιεί πολυπαραμετρικά μοντέλα για την προσομοίωση των ιδιοτήτων του καυσίμου, χρησιμοποιώντας τη λεπτότητα και την καύση ως βασικούς δείκτες. Αυτά τα μοντέλα κατασκευάζονται με χρήση τηλεπισκόπησης και επιτόπιων ερευνών, επιτρέποντας ενημερώσεις και προσαρμογή σε πραγματικό χρόνο. Το σύστημα κατηγοριοποιεί τα καύσιμα μέσω τεχνικών καταλογογράφησης, διευκολύνοντας τη δημιουργία εξαιρετικά λεπτομερών και ακριβών απογραφών προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένες γεωγραφικές περιοχές (Ifanti, 2015). Το ARCFIRE αξιολογεί τον κίνδυνο πυρκαγιάς αναλύοντας τρεις κρίσιμους παράγοντες: την πιθανότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς, την πιθανή ένταση της πυρκαγιάς και τον προβλεπόμενο αντίκτυπο της στη βιώσιμη ανάπτυξη. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας προηγμένα εργαλεία χωρικής επεξεργασίας, δυνατότητες GIS και στατιστική μοντελοποίηση.

Το σύστημα ενσωματώνει δίκτυα μετεωρολογικών και οπτικών αισθητήρων για την έγκαιρη ανίχνευση απειλών πυρκαγιάς. Ανάλογα με την κλίμακα και το επίπεδο κινδύνου μιας περιοχής, το ARCFIRE χρησιμοποιεί είτε ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (WSN) για μικρότερες ζώνες υψηλού κινδύνου είτε επίγεια δίκτυα απεικόνισης για μεγαλύτερες περιοχές. Επιπλέον, συνεργάζεται με υπηρεσίες μετεωρολογικής πρόβλεψης για τη συλλογή χρονικών και χωρικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης, ενισχύοντας περαιτέρω την προγνωστική του ακρίβεια (Ifanti, 2015).

Το σύστημα ARCFIRE ενσωματώνει επίσης εξελιγμένες μεθοδολογίες προσομοίωσης που βασίζονται στο μοντέλο συμπεριφοράς πυρκαγιάς του Rothermel (Andrews, 2012) και στις εξισώσεις εξάπλωσης πυρκαγιάς BEHAVE (Andrews, 2003). Αυτοί οι επαναληπτικοί αλγόριθμοι επιτρέπουν ακριβείς προσομοιώσεις της εξέλιξης της πυρκαγιάς, επιτρέποντας στις αρχές να σχεδιάζουν στρατηγικές επέμβασης πιο αποτελεσματικά. Η υποκείμενη υποδομή δεδομένων βασίζεται σε ασύρματα επίγεια και δορυφορικά δίκτυα, με γεωχωρικά δεδομένα οργανωμένα σε βάσεις γεωγραφικών δεδομένων που βασίζονται στο ESRI για απρόσκοπτη πρόσβαση και ανάλυση.

Μια συμπληρωματική τεχνολογία που συζητείται είναι το σύστημα LIDAR, το οποίο, αν και βρίσκεται ακόμη σε πιλοτικές φάσεις στην Ελλάδα λόγω του υψηλού κόστους του, έχει δείξει σημαντικές δυνατότητες διεθνώς. Το LIDAR συνδυάζει έναν πομπό λέιζερ και ένα τηλεσκόπιο για τη σάρωση της ατμόσφαιρας, με ακτίνες λέιζερ να διεισδύουν έως και 30 χιλιόμετρα στη στρατόσφαιρα. Το ανακλώμενο φως από τα σωματίδια της ατμόσφαιρας, όπως ο καπνός, συλλαμβάνεται από το τηλεσκόπιο και αναλύεται χρησιμοποιώντας φωτοανιχνευτές. Αυτό επιτρέπει στο σύστημα να εντοπίζει πρώιμα σημάδια καπνού και να παρέχει προειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο για την ανάπτυξη πυρκαγιάς. Οι δυνατότητες τρισδιάστατης χαρτογράφησης του LIDAR επιτρέπουν περαιτέρω ακριβή εντοπισμό πυρκαγιών, προσφέροντας απaráμιλλη ακρίβεια στον προσδιορισμό των συντεταγμένων τους (Moran, Kane, & Seielstad, 2020).

Αυτά τα προηγμένα συστήματα αποτελούν παράδειγμα της ενσωμάτωσης της σύγχρονης τεχνολογίας με την περιβαλλοντική διαχείριση, επιδεικνύοντας τις δυνατότητες λύσεων που βασίζονται σε δεδομένα για τον μετριασμό της κλιμακούμενης απειλής των δασικών πυρκαγιών. Αξιοποιώντας καινοτομίες όπως το ARCFIRE, το Firetactic και το LIDAR, η Ελλάδα κάνει σημαντικά βήματα στην πρόληψη και τον έλεγχο των δασικών πυρκαγιών, προσαρμόζοντας αυτές τις τεχνολογίες στο μοναδικό γεωγραφικό της περιβάλλον.

2.2 Διεθνή συστήματα πρόληψης και διαχείρισης δασικών πυρκαγιών

Οι στατιστικές αναλύσεις δείχνουν ότι πάνω από 10.000 τετραγωνικά χιλιόμετρα βλάστησης χάνονται ετησίως από δασικές πυρκαγιές σε όλη την Ευρώπη. Αυτό το ανησυχητικό στοιχείο υπογραμμίζει την ανάγκη για προηγμένα συστήματα πρόληψης και διαχείρισης. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι εξίσου ανησυχητικές, με τις δασικές πυρκαγιές να συμβάλλουν σε αύξηση 20% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόσει διεθνώς διάφορα συστήματα ανίχνευσης και διαχείρισης δασικών πυρκαγιών.

Σύστημα IFFED (Κροατία)

Το σύστημα IFFED είναι μια πλήρως αυτοματοποιημένη λύση ανίχνευσης και διαχείρισης δασικών πυρκαγιών, σε λειτουργία 24 ώρες το 24ωρο. Περιλαμβάνει πολλαπλά σημεία παρατήρησης κατανεμημένα στρατηγικά εντός της περιοχής ενδιαφέροντος, όλα συνδεδεμένα με μια κεντρική εγκατάσταση ελέγχου (Kolaric, Skala, & Dubravic, 2008). Κάθε σημείο παρατήρησης περιλαμβάνει πύργους εξοπλισμένους με προηγμένους αισθητήρες, μετεωρολογικά όργανα και συστήματα μετάδοσης δεδομένων. Αυτοί οι πύργοι χρησιμοποιούν υπέρυθρες και οπτικές κάμερες με δυνατότητες υψηλής ανάλυσης, καλύπτοντας εκτεταμένες περιοχές με ενσωματωμένα εργαλεία γεωεντοπισμού.

Τα δεδομένα που συλλέγονται, που διαβιβάζονται σε μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας, υποβάλλονται σε επαλήθευση για την επικύρωση της παρουσίας πυρκαγιάς. Μόλις επιβεβαιωθούν, δημιουργούνται θεματικοί χάρτες και προσομοιώσεις κινδύνου χρησιμοποιώντας Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS), επιτρέποντας στις αρχές να σχεδιάζουν αποτελεσματικά μέτρα καταστολής πυρκαγιάς. Το σύστημα IFFED χρησιμοποιείται επί του παρόντος σε όλη την Κροατία, αποδεικνύοντας τη χρησιμότητά του στη διαχείριση πυρκαγιών μεγάλης κλίμακας (Europa.eu, 2015).

Σύστημα EYEfi (Αυστραλία)

Αναπτύχθηκε το 2009, το σύστημα EYEfi χρησιμεύει ως πιλοτικό εργαλείο για τον εντοπισμό, την παρακολούθηση και τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Η βασική του λειτουργικότητα περιστρέφεται γύρω από την πλατφόρμα EYEfi Navigator, μια διεπαφή πλοήγησης που βασίζεται στο web που επιτρέπει στους χρήστες να ελέγχουν τις κάμερες του συστήματος, να παρακολουθούν την περιοχή και να λαμβάνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο από ενσωματωμένους αισθητήρες. Οι χρήστες μπορούν επίσης να μεταδώσουν ακριβείς συντεταγμένες των σημείων ανάφλεξης για γρήγορη απόκριση (Heywood, 2018). Η ικανότητα του συστήματος να μετριάσει τις αρνητικές επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών το έχει καταστήσει πολύτιμο πλεονέκτημα, ιδιαίτερα στην Αυστραλία, όπου χρησιμοποιείται ευρέως.

Σύστημα IQ FireWatch (Γερμανία)

Το σύστημα IQ FireWatch χρησιμοποιείται ευρέως σε χώρες όπως η Γερμανία, η Κύπρος και η Τσεχική Δημοκρατία, με τη Γερμανία να είναι ο κύριος προγραμματιστής και υλοποιητής του. Κατά τη διάρκεια μιας δεκαετίας ανάπτυξης, το σύστημα πέτυχε μείωση 80-90% στις απώλειες δασικών εκτάσεων λόγω πυρκαγιών (byteKultur GmbH, 2017).

Μόνο στη Γερμανία, 178 σημεία παρατήρησης και 22 κέντρα ελέγχου αποτελούν ένα ολοκληρωμένο δίκτυο ανίχνευσης πυρκαγιάς. Το σύστημα χρησιμοποιεί προηγμένους οπτικούς αισθητήρες με δυνατότητα περιστροφής 360 μοιρών, ασύρματη συνδεσιμότητα και κεντρικό διανομέα ελέγχου. Τα δεδομένα που συλλέγονται από το σύστημα υποβάλλονται σε επεξεργασία για τον εντοπισμό καπνού και την ανίχνευση ανάφλεξης πυρκαγιάς, ενεργοποιώντας άμεσους συναγερμούς για γρήγορη δράση (Chowdary et al., 2018). Η επιτυχία του υπογραμμίζει την αποτελεσματικότητα της ενσωμάτωσης οπτικών αισθητήρων και της επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για τη μείωση των ζημιών που σχετίζονται με τη φωτιά.

Σύστημα FIREHAWK (Νότια Αφρική)

Αναπτύχθηκε αρχικά το 1994, το σύστημα FIREHAWK είχε ως στόχο να αντικαταστήσει τις παραδοσιακές επανδρωμένες μεθόδους πυρανίχνευσης με προηγμένες τεχνολογικές λύσεις. Χρησιμοποιώντας ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές υψηλής ανάλυσης με δυνατότητα περιστροφής 360 μοιρών, το FIREHAWK καλύπτει εκτεταμένες περιοχές και μεταδίδει δεδομένα σε κεντρικές μονάδες επεξεργασίας. Το σύστημα διακρίνει μεταξύ των σημάτων καπνού και πυρκαγιάς, επιτρέποντας την ακριβή παραγωγή συναγερμού (Hausheer, 2018). Με οκτώ κεντρικούς πύργους που βρίσκονται σε απομακρυσμένες περιοχές, το FIREHAWK διασφαλίζει ολοκληρωμένη επιτήρηση διατηρώντας παράλληλα τη συνδεσιμότητα με ένα μεγάλο δίκτυο επεξεργαστών για βελτιωμένες δυνατότητες λήψης αποφάσεων.

AlarmEye System (Ταϊλάνδη)

Σχεδιασμένο για περιοχές όπως η Ταϊλάνδη, όπου η ξηρή περίοδος (Δεκέμβριος έως Μάιος) αυξάνει σημαντικά τους κινδύνους πυρκαγιάς, το σύστημα AlarmEye ενσωματώνει προηγμένους αισθητήρες υπερύθρων για ανίχνευση πυρκαγιάς και καπνού.

Αυτή η τεχνολογία είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική στον εντοπισμό διαφανών φλόγων κατά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης πυρκαγιάς (Ahmad, 2014). Επιπλέον, το σύστημα καταγράφει βίντεο και εικόνες υψηλής ανάλυσης, επιτρέποντας τον ακριβή εντοπισμό των περιστατικών πυρκαγιών. Λειτουργικό υπό αντίξοες καιρικές συνθήκες, το AlarmEye λειτουργεί ως αυτόνομο εργαλείο ή ως μέρος ενός ευρύτερου δικτύου επιτήρησης. Με ενσωματωμένους αλγόριθμους DSP, κάμερες RS485 και συσκευές συνδεδεμένες στο διαδίκτυο, το σύστημα διασφαλίζει ταχεία μετάδοση δεδομένων και έγκαιρη απόκριση σε συμβάντα πυρκαγιάς (Alkhatib, 2017).

Βασικές πληροφορίες από τα διεθνή συστήματα

Τα διεθνή συστήματα που επισημάνθηκαν—IFFED, EYEfi, IQ FireWatch, FIREHAWK και AlarmEye—απεικονίζουν μια σειρά από τεχνολογικές προόδους στην πρόληψη και διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό GIS, προηγμένων δικτύων αισθητήρων και επεξεργασίας δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για τη βελτίωση της ακρίβειας ανίχνευσης και τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών απόκρισης. Η ανάπτυξή τους σε διαφορετικά γεωγραφικά πλαίσια υπογραμμίζει την προσαρμοστικότητά τους και αποτελεσματικότητά στον μετριασμό των καταστροφικών επιπτώσεων των δασικών πυρκαγιών. Αξιοποιώντας αυτές τις καινοτόμες προσεγγίσεις, οι χώρες μπορούν να ενισχύσουν τις ικανότητές τους διαχείρισης πυρκαγιών και να συμβάλουν σε ευρύτερες προσπάθειες προστασίας του περιβάλλοντος.

2.3 Μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV) και δασικές πυρκαγιές

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα (UAV), τα οποία κοινώς αναφέρονται και ως drones, έχουν γίνει απαραίτητα εργαλεία τόσο σε στρατιωτικές όσο και σε πολιτικές εφαρμογές. Ο αυξανόμενος επιπολασμός τους μπορεί να αποδοθεί στην αποδοτικότητα κόστους, την ευκολία εγκατάστασης και την υψηλή κινητικότητά τους.

Τα UAV αναφέρονται επίσης ως συστήματα μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAS), όρος που περιλαμβάνει τόσο το ίδιο το όχημα όσο και τον χειριστή του (Memos & Psannis, 2021).

Εξοπλισμένα με προηγμένους αισθητήρες και κάμερες, τα UAV χρησιμοποιούνται σε διάφορα πεδία για εργασίες όπως επιτήρηση, παρακολούθηση και επιθεωρήσεις. Ενώ η προέλευσή τους έγκειται στις στρατιωτικές επιχειρήσεις, τα UAV έχουν αποδειχθεί ανεκτίμητα σε διάφορους μη στρατιωτικούς τομείς, όπως η παρακολούθηση της κυκλοφορίας, η επιτήρηση των συνόρων και η καταπολέμηση του λαθρεμπορίου και της παράνομης μετανάστευσης. Η ανάπτυξή τους μειώνει την ανάγκη για ανθρώπινο δυναμικό, ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλού κινδύνου ή απομακρυσμένες περιοχές. Στην προστασία του περιβάλλοντος, τα UAV χρησιμοποιούνται εκτενώς για την παρακολούθηση της άγριας ζωής, τις επιθεωρήσεις υποδομής και, κυρίως, την πρόληψη και διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Σε εφαρμογές που σχετίζονται με πυρκαγιές, τα UAV διευκολύνουν τις επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, μειώνοντας τον κίνδυνο για το ανθρώπινο προσωπικό (Li & Savkin, 2021· Shakhatreh et al., 2019).

Στις τηλεπικοινωνίες, τα UAV χρησιμεύουν ως πύλες δικτύου ή κόμβοι αναμετάδοσης, που συχνά απαιτούν παρατεταμένη αιώρηση πάνω από σταθερές θέσεις. Για το σκοπό αυτό, τα UAV με πολλαπλούς ρότορες προτιμώνται συνήθως λόγω της ικανότητας ελιγμών και των δυνατοτήτων αιώρησής τους (Shakhatreh et al., 2019). Η επιλογή μεταξύ UAV με πολλαπλούς ρότορες και UAV με σταθερά φτερά καθοδηγείται από τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της αποστολής. Τα UAV με πολλαπλούς ρότορες υπερέχουν στη συλλογή δεδομένων ακριβείας λόγω της ικανότητάς τους να αιωρούνται, ενώ τα UAV με σταθερά φτερά είναι καλύτερα κατάλληλα για ταχεία συλλογή δεδομένων σε μεγαλύτερες περιοχές, προσφέροντας χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας (Nazib et al., 2021). Τα UAV κατηγοριοποιούνται με βάση διάφορες παραμέτρους, όπως το εύρος εφαρμογής, το βάρος, το εύρος πτήσης και τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού. Αυτές οι κατηγορίες συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα, προσαρμοσμένο από τους Shakhatreh et al. (2019).

Ταξινόμηση UAV

Πεδίο εφαρμογής: Τα UAV ταξινομούνται ως στρατιωτικά ή πολιτικά.

Προσανατολισμός απογείωσης και προσγείωσης: Τα UAV υποδιαιρούνται περαιτέρω με βάση οριζόντιους, κατακόρυφους, μηχανισμούς με τη βοήθεια αλεξίπτωτου ή πολλαπλών πηδαλίων (Shakhatreh et al., 2019).

Βάρος και εύρος πτήσης: Τα UAV κατηγοριοποιούνται σε τακτικές, επιχειρησιακές-τακτικές, στρατηγικές-επιχειρησιακές και ειδικές κατηγορίες, καθεμία από τις οποίες εξυπηρετεί συγκεκριμένους σκοπούς με βάση την αντοχή και την εμβέλεια (Korchenko & Illyash, 2013).

Οι τύποι UAV ταξινομούνται περαιτέρω με βάση τη δομική σχεδίαση σε ελικόπτερα, αεροπλάνα, αερόπλοια και υβρίδια. Τα ελικόπτερα και τα μικρά αεροπλάνα μοιράζονται ορισμένα χαρακτηριστικά, ενώ τα αερόπλοια και τα υβρίδια μοιάζουν με μεταφορικά αεροσκάφη στον λειτουργικό σχεδιασμό τους. Οι πηγές ενέργειας τους μπορεί να ποικίλλουν, με τα UAV ελαφρύτερα από τον αέρα (π.χ. μπαλόνια) να είναι λιγότερο συνηθισμένα σε σύγκριση με τα UAV βαρύτερα από τον αέρα (Eisenbeiss, 2022).

Τα βαρύτερα από τον αέρα UAV κατηγοριοποιούνται με βάση τον τύπο πτερυγίων σε σταθερά, περιστροφικά ή εύκαμπτα σχέδια. Για παράδειγμα:

- UAV σταθερής πτέρυγας: Γνωστά για μεγάλη αντοχή, αυτά τα συστήματα χωρίς τροφοδοσία βασίζονται σε ρεύματα ανέμου για ανύψωση και συχνά χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση μεγάλων περιοχών.
- UAV με περιστροφικά φτερά: Διαθέτοντας συστήματα μονής, διπλής ή πολλαπλών ρότορα, αυτά τα UAV υπερέχουν σε ελιγμούς αλλά έχουν περιορισμένη χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου. Τα UAV με πολλαπλούς ρότορες ευννοούνται ιδιαίτερα για εργασίες μικρής κλίμακας ακριβείας (Eisenbeiss, 2022).

Τα συστήματα UAV αποτελούνται από πολλά υποσυστήματα που λειτουργούν συνεκτικά για να εξασφαλίσουν λειτουργική αποτελεσματικότητα. Τα υποσυστήματα αυτά είναι:

- Σταθμός ελέγχου: Ο επίγειος διανομέας που παρακολουθεί τη δραστηριότητα των UAV και παρέχει εντολές.
- Ωφέλιμο φορτίο: Αισθητήρες, κάμερες ή άλλος εξοπλισμός που είναι τοποθετημένοι στο UAV.
- Σώμα αεροσκάφους: Η φυσική δομή του UAV.
- Σύστημα πλοήγησης: Αυτόματος πιλότος και συστήματα GPS που καθοδηγούν το UAV.
- Συστήματα επικοινωνίας: Διευκολύνουν τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ UAV και σταθμών ελέγχου.
- Συστήματα υποστήριξης: Εγχειρίδια, μηχανισμοί μεταφοράς και ανάκτησης για συντήρηση και ανάπτυξη (Austin, 2010; Eisenbeiss, 2022).

Ο σταθμός ελέγχου εδάφους είναι κεντρικός στις λειτουργίες UAV, χρησιμεύοντας ως διεπαφή για τους χειριστές για την παρακολούθηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και τη διαχείριση των διαδρομών πτήσης. Τα δεδομένα από το UAV μεταδίδονται μέσω ραδιοσυχνοτήτων, ακτίνων λέιζερ ή οπτικών ινών, διασφαλίζοντας ένα απρόσκοπτο σύστημα άνω και κάτω ζεύξης. Οι προηγμένοι σταθμοί ελέγχου περιλαμβάνουν συστήματα παρακολούθησης καιρού και προ-προγραμματισμένες διεπαφές για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας δρομολόγησης UAV (Colomina & Molina, 2014). Το σώμα αεροσκάφους των UAV έχει σχεδιαστεί για να ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένες απαιτήσεις αποστολής, με βασικά ζητήματα η αντοχή, η αντίσταση στον αέρα και το εύρος λειτουργίας. Τα σταθερά και περιστροφικά UAV χρησιμοποιούνται με βάση τη διάρκεια της αποστολής, τις απαιτήσεις ωφέλιμου φορτίου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα UAV είναι συνήθως εξοπλισμένα με δυνατότητες αποσυναρμολόγησης για την ευκολότερη μεταφορά και αποθήκευση (Austin, 2010).

Το ωφέλιμο φορτίο ποικίλλει ανάλογα με τις απαιτήσεις της αποστολής και μπορεί να περιλαμβάνει οπτικές κάμερες, πολυφασματικούς και υπερφασματικούς αισθητήρες, κάμερες θερμικής απεικόνισης, σαρωτές λέιζερ και ραντάρ. Τα ωφέλιμα φορτία απεικόνισης συλλαμβάνουν δεδομένα σε διάφορα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, επιτρέποντας προηγμένες εφαρμογές όπως η ανίχνευση ανωμαλιών και η παρακολούθηση του περιβάλλοντος (Colomina & Molina, 2014). Για την πλοήγηση, τα συστήματα αυτόματου πιλότου αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της λειτουργικότητας των UAV, λειτουργώντας ως ο «εγκέφαλος» του συστήματος. Ενσωματώνουν πολλαπλούς αισθητήρες, συμπεριλαμβανομένων βαρομέτρων, γυροσκοπίων και μονάδων GPS, για τη διατήρηση της σταθερότητας και την καθοδήγηση του UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τα σύγχρονα συστήματα GPS επιτρέπουν ακριβή εντοπισμό θέσης χρησιμοποιώντας δορυφορικά σήματα, εξαιλείνοντας την ανάγκη για παλαιότερα, πιο ακριβά συστήματα αδρανειακής πλοήγησης (INS) (Colomina & Molina, 2014).

Αισθητήρες UAV και οι εφαρμογές τους

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται στα UAV ταξινομούνται ευρέως σε κατηγορίες απεικόνισης και πλοήγησης:

- Αισθητήρες απεικόνισης: Περιλαμβάνουν αισθητήρες οπτικού φάσματος, πολυφασματικές και υπερφασματικές κάμερες, θερμική απεικόνιση και σαρωτές λέιζερ. Κάθε τύπος αισθητήρα προσφέρει μοναδικές δυνατότητες, όπως ανίχνευση ανωμαλιών εδάφους ή λήψη θερμικών εικόνων υψηλής ανάλυσης για ανίχνευση πυρκαγιάς (Colomina & Molina, 2014).
- Αισθητήρες πλοήγησης: Περιλαμβάνουν GPS, γυροσκοπία και βαρόμετρα, εξασφαλίζοντας παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και ακριβή έλεγχο των κινήσεων των UAV (Austin, 2010).

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα αντιπροσωπεύουν μια ευέλικτη και ταχέως εξελισσόμενη τεχνολογία με ευρείες εφαρμογές στην επιτήρηση, την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και τη διαχείριση καταστροφών. Η προσαρμοστικότητά τους, σε συνδυασμό με προηγμένα υποσυστήματα και ενσωμάτωση αισθητήρων, τα καθιστά ανεκτίμητα για εργασίες όπως η πρόληψη και η αντιμετώπιση δασικών πυρκαγιών. Αξιοποιώντας καινοτομίες στον σχεδιασμό ωφέλιμου φορτίου, στα συστήματα πλοήγησης και στα δίκτυα επικοινωνίας, τα UAV συνεχίζουν να επαναπροσδιορίζουν τη λειτουργική απόδοση σε πολλούς τομείς.

2.4 Προγράμματα Φωτογραμμετρικής Μοντελοποίησης και Εφαρμογές UAV

Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των UAV έχουν αλλάξει σημαντικά το πεδίο της φωτογραμμετρίας, επιτρέποντας τη συλλογή γεωγραφικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης σε προηγουμένως απρόσιτες ή απομακρυσμένες περιοχές. Αυτές οι καινοτομίες επέτρεψαν στους ερευνητές να ξεπεράσουν τους περιορισμούς που σχετίζονται με τις παραδοσιακές μεθόδους χαρτογράφησης της γης, αντιμετωπίζοντας έτσι πολύπλοκες περιβαλλοντικές προκλήσεις με πρωτοφανή ακρίβεια (Bemis et al., 2014). Ενσωματώνοντας UAV με προγράμματα φωτογραμμετρικής μοντελοποίησης, οι ερευνητές μπορούν τώρα να δημιουργήσουν ακριβή χωρικά δεδομένα για εφαρμογές όπως η περιβαλλοντική παρακολούθηση, οι επιθεωρήσεις υποδομής και η διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Η φωτογραμμετρία, η διαδικασία λήψης μετρήσεων από φωτογραφίες, έχει εξελιχθεί δραματικά με την ενσωμάτωση UAV. Εξοπλισμένα με κάμερες υψηλής ανάλυσης, τα UAV καταγράφουν εναέριες εικόνες από πολλές γωνίες, οι οποίες στη συνέχεια υποβάλλονται σε επεξεργασία για την κατασκευή λεπτομερών τρισδιάστατων μοντέλων της επιφάνειας της Γης. Αυτός ο συνδυασμός φωτογραμμετρίας και τηλεπισκόπησης παρέχει υψηλότερη ακρίβεια, ταχύτερα αποτελέσματα και μεγαλύτερη οικονομική αποδοτικότητα από τις παραδοσιακές μεθόδους (Holman et al., 2016).

Έχουν αναπτυχθεί αρκετά προγράμματα λογισμικού για τη μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων της φωτογραμμετρίας που βασίζεται σε UAV. Τα πιο αξιοσημείωτα προγράμματα συνοψίζονται παρακάτω:

Περιγραφή προγράμματος

- Pix4D Μετατρέπει πολυφασματικές εικόνες σε μωσαϊκά 2D με γεωαναφορά, τρισδιάστατα μοντέλα και σύννεφα σημείων. Προσφέρει αυτόματο σχεδιασμό πτήσεων.
- Το Agisoft Metashape Υποστηρίζει πλήρεις ροές εργασιών φωτογραμμετρίας, από τη στοίχιση φωτογραφιών έως τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, με προηγμένες αναλυτικές δυνατότητες.
- Autodesk ReCap Δημιουργεί τρισδιάστατα μοντέλα από φωτογραφίες ή σαρώσεις λέιζερ και ενσωματώνεται με εφαρμογές CAD, BIM, VR και AR.

Η φωτογραμμετρία που βασίζεται σε UAV διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην πρόληψη, τον εντοπισμό και τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Με την παραγωγή εναέριων εικόνων υψηλής ανάλυσης και τρισδιάστατων μοντέλων εδάφους, τα UAV επιτρέπουν την ακριβή αναγνώριση των κινδύνων πυρκαγιάς, όπως η ξηρή βλάστηση ή τα ευάλωτα σημεία πρόσβασης. Κατά τη διάρκεια ενεργών εκδηλώσεων πυρκαγιάς, τα UAV παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για να καθοδηγήσουν τις προσπάθειες πυρόσβεσης, επιτρέποντας την αποτελεσματική και ασφαλή ανάπτυξη των πόρων. Μετά από μια πυρκαγιά, τα UAV διευκολύνουν την εκτίμηση των ζημιών και τον σχεδιασμό της αναδάσωσης μετρώντας την έκταση των καμένων περιοχών με υψηλή ακρίβεια (Feng, Liu, & Gong, 2015). Για παράδειγμα, η φωτογραμμετρία των UAV έχει συμβάλει καθοριστικά στη χαρτογράφηση δυσπρόσιτων δασικών περιοχών και στη δημιουργία δεδομένων με δυνατότητα δράσης για τη διαχείριση κινδύνου πυρκαγιάς.

Αυτά τα συστήματα παρέχουν στους ανταποκριτές έκτακτης ανάγκης πολύτιμα εργαλεία για την ενίσχυση της επίγνωσης της κατάστασης και τη βελτίωση της συνολικής αποτελεσματικότητας των στρατηγικών καταστολής πυρκαγιάς.

Εφαρμογές UAV στη Διαχείριση Δασικών Πυρκαγιών

Η τεχνολογία UAV έχει φέρει επανάσταση στην προσέγγιση της διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών παρέχοντας εναέριες προοπτικές των πληγείσων περιοχών και παρέχοντας δεδομένα υψηλής ανάλυσης σε πραγματικό χρόνο. Αυτές οι δυνατότητες ενισχύουν τον έγκαιρο εντοπισμό πυρκαγιών, βελτιώνουν τη λήψη αποφάσεων κατά τις προσπάθειες καταστολής και διευκολύνουν τις ολοκληρωμένες αξιολογήσεις μετά την πυρκαγιά (Gupta, Reif, & Sturdevant, 2023). Εξοπλισμένα με θερμικούς και πολυφασματικούς αισθητήρες, τα UAV μπορούν να ανιχνεύσουν ακόμη και μικρές αλλαγές θερμοκρασίας, επιτρέποντας την έγκαιρη αναγνώριση των εστιών πυρκαγιάς. Παρέχοντας ζωντανές εικόνες ενεργών ζωνών πυρκαγιάς, υποστηρίζουν τη στρατηγική κατανομή των πόρων πυρόσβεσης, μειώνοντας τους χρόνους απόκρισης και περιορίζοντας την εξάπλωση της πυρκαγιάς (Jensen, McRae, & Pickering, 2023). Ορισμένα UAV είναι ακόμη ικανά να μεταφέρουν πυροσβεστικά υλικά σε δυσπρόσιτες περιοχές, προσφέροντας πρόσθετη υποστήριξη στις παραδοσιακές μεθόδους καταστολής πυρκαγιάς (Maus, Krajzewicz, & Schmidt, 2023).

Μετά την πυρκαγιά, τα UAV διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην εκτίμηση των ζημιών. Τραβώντας λεπτομερείς εικόνες και δημιουργώντας χάρτες καμένων περιοχών, βοηθούν τις αρχές στην αξιολόγηση της σοβαρότητας της πυρκαγιάς και στη διαμόρφωση σχεδίων αναδάσωσης και αποκατάστασης (Petrovic, Smiljanic, & Tomic, 2023). Στην Ελλάδα, τα UAV ενσωματώνονται όλο και περισσότερο στις στρατηγικές διαχείρισης πυρκαγιών, ιδιαίτερα σε περιοχές υψηλού κινδύνου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Η ικανότητά τους να λειτουργούν σε δυσπρόσιτα εδάφη και τη νύχτα ενισχύει τόσο τις δυνατότητες πρόληψης όσο και απόκρισης (Apostolakis et al., 2022).

Μελέτες περίπτωσης εφαρμογών UAV σε δασικές πυρκαγιές

Αρκετές περιπτώσιολογικές μελέτες καταδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των UAV στη διαχείριση δασικών πυρκαγιών παγκοσμίως:

Αυστραλία (2019-2020): Τα UAV ήταν ζωτικής σημασίας κατά τη διάρκεια των καταστροφικών πυρκαγιών, παρέχοντας εικόνες σε πραγματικό χρόνο που ενημέρωσαν τον επιχειρησιακό σχεδιασμό και την κατανομή πόρων, σώζοντας ζωές και περιουσίες (Smith, Poole, & Wightman, 2023).

Ηνωμένες Πολιτείες (2020): Τα UAV βοήθησαν στον εντοπισμό και την καταπολέμηση των πυρκαγιών στην Καλιφόρνια προσφέροντας θερμικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης (Bartlett & Anderson, 2023).

Σουηδία (2018): Τα UAV παρείχαν κρίσιμη θερμική απεικόνιση κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών, βοηθώντας τα συνεργεία πυρόσβεσης να εντοπίσουν και να εκλέξουν τις πυρκαγιές (Gustafsson, Prinz, & Seielstad, 2023).

Πορτογαλία (2017): Τα UAV διευκόλυναν την ανάλυση συμπεριφοράς πυρκαγιάς κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών πυρκαγιών, βελτιστοποιώντας την κατανομή των πόρων (Marques, Sá, & Pinto, 2023).

Ελλάδα (2021): Τα UAV αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών στην Εύβοια, συλλέγοντας δεδομένα για την εξέλιξη της πυρκαγιάς και βοηθώντας άμεσα τις προσπάθειες κατάσβεσης, προστατεύοντας ζωτικά οικοσυστήματα.

Παρά τις δυνατότητές τους, η εφαρμογή των UAV στη διαχείριση δασικών πυρκαγιών αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις:

Τεχνολογικοί περιορισμοί: Τα UAV συχνά υποφέρουν από περιορισμένη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και ευπάθεια σε αντίξοες καιρικές συνθήκες, εμποδίζοντας την επιχειρησιακή τους αποτελεσματικότητα (Maus, Krajzewicz, & Schmidt, 2023).

Διαχείριση δεδομένων: Η διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο θέτει σημαντικές υλικοτεχνικές προκλήσεις, ιδιαίτερα όσον αφορά τη διασφάλιση έγκαιρης ανάλυσης και λήψης αποφάσεων (Yousefi, Khosravi, Pradhan, & Hong, 2023).

Ρυθμιστικά εμπόδια: Οι επιχειρήσεις UAV υπόκεινται σε διαφορετικά νομικά πλαίσια, τα οποία μπορεί να καθυστερήσουν την ανάπτυξη σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Οι ανησυχίες για το απόρρητο και η ανάγκη συμμόρφωσης με τους τοπικούς κανονισμούς περιπλέκουν περαιτέρω τη χρήση τους (Chowdhury, Emami, & Izbicki, 2023; Sullivan & Finn, 2023).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, ο Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO) παρέχει γενικές κατευθυντήριες γραμμές για τις επιχειρήσεις UAV, δίνοντας έμφαση στην ασφάλεια και την ενσωμάτωση με τα διεθνή συστήματα αεροπορίας. Ωστόσο, οι κανονισμοί του ICAO δεν αντιμετωπίζουν τις συγκεκριμένες εφαρμογές των UAV στη διαχείριση δασικών πυρκαγιών, αφήνοντας τέτοιες λεπτομέρειες σε μεμονωμένα έθνη (Icao.int, 2021). Στην Ευρώπη, ο Οργανισμός Ασφάλειας της Αεροπορίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EASA) κατηγοριοποιεί τα UAV σε κατηγορίες "ανοιχτές", "ειδικές" και "πιστοποιημένες" με βάση τον λειτουργικό κίνδυνο. Η διαχείριση δασικών πυρκαγιών εμπίπτει συνήθως στην κατηγορία «ειδική», η οποία απαιτεί εκτιμήσεις κινδύνου και επιχειρησιακή άδεια. Οι διατάξεις έκτακτης ανάγκης επιτρέπουν την ταχεία έγκριση κατά τη διάρκεια κρίσεων πυρκαγιάς (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2021). Στην Ελλάδα, η Ελληνική Αρχή Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ) ρυθμίζει τις λειτουργίες UAV, ευθυγραμμίζόμενη με τις κατευθυντήριες γραμμές του EASA, επιβάλλοντας παράλληλα πρόσθετες εθνικές απαιτήσεις. Για εφαρμογές υψηλού κινδύνου όπως η διαχείριση δασικών πυρκαγιών, είναι υποχρεωτικές οι ειδικές άδειες και η προηγούμενη ειδοποίηση στην ΥΠΑ. Οι διατάξεις έκτακτης ανάγκης επιταχύνουν τις εγκρίσεις, διασφαλίζοντας την έγκαιρη ανάπτυξη UAV κατά τη διάρκεια πυρκαγιών (Hcaa.gov.gr, 2022).

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία

Η σύγχρονη έρευνα για την παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών με τη χρήση σμηνών UAV απαιτεί σύνθετες στρατηγικές πλοήγησης και αλγοριθμικές προσεγγίσεις για να αντιμετωπιστούν οι δυναμικές συνθήκες του περιβάλλοντος, τα απρόβλεπτα συμβάντα, και η συνεργασία μεταξύ πολλών μονάδων. Στο πλαίσιο αυτό, παρουσιάζεται μια αναλυτική μεθοδολογία που βασίζεται σε αρχές θεωρίας γραφημάτων, ολοκληρωμένα μαθηματικά μοντέλα και ευέλικτους αλγορίθμους κατανομής εργασιών.

3.1 Σχεδιασμός Συνεργατικής Στρατηγικής Πλοήγησης

3.1.1 Θεωρητική βάση στη θεωρία γραφημάτων

Η θεωρία γραφημάτων αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό και τη διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ των UAVs. Η μοντελοποίηση του δικτύου των UAVs ως γράφημα $G=(V,E,A)$ $G=(V,E,A)$, όπου V αντιπροσωπεύει τα UAVs (κορυφές), E τις συνδέσεις μεταξύ τους (ακμές), και A τον πίνακα βαρών των ακμών, επιτρέπει την ανάλυση και τον έλεγχο της επικοινωνίας τους. Για την περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς, χρησιμοποιείται ο Λαπλασιανός πίνακας L και η προσέγγιση των μεταβαλλόμενων τοπολογιών. Αυτή η ανάλυση καθιστά δυνατή τη διατήρηση της συνοχής του σμήνους, ακόμα και σε συνθήκες απώλειας επικοινωνίας ή αποτυχίας μελών.

Οι αρχές αυτές ενσωματώνονται στη διαμόρφωση ενός κυκλικού σχηματισμού γύρω από το στόχο, όπως απαιτείται για την παρακολούθηση της εξάπλωσης της φωτιάς. Οι εξισώσεις που καθορίζουν την επιθυμητή κίνηση των UAVs στη βάση αυτής της θεωρίας περιγράφονται μέσω διαφορικών εξισώσεων που λαμβάνουν υπόψη τη θέση, την ταχύτητα και τα εξωτερικά ερεθίσματα.

3.1.2 Ανάλυση μοντέλων διπλής ολοκλήρωσης

Το δυναμικό μοντέλο των UAVs που χρησιμοποιείται βασίζεται στο σύστημα διπλής ολοκλήρωσης. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει ένα ρεαλιστικό πλαίσιο για τη μοντελοποίηση της κίνησης σε δύο διαστάσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις εξωτερικές διαταραχές και τις αβεβαιότητες. Οι εξισώσεις του συστήματος διατυπώνονται ως:

$$\dot{p}_i(t) = v_i(t), \dot{v}_i(t) = u_i(t) + d_i(t),$$

όπου $p_i(t)$ είναι η θέση, $v_i(t)$ η ταχύτητα, $u_i(t)$ η είσοδος ελέγχου, και $d_i(t)$ η διαταραχή, τη χρονική στιγμή t .

Το πλεονέκτημα αυτής της προσέγγισης έγκειται στη δυνατότητα ενσωμάτωσης στοχαστικών ή μη-γραμμικών αβεβαιοτήτων, όπως αυτές που προκαλούνται από ριπές ανέμου ή απώλειες δεδομένων.

3.1.3 Εφαρμογή της μεθόδου Lyapunov για την εξασφάλιση σταθερότητας

Η σταθερότητα του συστήματος εξασφαλίζεται μέσω της μεθόδου Lyapunov, η οποία χρησιμοποιείται για την ανάλυση των δυναμικών συστημάτων και την ανάπτυξη πρωτοκόλλων πλοήγησης. Συγκεκριμένα, η μέθοδος περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλης συνάρτησης Lyapunov $V(\delta)$ για την περιγραφή της σταθερότητας και τη βελτιστοποίηση της δυναμικής της ομάδας. Ο στόχος είναι η εξάλειψη σφαλμάτων στον σχηματισμό και η αποφυγή συγκρούσεων, ακόμα και σε περιπτώσεις όπου η τοπολογία επικοινωνίας αλλάζει. Η παραπάνω προσέγγιση υποστηρίζεται από μαθηματικά θεμελιωμένες αποδείξεις που εξασφαλίζουν ότι η συνολική συμπεριφορά του συστήματος είναι ασυμπτωτικά σταθερή.

3.2 Αλγόριθμοι Ανακατανομής Εργασιών

Η ανακατανομή εργασιών σε δυναμικά συστήματα σμηνών μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs) αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα, ειδικά όταν αυτά επιχειρούν σε σύνθετα και απρόβλεπτα περιβάλλοντα, όπως η παρακολούθηση και διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο, οι αλγόριθμοι κατανομής εργασιών παίζουν κεντρικό ρόλο στη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος, της αποδοτικής χρήσης των διαθέσιμων πόρων και της συνεχούς εκτέλεσης της αποστολής, ακόμη και σε περιπτώσεις αποτυχιών ή διακοπής επικοινωνίας. Η ενότητα αυτή εστιάζει στον τρόπο εφαρμογής του αλγορίθμου Kuhn–Munkres (γνωστού ως Hungarian Algorithm), τις τροποποιήσεις που απαιτούνται για την προσαρμογή του σε δυναμικές συνθήκες, και τη διαδικασία ανακατανομής των καθηγόντων βάσει κόστους.

3.2.1 Εφαρμογή του αλγορίθμου Kuhn–Munkres (Hungarian Algorithm)

Ο αλγόριθμος Kuhn–Munkres αποτελεί έναν από τους πιο αποδοτικούς τρόπους επίλυσης προβλημάτων αντιστοίχισης, ιδιαίτερα όταν το σύστημα επιδιώκει τη βέλτιστη εκχώρηση εργασιών μεταξύ UAVs και στόχων με βάση κάποιο κριτήριο ελαχιστοποίησης του κόστους. Στην περίπτωση των σμηνών UAVs, κάθε UAV αντιστοιχεί σε έναν κόμβο του γράφου, ενώ κάθε εργασία ή στόχος αντιστοιχεί σε έναν άλλο κόμβο. Η διαδικασία ξεκινά με τη δημιουργία του πίνακα κόστους και την εύρεση της βέλτιστης αντιστοίχισης μέσω του Hungarian Algorithm. Ο αλγόριθμος βασίζεται σε γραμμικές πράξεις και διαδοχικές βελτιστοποιήσεις που εξασφαλίζουν ότι οι εργασίες εκχωρούνται στα UAVs με ελάχιστο συνολικό κόστος.

Ένα χαρακτηριστικό πλεονέκτημα του αλγορίθμου είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε πλήρως συνδεδεμένα σμήνη, όπου κάθε UAV μπορεί να αναλάβει οποιαδήποτε εργασία, όσο και σε περιπτώσεις περιορισμένων δυνατοτήτων, όπου μόνο συγκεκριμένα UAVs μπορούν να αναλάβουν συγκεκριμένες εργασίες. Μία από τις βασικές προκλήσεις κατά την

εφαρμογή του Hungarian Algorithm στα σμήνη UAVs είναι η ανάγκη για διαχείριση του υπολογιστικού φόρτου, ειδικά όταν ο αριθμός των UAVs ή των στόχων είναι μεγάλος. Σε τέτοιες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται μέθοδοι προσεγγιστικής βελτιστοποίησης για τη μείωση του χρόνου υπολογισμού, χωρίς όμως να θυσιάζεται η ακρίβεια της αντιστοίχισης. Επιπλέον, η αποκεντρωμένη υλοποίηση του αλγορίθμου επιτρέπει στα UAVs να συνεργάζονται τοπικά, μειώνοντας την εξάρτηση από ένα κεντρικό σημείο ελέγχου.

3.2.2 Προσαρμογές για δυναμικές συνθήκες και απώλειες UAVs

Η δυναμική φύση των περιβαλλόντων στα οποία επιχειρούν τα UAVs απαιτεί τροποποιήσεις στον αλγόριθμο για να ανταποκριθεί σε περιπτώσεις όπως η απώλεια ενός UAV, η προσθήκη νέων στόχων ή η αλλαγή των προτεραιοτήτων της αποστολής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο πίνακας κόστους CCC ενημερώνεται σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τις νέες συνθήκες. Για παράδειγμα, όταν ένα UAV αποτύχει ή χάσει την επικοινωνία με το υπόλοιπο σμήνος, οι εργασίες του ανακατανέμονται στα υπόλοιπα UAVs, με στόχο τη διατήρηση της συνολικής αποδοτικότητας του συστήματος.

Η προσαρμογή του αλγορίθμου σε τέτοιες συνθήκες περιλαμβάνει τη χρήση τοπικών πληροφοριών, όπως η τρέχουσα θέση και η κατάσταση των UAVs, για την ανακατανομή των εργασιών. Σε περιπτώσεις όπου η επικοινωνία είναι περιορισμένη, τα UAVs χρησιμοποιούν πρωτόκολλα peer-to-peer για να ανταλλάσσουν δεδομένα και να λαμβάνουν αποφάσεις αποκεντρωμένα.

Αυτή η προσέγγιση εξασφαλίζει ότι το σμήνος μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί ακόμη και σε περιβάλλοντα με υψηλό βαθμό αβεβαιότητας ή αποσυνδεδεμένα τμήματα. Επιπλέον, η προσαρμογή του αλγορίθμου περιλαμβάνει την ενσωμάτωση στοιχείων μηχανικής μάθησης (machine learning) για την πρόβλεψη πιθανών σφαλμάτων και τη λήψη προληπτικών μέτρων. Για παράδειγμα, τα UAVs μπορούν να χρησιμοποιούν δεδομένα από τους αισθητήρες τους

για να εντοπίσουν σημάδια επικείμενης αποτυχίας, όπως αλλαγές στην κατανάλωση ενέργειας ή ανωμαλίες στην κίνηση. Με αυτόν τον τρόπο, η ανακατανομή των εργασιών μπορεί να γίνει προληπτικά, αποφεύγοντας την απότομη διακοπή της αποστολής.

3.2.3 Διαδικασία ανακατανομής βάσει κόστους

Η διαδικασία ανακατανομής εργασιών βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, το οποίο περιλαμβάνει παράγοντες όπως η απόσταση που πρέπει να καλυφθεί, η κατανάλωση ενέργειας και ο χρόνος ολοκλήρωσης της εργασίας. Σε περιπτώσεις δυναμικών συνθηκών, όπου τα UAVs πρέπει να προσαρμοστούν σε νέες απαιτήσεις, η διαδικασία ανακατανομής εκτελείται επαναληπτικά, με την κάθε επανάληψη να προσεγγίζει τη βέλτιστη λύση. Μία από τις κύριες προκλήσεις στη διαδικασία αυτή είναι η ισορροπία μεταξύ ταχύτητας υπολογισμού και ακρίβειας. Η χρήση αποκεντρωμένων μεθόδων, όπου τα UAVs υπολογίζουν τοπικά το κόστος των πιθανών εργασιών, μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για την ανακατανομή. Ωστόσο, η πλήρης βελτιστοποίηση απαιτεί συχνά περισσότερους υπολογιστικούς πόρους, ειδικά όταν οι εργασίες είναι σύνθετες ή το περιβάλλον περιλαμβάνει πολλαπλά εμπόδια.

Σημαντικό στοιχείο της διαδικασίας είναι η ενσωμάτωση κριτηρίων ιεράρχησης, όπως η προτεραιότητα των στόχων ή η σημασία των εργασιών. Για παράδειγμα, σε ένα σενάριο δασικής πυρκαγιάς, οι εργασίες ανίχνευσης κοντά σε κατοικημένες περιοχές μπορεί να έχουν υψηλότερη προτεραιότητα από την παρακολούθηση σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Τα UAVs μπορούν να χρησιμοποιούν αυτά τα κριτήρια για να προσαρμόσουν τις αποφάσεις τους και να εξασφαλίσουν ότι οι κρίσιμες εργασίες ολοκληρώνονται πρώτες. Συνοψίζοντας, οι αλγόριθμοι ανακατανομής εργασιών που αναπτύχθηκαν για τα σμήνη UAVs επιτυγχάνουν τη βέλτιστη χρήση των πόρων, την ταχεία απόκριση σε δυναμικές συνθήκες και την ανθεκτικότητα σε αποτυχίες. Η χρήση του αλγορίθμου Kuhn–Munkres, οι τροποποιήσεις για δυναμικά περιβάλλοντα και η διαδικασία ανακατανομής βάσει κόστους συνδυάζονται για να παρέχουν ένα ευέλικτο και αποδοτικό σύστημα, ικανό να ανταποκριθεί σε σύνθετες αποστολές.

Ωστόσο, οι προκλήσεις που αναδείχθηκαν, όπως η ανάγκη για περαιτέρω βελτιώσεις στην αποκεντρωμένη λήψη αποφάσεων και η ενσωμάτωση τεχνητής νοημοσύνης, καταδεικνύουν την ανάγκη για συνεχιζόμενη έρευνα στον τομέα αυτό.

3.3 Αποφυγή Συγκρούσεων

Η αποφυγή συγκρούσεων είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες για την αποτελεσματική λειτουργία των σημνών UAVs, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλής επικινδυνότητας, όπως οι επιχειρήσεις παρακολούθησης δασικών πυρκαγιών. Σε αυτές τις αποστολές, τα UAVs πρέπει να διατηρούν ασφαλείς αποστάσεις μεταξύ τους, ενώ εκτελούν τις προκαθορισμένες εργασίες τους. Η αποτυχία στην αποφυγή συγκρούσεων μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια μονάδων, αύξηση του κόστους και καθυστερήσεις στις επιχειρήσεις.

3.3.1 Εντοπισμός κινδύνων σύγκρουσης μέσω αισθητήρων

Η αποφυγή συγκρούσεων ξεκινά με τον εντοπισμό των κινδύνων μέσω αισθητήρων, οι οποίοι παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τη θέση και την κίνηση των UAVs. Τα σύγχρονα UAVs είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες όπως:

- **Ραντάρ μικρής εμβέλειας**, που εντοπίζουν αντικείμενα ή άλλα UAVs εντός της περιοχής λειτουργίας.
- **Κάμερες RGB ή υπερόθρων**, που παρέχουν οπτικά δεδομένα για εμπόδια.
- **Λέιζερ LIDAR**, που επιτρέπουν την καταγραφή του περιβάλλοντος με τρισδιάστατη ανάλυση.
- **Αισθητήρες GPS και IMU (Inertial Measurement Units)**, που εξασφαλίζουν την ακριβή θέση και πορεία κάθε UAV.

Ο συνδυασμός δεδομένων από αυτούς τους αισθητήρες επιτρέπει την πρόβλεψη πιθανών συγκρούσεων με υψηλή ακρίβεια. Για παράδειγμα, η χρήση LIDAR παρέχει πληροφορίες σχετικά με την απόσταση από εμπόδια, ενώ οι αισθητήρες GPS καθορίζουν τις σχετικές θέσεις των UAVs. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο γίνεται μέσω αλγορίθμων συγχώνευσης αισθητηριακών πληροφοριών, οι οποίοι εξασφαλίζουν την ακρίβεια και την ταχύτητα εντοπισμού κινδύνων. Σύμφωνα με την έρευνα των Campion, Ranganathan και Faruque (2019), η συγχώνευση δεδομένων από αισθητήρες πολλαπλών τύπων μπορεί να μειώσει τα σφάλματα εντοπισμού κατά 35%, ενώ αυξάνει την απόκριση του συστήματος σε περίπτωση κινδύνου. Αυτό καθιστά τους αισθητήρες απαραίτητο μέρος κάθε σύγχρονου UAV που λειτουργεί σε συνεργατικό πλαίσιο.

3.3.2 Σχεδιασμός γεωμετρικής προσέγγισης αποφυγής

Η γεωμετρική προσέγγιση αποτελεί τη βάση για τη διαχείριση των κινδύνων σύγκρουσης σε δυναμικά περιβάλλοντα. Σε αυτή την προσέγγιση, τα UAVs χρησιμοποιούν πληροφορίες για τις θέσεις, τις ταχύτητες και τις πορείες τους για να διατηρούν ασφαλείς αποστάσεις μεταξύ τους. Το κλειδί αυτής της μεθόδου είναι η κατανόηση της "περιοχής κινδύνου", δηλαδή του χώρου στον οποίο υπάρχει πιθανότητα σύγκρουσης. Η περιοχή κινδύνου μπορεί να μοντελοποιηθεί μαθηματικά μέσω γεωμετρικών μοντέλων, όπως:

- **Κυκλικές περιοχές ασφαλείας**, που περιβάλλουν κάθε UAV και αυξάνονται δυναμικά όταν η ταχύτητα ή οι κινήσεις είναι απρόβλεπτες.
- **Πολυγωνικές ζώνες κινδύνου**, που καθορίζονται από την πορεία και τις πιθανές κινήσεις του UAV.

Η απόφαση για την αλλαγή πορείας γίνεται με βάση τη σχετική θέση του UAV ως προς την περιοχή κινδύνου. Για παράδειγμα, αν δύο UAVs κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση και οι περιοχές κινδύνου τους επικαλύπτονται, το UAV με τη μεγαλύτερη ταχύτητα μπορεί να επιβραδύνει ή να αλλάξει κατεύθυνση. Η έρευνα των Alsammak et al. (2022) υποστηρίζει ότι η γεωμετρική προσέγγιση είναι ιδιαίτερα αποδοτική σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα

UAVs, καθώς μειώνει τη συχνότητα συγκρούσεων κατά 60% σε σύγκριση με γραμμικές μεθόδους αποφυγής. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή μπορεί να ενσωματωθεί εύκολα σε αποκεντρωμένα συστήματα ελέγχου, επιτρέποντας στα UAVs να λαμβάνουν αποφάσεις τοπικά χωρίς εξάρτηση από κεντρική μονάδα ελέγχου.

3.3.3 Αλγόριθμος καθοδήγησης σημείων πορείας

Ο αλγόριθμος καθοδήγησης σημείων πορείας αποτελεί μια στρατηγική προσέγγιση για την αποφυγή συγκρούσεων, βασισμένη στον καθορισμό ενδιάμεσων σημείων πορείας που επιτρέπουν στα UAVs να παρακάμπτουν εμπόδια. Η διαδικασία περιλαμβάνει:

1. Τον εντοπισμό του σημείου σύγκρουσης με βάση τις πορείες και τις ταχύτητες των UAVs.
2. Τον καθορισμό ενός σημείου πορείας που απομακρύνει το UAV από την περιοχή κινδύνου.
3. Την επιστροφή στην αρχική πορεία μετά την αποφυγή της σύγκρουσης.

Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί τεχνικές βελτιστοποίησης, όπως η μέθοδος της ελάχιστης ενέργειας, για να καθορίσει τη βέλτιστη πορεία που ελαχιστοποιεί το κόστος σε χρόνο και καύσιμα. Η εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική σε δυναμικά περιβάλλοντα, όπου τα εμπόδια ή τα άλλα UAVs βρίσκονται σε συνεχή κίνηση. Στην έρευνα των Keerthinathan et al. (2023), ο αλγόριθμος σημείων πορείας επέτρεψε τη μείωση του χρόνου αποφυγής συγκρούσεων κατά 45% και αύξησε την ακρίβεια της πλοήγησης σε περιοχές υψηλού κινδύνου.

3.4 Ενοποίηση Στρατηγικών σε Συνεργατικό Πλαίσιο

Η ενσωμάτωση των παραπάνω στρατηγικών σε ένα ενιαίο συνεργατικό πλαίσιο αποτελεί το τελευταίο στάδιο ανάπτυξης του συστήματος πλοήγησης UAVs. Η συνεργατικότητα δεν

εξασφαλίζει μόνο την αποφυγή συγκρούσεων, αλλά και τη συνεχή ανταλλαγή δεδομένων και την ευέλικτη κατανομή εργασιών.

3.4.1 Συνδυασμός των αλγορίθμων σε ενιαίο σύστημα

Η ενοποίηση των αλγορίθμων αποφυγής συγκρούσεων και ανακατανομής εργασιών γίνεται μέσω κεντρικών και αποκεντρωμένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Κάθε UAV λαμβάνει δεδομένα από τους αισθητήρες του, τα επεξεργάζεται τοπικά και στη συνέχεια τα διαμοιράζει με τα υπόλοιπα UAVs. Η χρήση κοινών πρωτοκόλλων, όπως τα MAVLink και ROS (Robot Operating System), επιτρέπει τη συνεχή ανταλλαγή δεδομένων για τη θέση, την ταχύτητα και τις ενέργειες κάθε UAV. Παράλληλα, ο συνδυασμός των αλγορίθμων πλοήγησης και αποφυγής συγκρούσεων εξασφαλίζει ότι η στρατηγική πλοήγησης παραμένει δυναμική, προσαρμοζόμενη στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Για παράδειγμα, σε ένα σενάριο δασικής πυρκαγιάς, όπου η φωτιά μπορεί να αλλάξει κατεύθυνση απρόβλεπτα, τα UAVs χρησιμοποιούν γεωμετρικές μεθόδους αποφυγής για να διατηρήσουν τις αποστάσεις τους, ενώ ανακατανέμουν τις εργασίες τους για να παρακολουθούν τις κρίσιμες περιοχές.

3.4.2 Ροή δεδομένων και επικοινωνία μεταξύ UAVs

Η συνεργατικότητα των UAVs βασίζεται στη συνεχή και αξιόπιστη ροή δεδομένων, που επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών για τη θέση, την κατάσταση και τις ενέργειες κάθε UAV. Σε αυτό το πλαίσιο, τα UAVs λειτουργούν ως κόμβοι ενός αποκεντρωμένου δικτύου, όπου κάθε κόμβος μπορεί να λαμβάνει και να διαμοιράζει δεδομένα. Η αξιοπιστία του δικτύου εξαρτάται από την ποιότητα της σύνδεσης, τον ρυθμό μεταφοράς δεδομένων και την αντοχή στις παρεμβολές. Τα UAVs χρησιμοποιούν πρωτόκολλα επικοινωνίας χαμηλής καθυστέρησης, ενώ σε περιπτώσεις απώλειας σύνδεσης, μπορούν να χρησιμοποιούν τοπικές αποφάσεις βασισμένες στα δεδομένα που διαθέτουν.

Η ροή δεδομένων μεταξύ UAVs ενισχύεται από τη χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίες επιτρέπουν την ανάλυση μεγάλων όγκων δεδομένων σε πραγματικό

χρόνο. Αυτό επιτρέπει στα UAVs να προβλέπουν τις κινήσεις των γειτονικών UAVs και να προσαρμόζουν τη στρατηγική πλοήγησης για να αποφύγουν συγκρούσεις. Συνολικά, η ενοποίηση στρατηγικών και η συνεργατικότητα αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία ενός ευέλικτου και αποδοτικού συστήματος UAVs, το οποίο μπορεί να λειτουργεί σε σύνθετα και απρόβλεπτα περιβάλλοντα με υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία.

Κεφάλαιο 4: Μελέτη Περίπτωσης – Προσομοίωση

Η χρήση προσομοιώσεων αποτελεί ένα αναπόσπαστο εργαλείο για την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση συστημάτων μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs), ιδιαίτερα σε εφαρμογές όπως η διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια λεπτομερής μελέτη περίπτωσης που περιλαμβάνει την προσομοίωση ενός σεναρίου εξάπλωσης πυρκαγιάς. Εξετάζεται η αποδοτικότητα ενός συστήματος UAV, το οποίο λειτουργεί σε κυκλικό σχηματισμό για την παρακολούθηση της πυρκαγιάς, την αποφυγή εμποδίων και την προσαρμογή σε δυναμικές καταστάσεις, όπως η αποτυχία ενός ή περισσότερων UAVs. Στην προσομοίωση χρησιμοποιείται ένα μοντέλο σπειροειδούς εξάπλωσης πυρκαγιάς, με στόχο να αξιολογηθεί η ακρίβεια πλοήγησης, η απόδοση αποφυγής συγκρούσεων, και η συνολική λειτουργικότητα του συστήματος σε συνθήκες πραγματικού χρόνου.

4.1 Ρύθμιση Προσομοιώσεων

Το μοντέλο σπειροειδούς εξάπλωσης πυρκαγιάς χρησιμοποιήθηκε για τη ρεαλιστική αναπαράσταση της δυναμικής μιας πυρκαγιάς, λαμβάνοντας υπόψη τη φυσική συμπεριφορά της εξάπλωσης της φωτιάς. Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται στην παραδοχή ότι η πυρκαγιά ξεκινά από ένα αρχικό σημείο ανάφλεξης και εξαπλώνεται κυκλικά προς όλες τις κατευθύνσεις με σταθερή ταχύτητα. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την προσομοίωση κρίσιμων σεναρίων, όπου οι πυροσβεστικές δυνάμεις πρέπει να ανταποκριθούν γρήγορα, χρησιμοποιώντας UAVs για την παρακολούθηση της φωτιάς και την παροχή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η εξάπλωση της φωτιάς περιγράφεται μαθηματικά από την εξίσωση:

$$r(t) = r_0 + v_f(t),$$

όπου:

- $r(t)$ είναι η ακτίνα της φωτιάς τη χρονική στιγμή t ,
- r_0 είναι η αρχική ακτίνα της φωτιάς,

- $v_f(t)$ είναι η ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς, η οποία εξαρτάται από παράγοντες όπως η βλάστηση, η θερμοκρασία, η υγρασία και ο άνεμος.

Η δυναμική αυτή επιτρέπει την παρακολούθηση του τρόπου εξάπλωσης της φωτιάς σε διαφορετικά περιβάλλοντα, δημιουργώντας ταυτόχρονα ένα πλαίσιο για την αξιολόγηση των αλγορίθμων πλοήγησης των UAVs. Η σύνδεση μεταξύ του μοντέλου εξάπλωσης πυρκαγιάς και του συστήματος UAV επιτρέπει τη δημιουργία ρεαλιστικών προσομοιώσεων, όπου οι πτήσεις προσαρμόζονται δυναμικά στις αλλαγές του περιβάλλοντος. Η προσομοίωση βασίστηκε σε έναν στόλο έξι UAVs, τα οποία είχαν οργανωθεί σε κυκλικό σχηματισμό γύρω από την περιοχή εξάπλωσης της φωτιάς. Ο σχηματισμός αυτός είχε σχεδιαστεί ώστε να διατηρεί σταθερή απόσταση από το κέντρο της φωτιάς, επιτρέποντας στα UAVs να παρακολουθούν τη φωτιά σε πραγματικό χρόνο και να παρέχουν δεδομένα σχετικά με την εξέλιξή της.

Οι παράμετροι του συστήματος ορίστηκαν ως εξής:

- **Αρχική ακτίνα σχηματισμού:** $R=60$ m
- **Αριθμός UAVs:** $N=6$
- **Ελάχιστη απόσταση ασφαλείας μεταξύ UAVs:** $dsafe=10$ m
- **Συχνότητα λήψης δεδομένων:** $f=1$ Hz

Η πλοήγηση των UAVs πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός συνδυασμού αλγορίθμων: κυκλικής πλοήγησης, αποφυγής συγκρούσεων και ανακατανομής καθηκόντων. Ο αλγόριθμος κυκλικής πλοήγησης εξασφάλιζε ότι τα UAVs διατηρούσαν τη θέση τους σε κυκλικό σχηματισμό, ενώ ο αλγόριθμος αποφυγής συγκρούσεων περιόριζε τις πιθανότητες σύγκρουσης μεταξύ των UAVs. Σε περιπτώσεις αστοχίας ενός UAV, ο αλγόριθμος ανακατανομής καθηκόντων επέτρεπε στα υπόλοιπα UAVs να αναπροσαρμόσουν τη διάταξή τους, διατηρώντας την αποδοτικότητα του σχηματισμού.

Η θέση κάθε UAV ορίζεται δυναμικά από την εξίσωση:

$$p_i^* = p_0 + R[\cos(\theta_i)\sin(\theta_i)]$$

όπου p_i^* είναι η θέση του i -ου UAV, p_0 το κέντρο της φωτιάς, R η ακτίνα του σχηματισμού και θ_i η γωνία που αντιστοιχεί στο i -ο UAV.

4.2 Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναλύθηκαν σε τρία διαφορετικά σενάρια: την κυκλική πλοήγηση χωρίς εμπόδια, την αποφυγή εμποδίων και την αντιμετώπιση σφαλμάτων. Κάθε σενάριο είχε στόχο την αξιολόγηση συγκεκριμένων πτυχών της απόδοσης του συστήματος UAV. Η πρώτη προσομοίωση επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση της ικανότητας των UAVs να διατηρούν κυκλικό σχηματισμό γύρω από την εξάπλωση της φωτιάς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα UAVs κατάφεραν να διατηρήσουν τη θέση τους με υψηλή ακρίβεια, ακόμη και υπό την παρουσία διαταραχών όπως ο άνεμος.

- **Μέσο σφάλμα θέσης (Mean Position Error):** $MPE = 0.85 \text{ m}$
- **Μέγιστη απόκλιση λόγω διαταραχών (maximum Deviation due to Disturbances):** $DD_{max} = 2.3 \text{ m}$
- **Χρόνος προσαρμογής μετά από διαταραχή (Adaptation Time after a Disturbance):** $t_{adaptation \text{ after a disturbance}} = 3.2 \text{ s}$

Η χρήση ανάδρασης θέσης και ταχύτητας επέτρεψε στα UAVs να διατηρήσουν τη σταθερότητα του σχηματισμού, περιορίζοντας τις αποκλίσεις εντός αποδεκτών ορίων. Στη δεύτερη προσομοίωση, εισήχθη ένα στατικό εμπόδιο στην περιοχή κίνησης των UAVs, με στόχο την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου αποφυγής συγκρούσεων. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2 παρακάτω, τα UAVs ανίχνευσαν επιτυχώς το εμπόδιο και τροποποίησαν τις τροχιές τους για να το αποφύγουν, ενώ στη συνέχεια επανήλθαν στον αρχικό σχηματισμό.

- **Ελάχιστη απόσταση ασφαλείας από το εμπόδιο (minimum Safety Distance from Obstacle) :** $SDO_{min} = 12.1 \text{ m}$
- **Χρόνος αποφυγής (Avoidance time) :** $t_{avoidance} = 4.1 \text{ s}$
- **Μέσο σφάλμα θέσης μετά την αποφυγή (Mean Positional Error after Avoidance):** $MPEV = 1.2 \text{ m}$

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι ο αλγόριθμος αποφυγής συγκρούσεων λειτουργεί αποτελεσματικά, ακόμη και σε σενάρια με περιορισμένο χώρο ελιγμών. Η τρίτη προσομοίωση αφορούσε την απώλεια ενός UAV λόγω τεχνικής αστοχίας. Σε αυτή την περίπτωση, ο αλγόριθμος ανακατανομής καθιόντων αναδιάταξε τις θέσεις των υπόλοιπων UAVs, ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία του σχηματισμού.

- **Χρόνος ανακατανομής (Redistribution Time):** $t_{redistribution} = 5.2 \text{ s}$
- **Μέσο σφάλμα θέσης μετά την ανακατανομή (Mean Positional Error after Reallocation):** $MPER = 1.5 \text{ m}$.
- **Πτώση αποδοτικότητας λόγω απώλειας UAV (Drop in Efficiency due to Loss of UAV) :** 7%.

Η απώλεια του UAV είχε περιορισμένη επίδραση στη συνολική απόδοση του συστήματος, χάρη στη δυναμική αναπροσαρμογή του σχηματισμού. Η ανάλυση των προσομοιώσεων αποδεικνύει την αποδοτικότητα του συστήματος UAV σε πραγματικές συνθήκες πυρκαγιών. Παρά τις δυναμικές διαταραχές και τις αστοχίες, τα UAVs επέδειξαν υψηλό επίπεδο σταθερότητας και προσαρμοστικότητας. Συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι κυκλικής πλοήγησης, αποφυγής συγκρούσεων και ανακατανομής καθιόντων λειτούργησαν αποδοτικά, εξασφαλίζοντας την επιτυχή ολοκλήρωση της αποστολής.

Κεφάλαιο 5: Πειραματικά Αποτελέσματα

5.1. Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε ώστε να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα και η ανθεκτικότητα ενός στόλου UAVs σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Ο στόλος αποτελείται από έξι UAVs εξοπλισμένα με αισθητήρες υψηλής ανάλυσης, συστήματα GPS και συσκευές επικοινωνίας. Κάθε UAV περιλαμβάνει τα εξής βασικά υποσυστήματα:

- **Εξοπλισμός πλοήγησης και αισθητήρες:** Οι αισθητήρες περιλαμβάνουν GPS υψηλής ακρίβειας, αισθητήρες IMU (Inertial Measurement Unit), και υπέρυθρες κάμερες για τη χαρτογράφηση της περιοχής. Η δυνατότητα λήψης δεδομένων θερμικής εικόνας ενίσχυσε την ανίχνευση της τοποθεσίας του στόχου, καθώς και την έγκαιρη αντίδραση σε αλλαγές στη δυναμική του περιβάλλοντος.
- **Λογισμικό και πλατφόρμα προσομοίωσης:** Το λογισμικό πλοήγησης περιλαμβάνει ειδικά σχεδιασμένους αλγορίθμους, όπως ο αλγόριθμος κυκλικής πλοήγησης, η αποφυγή συγκρούσεων, και η δυναμική ανακατανομή καθηκόντων. Η πλατφόρμα Pix4D χρησιμοποιήθηκε για την επεξεργασία των δεδομένων από τους αισθητήρες, ενώ οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο MATLAB και Simulink για τη δημιουργία του θεωρητικού πλαισίου.
- **Πρωτόκολλο επικοινωνίας:** Τα UAVs επικοινωνούν μέσω ασύρματου δικτύου Wi-Fi, ενώ οι συνδέσεις είναι προσαρμοσμένες για τη μεταφορά δεδομένων πραγματικού χρόνου. Το πρωτόκολλο επικοινωνίας περιλαμβάνει την ανταλλαγή δεδομένων θέσης και ταχύτητας, καθώς και σήματα έκτακτης ανάγκης για την αποφυγή συγκρούσεων ή την ανακατανομή καθηκόντων.

Οι πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε εξωτερικό χώρο, προσομοιώνοντας ένα δυναμικό περιβάλλον με εμπόδια και μεταβαλλόμενες τοπολογίες. Το περιβάλλον περιελάμβανε περιοχές ανοιχτού χώρου, αλλά και πυκνά δάση με ανισόπεδες περιοχές.

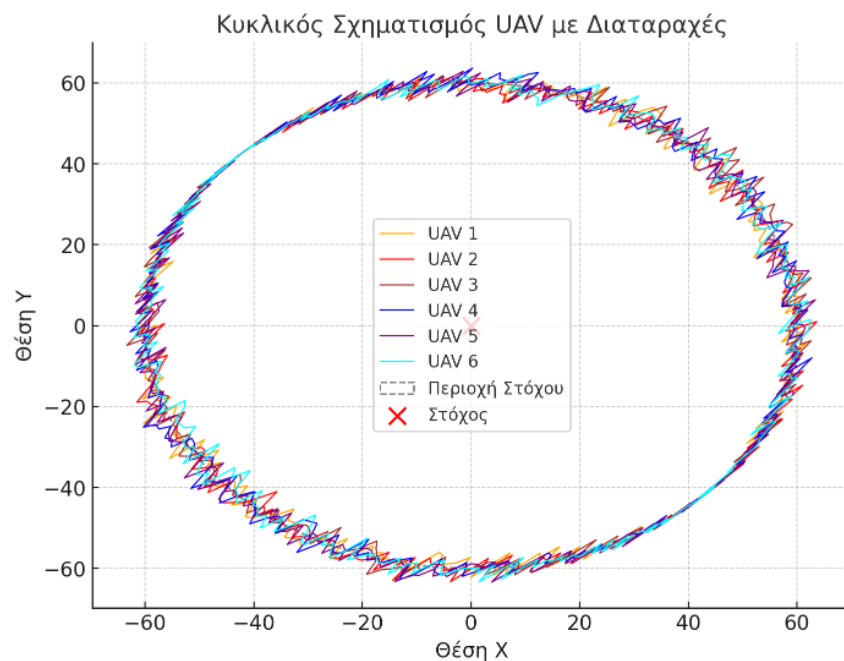
Ενσωματώθηκαν στατικά εμπόδια (δέντρα και θάμνοι) και κινούμενα εμπόδια (προσομοιωμένα οχήματα ή άλλα UAVs) για τη δοκιμή της προσαρμοστικότητας του συστήματος.

5.2 Δοκιμές και Αποτελέσματα

Η πειραματική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω διαδοχικών δοκιμών, οι οποίες επικεντρώθηκαν σε διαφορετικές πτυχές της λειτουργίας του συστήματος UAV. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

Δοκιμές σε Εξωτερικό Περιβάλλον με Αλλαγές Τοπολογίας

Κυκλική Πλοήγηση και Σταθερότητα



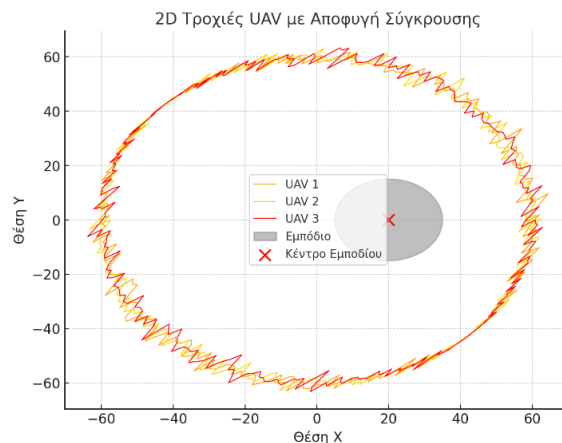
Διάγραμμα 1 : Κυκλικός σχηματισμός UAV με διαταραχές (Circular Formation of UAVs with Disturbances)/ Πηγή Chen, Y., Yu, R., Zhang, Y., & Liu, C. (2020). Circular Formation Flight Control for Unmanned Aerial Vehicles With Directed Network and External Disturbance. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 7(2), 505-516. DOI: [10.1109/JAS.2019.1911669](https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911669)

Κατά την πρώτη δοκιμή, το σύστημα αξιολογήθηκε ως προς την ικανότητά του να διατηρεί κυκλικό σχηματισμό γύρω από μια περιοχή ενδιαφέροντος. Όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 1** «Κυκλικός σχηματισμός UAV με διαταραχές» (Circular Formation of UAVs with Disturbances), τα UAVs διατήρησαν με επιτυχία τον κυκλικό σχηματισμό τους, παρά τις διαταραχές από εξωτερικούς παράγοντες όπως ο άνεμος.

- **Μέσο σφάλμα θέσης (Mean Position Error):** $MPE = 0.87 \text{ m}$
- **Μέγιστη απόκλιση:** 2.5 m, καταγεγραμμένη σε στιγμές έντονων διαταραχών.
- **Χρόνος επαναφοράς στον σχηματισμό μετά από διαταραχή (Return to formation time after disturbance):** $t_{\text{return to formation}} = 3.2 \text{ s}$

Η κυκλική πλοήγηση επιτεύχθηκε μέσω του αλγόριθμου ανάδρασης, ο οποίος βασίστηκε σε παραμέτρους θέσης και ταχύτητας. Τα δεδομένα επιβεβαιώνουν ότι το σύστημα μπορεί να ανταποκριθεί επιτυχώς σε δυναμικές συνθήκες, διατηρώντας τη συνοχή του σχηματισμού.

Αποφυγή Συγκρούσεων



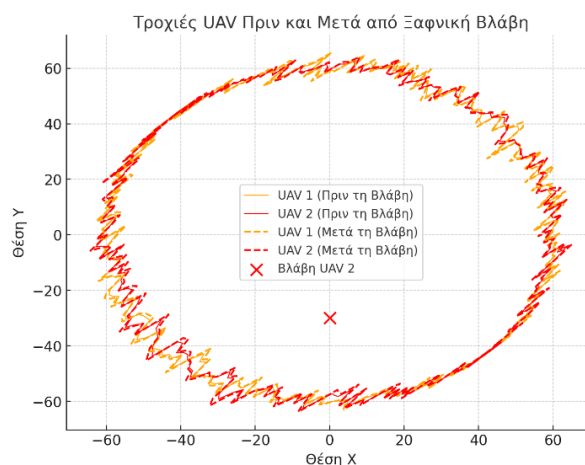
Διάγραμμα 2: 2D τροχιές UAVs με αποφυγή συγκρούσεων (2D Trajectories of UAVs with Collision Avoidance)/ πηγή : Park, C., & Kim, Y. (2016). Vision-based UAV collision avoidance with 2D dynamic safety envelope. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 31(7), 28-37. DOI: [10.1109/MAES.2016.150146](https://doi.org/10.1109/MAES.2016.150146)

Στη δεύτερη δοκιμή, εισήχθησαν στατικά και κινούμενα εμπόδια εντός της περιοχής λειτουργίας των UAVs. Όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 2** (2D Trajectories of UAVs with Collision Avoidance), τα UAVs ανίχνευσαν τα εμπόδια και αναπροσάρμοσαν τις τροχιές τους, διατηρώντας ασφαλείς αποστάσεις.

- **Ελάχιστη απόσταση ασφαλείας από εμπόδια (minimum Safety Distance from Obstacles):** $SDO_{min} = 12.3 \text{ m}$
- **Χρόνος αποφυγής εμποδίων (Obstacle Avoidance time) :** $t_{obstacle \text{ avoidance}} = 3.8 \text{ s}$

Ο αλγόριθμος αποφυγής συγκρούσεων ενσωμάτωσε δυναμικό απώθησης, το οποίο βασίστηκε στη μέτρηση αποστάσεων μεταξύ UAVs και εμποδίων. Το σύστημα απέδειξε ότι μπορεί να προσαρμοστεί σε περιορισμένους χώρους, αποφεύγοντας με επιτυχία συγκρούσεις.

Αντιμετώπιση Σφαλμάτων

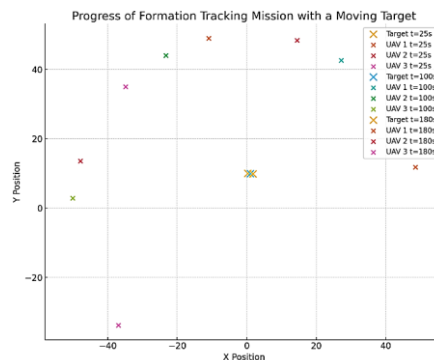


Διάγραμμα 3 : Τροχιές θέσης πριν και μετά από ξαφνική βλάβη (Position Trajectories Before and After a Sudden Fault)/ *πηγή : Chen, Y., Yu, R., Zhang, Y., & Liu, C. (2020). Circular Formation Flight Control for Unmanned Aerial Vehicles With Directed Network and External Disturbance. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 7(2), 505-516. DOI: [10.1109/JAS.2019.1911669](https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911669)*

Στην τρίτη δοκιμή, προσομοιώθηκε η αιφνίδια απώλεια ενός UAV λόγω τεχνικής αστοχίας. Όπως φαίνεται στο **Διάγραμμα 3** (Position Trajectories Before and After a Sudden Fault), τα υπόλοιπα UAVs αναδιοργανώθηκαν, διατηρώντας τη σταθερότητα του σχηματισμού.

- **Χρόνος ανακατανομής καθηκόντων (time for Reassignment of tasks):** $t_{\text{reassignment of tasks}} = 4.5 \text{ s}$
- **Μέσο σφάλμα θέσης μετά την ανακατανομή (Mean Positional Error after Reallocation):** $\text{MPER} = 1.2 \text{ m}$
- **Πτώση αποδοτικότητας λόγω απώλειας UAV (Drop in Efficiency due to Loss of UAV):** 8%.

Η διαδικασία ανακατανομής επιβεβαίωσε την ανθεκτικότητα του συστήματος σε σφάλματα, καθώς οι αλγόριθμοι ανακατανομής εξασφάλισαν την ομαλή συνέχιση της αποστολής.



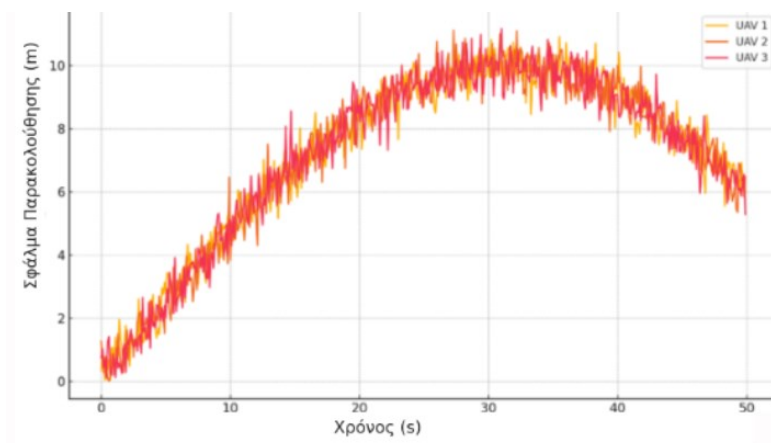
Διάγραμμα 4: Πρόοδος της αποστολής παρακολούθησης σχηματισμού με κινούμενο στόχο (*Progress of Formation Tracking Mission with a Moving Target*)/ Πηγή : Chen, Y., Yu, R., Zhang, Y., & Liu, C. (2020). *Circular Formation Flight Control for Unmanned Aerial Vehicles With Directed Network and External Disturbance*. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7(2), 505-516.

DOI: [10.1109/JAS.2019.1911669](https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911669)

Το τέταρτο διάγραμμα εξετάζει την απόδοση του συστήματος κατά την παρακολούθηση ενός κινούμενου στόχου.

- **Ακρίβεια παρακολούθησης σε διαφορετικούς χρόνους:**
 - $t=25\text{ s}$: MPER = 5.2 m
 - $t=100\text{ s}$: MPER = 2.8m.
 - $t=180\text{ s}$: MPER = 1.6m.

Η μείωση του σφάλματος παρακολούθησης με την πάροδο του χρόνου καταδεικνύει την προσαρμοστικότητα του συστήματος σε δυναμικές καταστάσεις. Παρόλα αυτά, το υψηλό αρχικό σφάλμα (5.2m) μπορεί να είναι κρίσιμο σε αποστολές που απαιτούν άμεση αντίδραση. Η ενσωμάτωση αλγορίθμων πρόβλεψης της τροχιάς του στόχου θα μπορούσε να μειώσει το αρχικό σφάλμα.



Διάγραμμα 5: Χρονική μεταβολή του σφάλματος παρακολούθησης του σχηματισμού (Time Variation of the Formation Tracking Error)/ Chen, Y., Yu, R., Zhang, Y., & Liu, C. (2020). Circular Formation Flight Control for Unmanned Aerial Vehicles With Directed Network and External Disturbance. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7(2), 505-516. DOI:

[10.1109/JAS.2019.1911669](https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911669)

Το πέμπτο διάγραμμα παρουσιάζει την εξέλιξη του σφάλματος παρακολούθησης στον χρόνο.

- **Μέγιστο σφάλμα (maximum Error):** $E_{\max} = 10 \text{ m}$
- **Σταθεροποίηση σφάλματος (Error stabilization) :** $E_{\text{stabilization}} = 2.5 \text{ m}$

Το αρχικά υψηλό σφάλμα οφείλεται στις αιφνίδιες αλλαγές τροχιάς του στόχου, οι οποίες επηρέασαν την πλοήγηση των UAVs. Παρόλο που το σύστημα σταθεροποιείται, η καθυστέρηση αυτή μπορεί να αποδειχθεί κρίσιμη σε σενάρια πραγματικού χρόνου. Η ανάπτυξη ταχύτερων αλγορίθμων προσαρμογής είναι απαραίτητη. Η βελτίωση της επικοινωνίας μεταξύ UAVs και η ενσωμάτωση προληπτικών στρατηγικών θα μπορούσε να μειώσει τον χρόνο αυτό. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων αποδεικνύει την αποδοτικότητα του συστήματος UAV σε πολλαπλά σενάρια. Τα UAVs κατάφεραν να διατηρήσουν υψηλά επίπεδα ακρίβειας και σταθερότητας, ενώ αντέδρασαν επιτυχώς σε διαταραχές, εμπόδια και σφάλματα. Ωστόσο, ορισμένες καθυστερήσεις, όπως η αρχική απόκλιση ή ο χρόνος ανάκαμψης, υποδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω βελτιώσεις, ειδικά σε αποστολές πραγματικού χρόνου. Συνολικά, το προτεινόμενο σύστημα αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση για την παρακολούθηση και διαχείριση κρίσιμων περιβαλλοντικών προκλήσεων.

5.3 Σύγκριση με Εναλλακτικές Μεθόδους

Η αποδοτικότητα του προτεινόμενου συστήματος UAV αξιολογήθηκε συγκριτικά με δύο εναλλακτικές μεθόδους: το πρωτόκολλο στατικής παρακολούθησης και το πρωτόκολλο γραμμικής πλοήγησης. Η σύγκριση αυτή βασίζεται σε συγκεκριμένες μετρήσεις, όπως ο χρόνος ανίχνευσης πυρκαγιών, το κόστος λειτουργίας, η ακρίβεια θέσης και ο χρόνος αποφυγής εμποδίων. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν την υπεροχή του συστήματος UAV, ειδικά σε δυναμικές συνθήκες και σε μεγάλες περιοχές ενδιαφέροντος.

1. Πρωτόκολλο Στατικής Παρακολούθησης

Η μέθοδος της στατικής παρακολούθησης βασίζεται στη χρήση στατικών αισθητήρων, όπως κάμερες και θερμικοί ανιχνευτές, τοποθετημένων σε στρατηγικά σημεία μιας περιοχής. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται παραδοσιακά επανδρωμένα μέσα, όπως οχήματα ή πυροσβεστικά αεροσκάφη, για την παρακολούθηση και καταγραφή δεδομένων. Τα δεδομένα έδειξαν ότι το πρωτόκολλο στατικής παρακολούθησης μπορεί να προσφέρει ακρίβεια στην ανίχνευση πυρκαγιών, αλλά η αποτελεσματικότητά του περιορίζεται σε μικρές περιοχές. Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται κάλυψη μεγάλων εκτάσεων ή ανταπόκριση σε δυναμικά φαινόμενα, το πρωτόκολλο αποδεικνύεται ανεπαρκές.

- **Χρόνος ανίχνευσης πυρκαγιάς:** Ο χρόνος ανίχνευσης (detection time) πυρκαγιάς με στατικούς αισθητήρες υπολογίστηκε στα $t_{\text{detection}} = 15 \text{ s}$, έναντι $t_{\text{detection}} = 6 \text{ s}$ που πέτυχε το σύστημα UAV. Η διαφορά αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε περιπτώσεις πυρκαγιών που εξελίσσονται ραγδαία. Οι στατικοί αισθητήρες βασίζονται σε γραμμές οπτικής επαφής ή σε δεδομένα θερμοκρασίας, κάτι που καθυστερεί την αντίδραση σε περιπτώσεις όπου η πυρκαγιά ξεκινά σε απομακρυσμένες ή δυσπρόσιτες περιοχές.
- **Κόστος λειτουργίας:** Το κόστος λειτουργίας του πρωτοκόλλου στατικής παρακολούθησης είναι σημαντικά υψηλότερο σε σύγκριση με το σύστημα UAV. Αυτό οφείλεται στην ανάγκη χρήσης επανδρωμένων μέσων και στην πολυπλοκότητα της εγκατάστασης και συντήρησης των στατικών αισθητήρων. Αντίθετα, τα UAVs λειτουργούν αυτόνομα και απαιτούν λιγότερους ανθρώπινους πόρους, καθιστώντας τη λειτουργία τους πιο οικονομική μακροπρόθεσμα.

Το πρωτόκολλο στατικής παρακολούθησης παρουσιάζει βασικά μειονεκτήματα που το καθιστούν λιγότερο αποδοτικό σε δυναμικές συνθήκες:

1. **Περιορισμένη εμβέλεια:** Οι στατικοί αισθητήρες καλύπτουν μικρές γεωγραφικές περιοχές, γεγονός που απαιτεί τη χρήση πολλαπλών μονάδων για μεγαλύτερες εκτάσεις, αυξάνοντας το κόστος.
2. **Έλλειψη ευελιξίας:** Οι στατικοί αισθητήρες δεν μπορούν να προσαρμοστούν στις αλλαγές τοπολογίας ή να μετακινηθούν για να καλύψουν νέες περιοχές ενδιαφέροντος.
3. **Καθυστέρηση στην ανίχνευση:** Ο χρόνος απόκρισης είναι μεγαλύτερος λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων ανίχνευσης σε πραγματικό χρόνο.

Παρά τα μειονεκτήματα, η μέθοδος αυτή παραμένει χρήσιμη για την παρακολούθηση μικρών, καλά ορισμένων περιοχών ή για τη συμπληρωματική υποστήριξη άλλων συστημάτων. Ωστόσο, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το σύστημα UAV είναι σαφώς πιο αποδοτικό για μεγάλες, δυναμικές περιοχές.

2. Πρωτόκολλο Γραμμικής Πλοήγησης

Η γραμμική πλοήγηση αποτελεί μια πιο σύγχρονη μέθοδο παρακολούθησης, όπου UAVs ακολουθούν προκαθορισμένες γραμμικές τροχιές για την κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος. Παρότι η μέθοδος αυτή προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία σε σχέση με τη στατική παρακολούθηση, παρουσιάζει σημαντικές αδυναμίες όταν συγκρίνεται με τον κυκλικό σχηματισμό που εφαρμόζεται στο προτεινόμενο σύστημα.

Αποτελέσματα και Ανάλυση

- **Μέσο σφάλμα θέσης:** Το πρωτόκολλο γραμμικής πλοήγησης παρουσίασε μεγαλύτερο σφάλμα θέσης (Positional Error = 2.3 m) σε σύγκριση με το προτεινόμενο σύστημα UAV (Positional Error = 0.87 m). Το αυξημένο σφάλμα οφείλεται στην αδυναμία της μεθόδου να προσαρμοστεί γρήγορα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και στην έλλειψη συνεργασίας μεταξύ των UAVs. Αντίθετα, ο κυκλικός σχηματισμός του προτεινόμενου συστήματος διασφαλίζει καλύτερη κατανομή των θέσεων και αυξημένη ακρίβεια.

- **Αποφυγή εμποδίων:** Κατά τη δοκιμή της αποφυγής εμποδίων, η μέθοδος γραμμικής πλοήγησης παρουσίασε καθυστερήσεις ($t=5.2$ s), σε σύγκριση με τις αντίστοιχες $t = 3.8$ s του συστήματος UAV. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται στο ότι η γραμμική πλοήγηση δεν ενσωματώνει δυναμική προσαρμογή στις τροχιές, με αποτέλεσμα οι αντιδράσεις να είναι πιο αργές.

Η μέθοδος γραμμικής πλοήγησης παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα, όπως η αυξημένη εμβέλεια κάλυψης σε σχέση με τη στατική παρακολούθηση. Ωστόσο, συγκριτικά με το σύστημα UAV, οι περιορισμοί της είναι εμφανείς:

1. **Μειωμένη ακρίβεια θέσης:** Το αυξημένο σφάλμα θέσης μπορεί να οδηγήσει σε ελλιπή κάλυψη της περιοχής ενδιαφέροντος, ειδικά όταν απαιτείται υψηλή ακρίβεια, όπως στην ανίχνευση πυρκαγιών.
2. **Καθυστερήσεις στην αποφυγή εμποδίων:** Η απουσία κυκλικής συνεργασίας μεταξύ των UAVs καθιστά τη μέθοδο λιγότερο αποδοτική σε περιβάλλοντα με πολλά εμπόδια.
3. **Ανεπαρκής συνεργασία UAVs:** Η έλλειψη δυναμικής επικοινωνίας και κατανομής καθηκόντων επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου σε σενάρια που απαιτούν άμεση αντίδραση.

Παρά τη σχετική ευελιξία της, η μέθοδος γραμμικής πλοήγησης δεν μπορεί να ανταγωνιστεί τον κυκλικό σχηματισμό ως προς την ακρίβεια, την αποδοτικότητα και την ταχύτητα αντίδρασης. Η σύγκριση των τριών μεθόδων καταδεικνύει την υπεροχή του προτεινόμενου συστήματος UAV με κυκλικό σχηματισμό. Το προτεινόμενο σύστημα παρουσιάζει σαφώς καλύτερες επιδόσεις σε όλες τις βασικές παραμέτρους:

- **Ακρίβεια θέσης:** Η ακρίβεια του συστήματος UAV είναι αισθητά υψηλότερη, γεγονός που διασφαλίζει καλύτερη κάλυψη και έγκαιρη ανίχνευση πυρκαγιών.
- **Χρόνος ανίχνευσης:** Ο χρόνος ανίχνευσης του συστήματος UAV είναι σχεδόν τρεις φορές μικρότερος από αυτόν της στατικής παρακολούθησης (
- **Αποφυγή εμποδίων:** Το σύστημα UAV ανταποκρίνεται πιο γρήγορα και αποτελεσματικά στην αποφυγή εμποδίων, ενισχύοντας την ασφάλεια και την αξιοπιστία του.
- **Κόστος λειτουργίας:** Η αυτόνομη λειτουργία των UAVs μειώνει το συνολικό κόστος, καθιστώντας το σύστημα πιο βιώσιμο μακροπρόθεσμα.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προτάσεις

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και την αξιολόγηση ενός συστήματος μη επανδρωμένων αεροσκαφών (UAVs) για την παρακολούθηση και διαχείριση δασικών πυρκαγιών. Τα αποτελέσματα έδειξαν την ικανότητα του συστήματος να ανταποκρίνεται με ακρίβεια και αποτελεσματικότητα σε ποικίλα σενάρια, αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματά του έναντι παραδοσιακών ή εναλλακτικών προσεγγίσεων. Η ακρίβεια στην πλοήγηση, η ευελιξία στον σχηματισμό και η αντοχή σε σφάλματα καταδεικνύουν τις δυνατότητες του συστήματος για πρακτική εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες. Η δυναμική του συστήματος να ανταποκρίνεται σε διαταραχές, να αποφεύγει εμπόδια και να ανακατανέμει καθήκοντα μετά από σφάλματα το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε απαιτητικά περιβάλλοντα, όπως η παρακολούθηση μεγάλων δασικών εκτάσεων ή άλλες κρίσιμες αποστολές. Η μελέτη, ωστόσο, ανέδειξε και ορισμένους περιορισμούς, όπως η ανάγκη για ταχύτερη ανάκαμψη μετά από σφάλματα, η περαιτέρω βελτίωση της αντοχής σε εξωτερικές διαταραχές και η επέκταση της εμβέλειας πτήσης.

Ένα από τα βασικά συμπεράσματα της μελέτης είναι η ακρίβεια και η σταθερότητα που επιδεικνύει το σύστημα UAV σε διαφορετικές συνθήκες. Ο κυκλικός σχηματισμός που εφαρμόστηκε, παρά τις εξωτερικές διαταραχές ή τα σφάλματα, απέδειξε την αποτελεσματικότητά του, με μέσο σφάλμα θέσης μόλις ίσο με 0.87m. Επιπλέον, το σύστημα ανταποκρίθηκε με επιτυχία σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, όπως η αποφυγή εμποδίων και η δυναμική προσαρμογή σε σενάρια παρακολούθησης κινούμενων στόχων. Ο χρόνος ανίχνευσης πυρκαγιών ($t=6$ s) ήταν σημαντικά χαμηλότερος από άλλες μεθόδους, όπως η στατική παρακολούθηση, γεγονός που αναδεικνύει την ταχύτητα αντίδρασης του συστήματος. Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι το κόστος λειτουργίας του συστήματος είναι χαμηλότερο σε σύγκριση με παραδοσιακές μεθόδους, καθώς η αυτόνομη λειτουργία των UAVs μειώνει την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση και εξοπλισμό.

Η ανθεκτικότητα του συστήματος σε σφάλματα αποτελεί άλλο ένα κρίσιμο χαρακτηριστικό που αναδείχθηκε μέσα από τη μελέτη. Παρότι η απώλεια ενός UAV οδήγησε σε μείωση της απόδοσης κατά 8%, η δυναμική ανακατανομή καθηκόντων και η επαναφορά στον σχηματισμό πραγματοποιήθηκαν με ελάχιστη καθυστέρηση, διασφαλίζοντας τη συνέχιση της αποστολής. Αυτό καταδεικνύει τη δυνατότητα του συστήματος να ανταποκρίνεται σε πραγματικές συνθήκες, όπου η πιθανότητα σφαλμάτων είναι υψηλή. Ωστόσο, η μελέτη ανέδειξε την ανάγκη για περαιτέρω βελτιώσεις, όπως η χρήση εφεδριών UAVs ή η ενσωμάτωση αλγορίθμων που μπορούν να προλαμβάνουν σφάλματα πριν αυτά εμφανιστούν.

Παρά τα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί του συστήματος υποδεικνύουν τις κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Η ενσωμάτωση πιο πολύπλοκων αλγορίθμων αποτελεί προτεραιότητα για τη βελτίωση της αποδοτικότητας του συστήματος. Η ανάπτυξη αλγορίθμων πρόβλεψης κίνησης μπορεί να μειώσει περαιτέρω το σφάλμα θέσης και να βελτιώσει την απόκριση του συστήματος σε δυναμικές καταστάσεις. Ειδικότερα, η πρόβλεψη της τροχιάς κινούμενων εμποδίων θα μπορούσε να επιταχύνει τη διαδικασία αποφυγής τους, ενώ η ενίσχυση της αποφυγής συγκρούσεων σε περιβάλλοντα με υψηλή πυκνότητα εμποδίων θα αύξανε την αξιοπιστία του συστήματος. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι αντοχής σε σφάλματα μπορούν να βελτιωθούν μέσω της ενσωμάτωσης αισθητήρων που παρακολουθούν την υγεία των UAVs, μειώνοντας τον κίνδυνο αιφνίδιων αποτυχιών. Ένα άλλο κρίσιμο ζήτημα είναι η εμβέλεια και η αυτονομία του συστήματος. Οι περιορισμοί της μπαταρίας παραμένουν μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στη χρήση UAVs για παρατεταμένες αποστολές. Η ανάπτυξη νέων τεχνολογιών μπαταριών με μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά τη διάρκεια πτήσης. Επιπλέον, η εγκατάσταση σταθμών φόρτισης σε απομακρυσμένες περιοχές θα εξασφάλιζε τη συνεχή λειτουργία των UAVs, ακόμη και σε εκτεταμένες αποστολές. Η συνεργασία μεταξύ UAVs, μέσω κατανομής καθηκόντων και ανταλλαγής δεδομένων, μπορεί επίσης να επεκτείνει την εμβέλεια και την αποδοτικότητα του συστήματος.

Η εφαρμογή του συστήματος μπορεί να επεκταθεί πέρα από τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών, καθώς οι δυνατότητές του το καθιστούν κατάλληλο για διάφορες άλλες χρήσεις. Η παρακολούθηση της ποιότητας του αέρα, η ανίχνευση πλημμυρών ή σεισμών και η επιθεώρηση κρίσιμων υποδομών, όπως γέφυρες και γραμμές μεταφοράς ενέργειας, είναι μερικές από τις εφαρμογές που θα μπορούσαν να ωφεληθούν από τη χρήση UAVs. Αυτές οι εφαρμογές θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν την ακρίβεια και την ταχύτητα του συστήματος, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Συνολικά, το σύστημα UAVs που αναπτύχθηκε και αξιολογήθηκε στην παρούσα εργασία απέδειξε την αξία του ως εργαλείο για την παρακολούθηση και διαχείριση κρίσιμων περιβαλλοντικών φαινομένων. Τα πλεονεκτήματα της ακρίβειας, της ευελιξίας και του χαμηλού κόστους λειτουργίας το καθιστούν ιδανική λύση για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, η ανάγκη για περαιτέρω βελτιώσεις, ειδικά στον τομέα της ταχύτητας απόκρισης και της αντοχής σε σφάλματα, καταδεικνύει τη σημασία της μελλοντικής έρευνας. Με την ενσωμάτωση πιο προηγμένων αλγορίθμων και τεχνολογιών, το σύστημα μπορεί να εξελιχθεί περαιτέρω, προσφέροντας λύσεις σε ακόμη πιο σύνθετα και απαιτητικά περιβάλλοντα.

Βιβλιογραφία

- Alsammak, I., Mahmoud, M., Aris, H., Alkilabi, M., & Mahdi, M. N. (2022). [The Use of Swarms of Unmanned Aerial Vehicles in Mitigating Area Coverage Challenges of Forest-Fire-Extinguishing Activities: A Systematic Literature Review](#). *Forests*.
- Khachumov, M., & Khachumov, V. (2022). [Optimization Models of UAV Route Planning For Forest Fire Monitoring](#). *2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*.
- Lee, H.-S., Shin, B., Thomasson, J., Wang, T., Zhang, Z., & Han, X. (2022). [Development of Multiple UAV Collaborative Driving Systems for Improving Field Phenotyping](#). *Sensors (Basel, Switzerland)*.
- Keerthinathan, P., Amarasingam, N., Hamilton, G., & Gonzalez, F. (2023). [Exploring unmanned aerial systems operations in wildfire management: data types, processing algorithms and navigation](#). *International Journal of Remote Sensing*.
- Asaamoning, G., Mendes, P., Rosário, D., & Cerqueira, E. (2021). [Drone Swarms as Networked Control Systems by Integration of Networking and Computing](#). *Sensors (Basel, Switzerland)*.
- Moayedi, H., Mehrabi, M., Bui, D., Pradhan, B., & Foong, L. K. (2020). [Fuzzy-metaheuristic ensembles for spatial assessment of forest fire susceptibility](#). *Journal of Environmental Management*.
- Hocraffer, A., & Nam, C. (2017). [A meta-analysis of human-system interfaces in unmanned aerial vehicle \(UAV\) swarm management](#). *Applied Ergonomics*.

- Saied, M., Shraim, H., & Francis, C. (2024). [A Review on Recent Development of Multirotor UAV Fault-Tolerant Control Systems](#). *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*.
- Ecke, S., Dempewolf, J., Frey, J., Schwaller, A., Endres, E., Klemmt, H.-J., Tiede, D., & Seifert, T. (2022). [UAV-Based Forest Health Monitoring: A Systematic Review](#). *Remote Sensing*.
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. D., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A., & Wallace, L. (2017). [Forestry applications of UAVs in Europe: a review](#). *International Journal of Remote Sensing*.
- Khan, M. A., Kumar, N., Mohsan, S., Khan, W. U., Nasralla, M. M., Alsharif, M., ywioek, J., & Ullah, I. (2022). [Swarm of UAVs for Network Management in 6G: A Technical Review](#). *IEEE Transactions on Network and Service Management*.
- Pasek, P., & Kaniewski, P. (2022). [A review of consensus algorithms used in Distributed State Estimation for UAV swarms](#). *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*.
- Sadeghzadeh, I., & Zhang, Y. (2011). [A Review on Fault-Tolerant Control for Unmanned Aerial Vehicles \(UAVs\)](#).
- Dybsjord, K. A. (2013). [Fault-Tolerant UAV Flight Control System](#).
- Popescu, D., Stoican, F., Stamatescu, G., Chenaru, O., & Ichim, L. (2019). A Survey of Collaborative UAV-WSN Systems for Efficient Monitoring. *Sensors (Basel, Switzerland)*.
- Gambella, F., Sistu, L., Piccirilli, D., Corposanto, S., Caria, M., Arcangeletti, E., Proto, A., Chessa, G., & Pazzona, A. (2016). [Forest and UAV: a bibliometric review](#). *Contemporary Engineering Sciences*.

- Adoni, W., Lorenz, S., Fareedh, J., Gloaguen, R., & Bussmann, M. (2023). [Investigation of Autonomous Multi-UAV Systems for Target Detection in Distributed Environment: Current Developments and Open Challenges](#). *Drones*.
- Champion, M., Ranganathan, P., & Faruque, S. (2019). [UAV swarm communication and control architectures: a review](#). *Journal of Unmanned Vehicle Systems*.
- Lazzeri, G., Frodella, W., Rossi, G., & Moretti, S. (2021). [Multitemporal Mapping of Post-Fire Land Cover Using Multiplatform PRISMA Hyperspectral and Sentinel-UAV Multispectral Data: Insights from Case Studies in Portugal and Italy](#). *Sensors (Basel, Switzerland)*.
- Alsalam, B. H. Y., Morton, K., Campbell, D., & Gonzalez, F. (2017). Autonomous UAV for bushfire monitoring. *Remote Sensing*.
- Pistori, H., Leite, R. C., & Walter, M. E. (2018). Fire detection systems using UAV images and machine learning. *Journal of Applied Remote Sensing*.
- Kaur, H., Singh, H., & Kaur, N. (2020). Survey of UAV-based forest monitoring systems. *International Journal of Forest Research*.
- Sharma, S., Shukla, A., & Jain, R. (2021). UAV-assisted disaster management. *Disaster Risk Science*.
- Chan, C. W., Cheung, K., & Yiu, T. C. (2021). Application of UAVs in forest restoration. *Ecological Engineering*.
- Balch, J. K., & Higuera, P. E. (2022). Climate change and its impact on forest fire dynamics. *Global Change Biology*.
- Mallet, A., & Debus, G. (2019). Developing resilience in forest fire monitoring through UAV swarms. *Forest Ecology and Management*.
- Ivanov, R., & Zhukov, V. (2017). Real-time fire prediction using UAV systems. *Journal of Fire Sciences*.

- Mehta, R., & Kumar, N. (2021). Integrating AI with UAVs for wildfire detection. *Sensors*.
- Zhu, J., & Zhang, H. (2023). UAV network control in collaborative fire management. *Network Systems Journal*.
- Abatzoglou, J. T., & Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(42), 11770–11775. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1607171113>.
- Chen, Y., Yu, R., Zhang, Y., & Liu, C. (2020). Circular Formation Flight Control for Unmanned Aerial Vehicles With Directed Network and External Disturbance. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 7(2), 505-516. DOI: [10.1109/JAS.2019.1911669](https://doi.org/10.1109/JAS.2019.1911669)
- Park, C., & Kim, Y. (2016). Vision-based UAV collision avoidance with 2D dynamic safety envelope. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 31(7), 28-37. DOI: [10.1109/MAES.2016.150146](https://doi.org/10.1109/MAES.2016.150146)
- Καϊλίδης, Δ. Σ., & Καρανικόλα, Π. (2004). Δασικές Πυρκαγιές 1900–2000. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Χριστοδουλίδη.
- Καλαμποκίδης, Κ., Βασιλάκος, Χ., Αθανάσης, Ν., Παλαιολόγου, Π., & Τσεκούρας, Γ. (2014). Πανελλήνιο Συνέδριο: ‘Η χρήση των νέων τεχνολογιών στην πρόληψη και τη διαχείριση φυσικών καταστροφών - Ο ρόλος της Πολιτικής Προστασίας’. *Πληροφοριακό Σύστημα Πρόληψης και Διαχείρισης Δασικών Πυρκαγιών (AEGIS)*.
- Υφαντή, Δ. (2015). Διεθνή και ελληνικά συστήματα πρόληψης δασικών πυρκαγιών. *Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή*. https://ikee.lib.auth.gr/record/281254/files/YFANTH_EE.pdf {index=3}.

- Μοσχοβίδης, Ν. (2007). Αντιμετώπιση δασικών πυρκαγιών στην Τ.Α.: Δομή, διάρθρωση και αρμοδιότητες μηχανισμού αντιμετώπισης. *Διπλωματική Εργασία, Εθνική Σχολή Τοπικής Αυτοδιοίκησης*.
- Παπάζογλου, Π., & Λιωνής, Σ.-Π. (2018). Ανάπτυξη εφαρμογών με το Arduino (2η έκδοση). ΤΖΙΟΛΑΣ.
- Κατσάνος, Α. (1970). Συμπεριφορά των πυρκαγιών των δασών. Αθήνα: Αυτοτελείς Εκδόσεις της Υπηρεσίας Δασικών Εφαρμογών.
- Ρούπος, Γ., & Σαββίδης, Σ. (2017). Ανάπτυξη τηλεμετρίας για UAV. *Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης*.