



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

Σχολή Τεχνολογίας

Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων

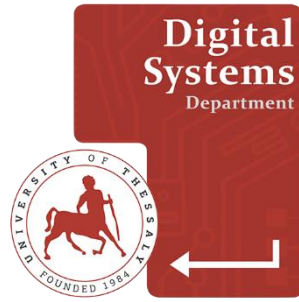
**Πολυπρακτορική προσομοίωση
δασικής πυρκαγιάς και κατάσβεσης**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Κωνσταντίνος Τζόκας (ΑΜ: 3121032)

Επιβλέπων: Φώτιος Κόκκορας, Επίκουρος Καθηγητής

ΛΑΡΙΣΑ, Αύγουστος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY

School of Technology

Digital Systems Department

Multi-Agent Forest Fire and Suppression Simulation

BACHELOR THESIS

Konstantinos Tzokas (RN: 3121032)

Supervisor: *Fotios Kokkoras, Assistant Professor*

LARISSA, August 2025

Υπεύθυνη Δήλωση περί Ακαδημαϊκής Δεοντολογίας και Πνευματικών Δικαιωμάτων

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα πτυχιακή εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον, και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή.

Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο/Η Δηλών/ούσα

(Υπογραφή)

Κωνσταντίνος Τζόκας

10- 08- 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων/πουσα	Φώτιος Κόκκορας Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Γεώργιος Κακαρόντζας Καθηγητής, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Μέλος	Βασιλική Κουτσονικόλα Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό, Τμήμα Ψηφιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ημερομηνία έγκρισης: 17-10-2025

Περίληψη

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα από τα πιο καταστροφικά περιβαλλοντικά φαινόμενα παγκοσμίως, με την κλιματική αλλαγή να εντείνει τη συχνότητα και την ένταση τους. Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις διαχείρισης πυρκαγιών, που βασίζονται σε εμπειρικά μοντέλα και κεντρικές στρατηγικές λήψης αποφάσεων, συχνά αποδεικνύονται ανεπαρκείς για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας και της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζουν τα σύγχρονα σενάρια πυρκαγιών. Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός καινοτόμου συστήματος προσομοίωσης διαχείρισης δασικών πυρκαγιών που βασίζεται σε αρχιτεκτονική πολυπρακτορικού συστήματος (MAS), αποδεικνύοντας πώς αυτόνομες, εξειδικευμένες οντότητες μπορούν να συνεργαστούν αποτελεσματικά για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων διαχείρισης κρίσεων.

Ο κύριος στόχος ήταν η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου περιβάλλοντος που συνδυάζει τη μοντελοποίηση εξάπλωσης πυρκαγιάς με τον έξυπνο συντονισμό πολλαπλών τύπων πυροσβεστικών πόρων. Το σύστημα υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το JADE (Java Agent DEvelopment Framework), μια ώριμη πλατφόρμα που συμμορφώνεται με τα διεθνή πρότυπα FIPA. Αναπτύχθηκαν επτά διαφορετικοί τύποι πρακτόρων, καθένας αντιπροσωπεύοντας διαφορετικές οντότητες στο οικοσύστημα διαχείρισης πυρκαγιών: πράκτορες φωτιάς που μοντελοποιούν τη δυναμική εξάπλωση και ένταση, έναν κεντρικό FireControlAgent που συντονίζει όλους τους πυροσβεστικούς πόρους, εξειδικευμένους πυροσβεστικούς πράκτορες (οχήματα, αεροσκάφη, ελικόπτερα, επίγειες ομάδες), πράκτορες καιρού που προσομοιώνουν περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η εργασία συνεισφέρει τόσο στη θεωρητική όσο και στην πρακτική πτυχή της τεχνολογίας διαχείρισης δασικών πυρκαγιών, παρέχοντας ένα καινοτόμο εργαλείο για έρευνα, εκπαίδευση και δυνητικές λειτουργικές εφαρμογές. Η χρήση προηγμένων τεχνολογιών πολυπρακτορικών συστημάτων ανοίγει νέους δρόμους για την αντιμετώπιση μιας από τις πιο πιεστικές περιβαλλοντικές προκλήσεις της εποχής μας.

Abstract

Wildfires represent one of the most devastating environmental phenomena globally, with climate change intensifying their frequency and severity. Traditional fire management approaches, based on empirical models and centralized decision-making strategies, often prove inadequate for addressing the complexity and uncertainty characterizing modern wildfire scenarios. This thesis presents the development and evaluation of an innovative wildfire management simulation system based on multi-agent system (MAS) architecture, demonstrating how autonomous, specialized entities can collaborate effectively to address complex crisis management problems.

The primary objective was to create an integrated environment combining wildfire spread modeling with intelligent coordination of multiple types of firefighting resources. The system was implemented using the JADE (Java Agent DEvelopment Framework), a mature platform complying with FIPA international standards. Seven distinct agent types were developed, each representing different entities in the wildfire management ecosystem: fire agents modeling dynamic spread and intensity, a central FireControlAgent coordinating all firefighting resources, specialized firefighting agents (trucks, aircraft, helicopters, ground crews), weather agents simulating environmental conditions, and emergency response agents handling critical situations.

This work contributes to both theoretical and practical aspects of wildfire management technology, providing an innovative tool for research, education, and potential operational applications. The use of advanced multi-agent technologies opens new avenues for addressing one of the most pressing environmental challenges of our time.

Ευχαριστίες

Θέλω να εκφράσω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη σε όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας.

Καταρχάς, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Καθ. Φώτιο Κόκκορα για την ουσιαστική καθοδήγηση, τις πολύτιμες συμβουλές και την αμέριστη υποστήριξη σε θεωρητικό και τεχνικό επίπεδο. Η εμπειρία και οι γνώσεις του αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχή υλοποίηση του συστήματος προσομοίωσης

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου που συμμετείχαν σε δοκιμές του πρωτοτύπου, προσφέροντας εποικοδομητικά σχόλια και suggestions για τη βελτίωση της εφαρμογής.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου για την ηθική στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Κωνσταντίνος Τζόκας

10 -08- 2025

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	VII
ABSTRACT	IX
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	X
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	XI
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
1.1 ΓΕΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΘΕΜΑΤΟΣ	15
1.2 ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΡΙΣΕΩΝ	15
1.3 ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	16
1.4 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	16
1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	17
2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ	
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	18
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΓΝΩΣΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ.....	18
2.2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ	19
2.2.1 Θεμελιώδεις Αρχές Εξάπλωσης Πυρκαγιάς.....	19
2.2.2 Το Μαθηματικό Μοντέλο Rothermel	20
2.2.3 Κατηγοριοποίηση Μοντέλων Καυσίμων.....	20
2.2.4 Καναδικό Σύστημα Αξιολόγησης Καιρικών Συνθηκών	21
2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	22
2.3.1 Τεχνολογία Κυτταρικών Αυτομάτων	22
2.3.2 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης	23
2.4 ΠΟΛΥΠΡΑΚΤΟΡΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ JADE FRAMEWORK.....	23
2.4.1 Αρχιτεκτονική και Θεωρητικά Θεμέλια.....	23
2.4.2 Το JADE Development Framework.....	24
2.4.3 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας FIPA- ACL	25
2.4.4 BDI Αρχιτεκτονική Μοντελοποίηση.....	25
2.5 ΚΑΤΗΓΟΡΟΠΟΙΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	26

2.5.1	Μαθηματικά και Γεωχωρικά Μοντέλα	26
2.5.2	Συζευγμένα Φυσικά Μοντέλα.....	27
2.5.3	Πολυπρακτορικά και Cellular Automata Συστήματα.....	27
2.5.4	Εμπορικά και Βιομηχανικά Συστήματα	28
2.6	ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΓΟΡΑΣ ΣΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΤΑΣΕΩΝ	29
2.6.1	Οικονομικά Δεδομένα και Προβλέψεις Ανάπτυξης	29
2.6.2	Κυριάρχουσες Τεχνολογικές Εξελίξεις	29
2.7	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΡΟΗΓΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ	29
2.7.1	Λεπτομερής Συγκριτική Ανάλυση	29
2.7.2	Αξιολόγηση Επιδόσεων	30
2.8	ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΚΑΙΝΟΤΟΜΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	30
2.9	ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	31
2.9.1	Τεχνικές Προκλήσεις	31
2.9.2	Οικονομικές και Πολιτικές Προκλήσεις	31
2.10	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	31
3	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΡΓΑΛΙΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ	32
3.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ	32
3.1.1	Προσδιορισμός του Προβλήματος	32
3.1.2	Στρατηγική Επίλυσης μέσω Πολυπρακτορικών Συστημάτων	33
3.1.3	Υλοποιημένη Λύση και Καινοτόμα Χαρακτηριστικά	33
3.1.4	Ειδικοί Στόχοι και Επιδιωκόμενα Αποτελέσματα.....	34
3.2	ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ	34
3.2.1	Κεντρικό Framework Ανάπτυξης	34
3.2.2	Περιβάλλον Ανάπτυξης και Build System	35
3.2.3	Αρχιτεκτονική Συστήματος και Κρίσιμα Components.....	35
3.2.4	Ειδικές Ρυθμίσεις και Μη Προφανή Σημεία.....	36
3.2.5	Deployment και Εκτέλεση.....	36
3.2.6	Εργαλεία Debugging και Monitoring	36
4	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	37
4.1.1	Αρχιτεκτονική Συστήματος.....	37
4.1.2	Μοντέλο Επικοινωνίας και Συντονισμού.....	38
4.1.3	Στρατηγικές Συντονισμού.....	38

4.1.4	Προσαρμοστικότητα και Ανθεκτικότητα	38
4.2	ΠΕΙΡΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ	39
4.2.1	Κλάσεις Πρακτόρων και Δομή Συστήματος	39
4.2.2	Συστήματα Επικοινωνίας και Συντονισμού	43
4.2.3	Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη	44
4.2.4	Αλγόριθμοι Λήψης Αποφάσεων	47
4.2.5	Διαχείριση Κατάστασης και Συγχρονισμός	50
4.2.6	Αποτελέσματα και Αξιολόγηση Απόδοσης	52
5	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΑΙ ΟΔΗΓΟΣ ΧΡΗΣΗΣ	53
5.1	ΓΕΝΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	53
5.1.1	Κύρια Χαρακτηριστικά Εφαρμογής	53
5.2	ΚΥΡΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΧΡΗΣΤΗ	54
5.2.1	Αρχική Οθόνη εφαρμογής	54
5.2.2	Περιοχή Πληροφοριών και Στατιστικών	55
5.3	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	55
5.3.1	Ενεργοποίηση Πυρκαγιάς	55
5.3.2	Αυτόματη Αντίδραση Συστήματος	56
5.3.3	Διαδικασία Κατάσβεσης	57
5.4	ΣΕΝΑΡΙΟ ΈΚΤΑΚΤΗΣ ΑΝΑΓΚΗΣ	57
5.4.1	Ενεργοποίηση Πρωτοκόλλου Έκτακτης Ανάγκης	57
5.4.2	Στρατηγικές Συντονισμού σε Έκτακτες Καταστάσεις	58
5.5	ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ	58
5.5.1	Πίνακας Στατιστικών	58
5.5.2	Ανάλυση Απόδοσης Συστήματος	59
5.6	ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΗ ΑΞΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	59
5.6.1	Σενάρια Εκπαίδευσης	59
5.6.2	Ερευνητικές Εφαρμογές	59
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ	60
6.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ	60
6.1.1	Επιτεύγματα της Εργασίας	60
6.1.2	Περιορισμοί και Προκλήσεις	61
6.2	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΈΡΕΥΝΑΣ	61

6.2.1	Τεχνολογικές Επεκτάσεις	61
6.2.2	Ερευνητικές Προτεραιότητες	62
6.2.3	Πρακτικές Εφαρμογές	62
6.3	ΕΠΙΛΟΓΟΣ	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		63

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικό Πλαίσιο και Σημαντικότητα του Θέματος

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα από τα πιο καταστροφικά και αυξανόμενα περιβαλλοντικά φαινόμενα παγκοσμίως, με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής να εντείνουν τη συχνότητα και την ένταση αυτών των συμβάντων. Κάθε χρόνο, εκατομμύρια στρέμματα δασικών εκτάσεων καταστρέφονται από πυρκαγιές, με τεράστιες οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές συνέπειες που επηρεάζουν ολόκληρες κοινότητες και οικοσυστήματα. Η αυξανόμενη αστικοποίηση στα όρια των δασικών περιοχών (Wildland-Urban Interface) κάνει το πρόβλημα ακόμη πιο πολύπλοκο, καθώς η ανάγκη για αποτελεσματική διαχείριση και κατάσβεση γίνεται κρισιμότερη από ποτέ.

Η παραδοσιακή προσέγγιση στη διαχείριση δασικών πυρκαγιών βασίζεται σε εμπειρικά μοντέλα και κεντρικές στρατηγικές λήψης αποφάσεων που συχνά αποδεικνύονται ανεπαρκείς για την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας και της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζουν τα σύγχρονα σενάρια πυρκαγιών. Η ανάγκη για καινοτόμες τεχνολογικές λύσεις που μπορούν να προσαρμοστούν δυναμικά σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και να συντονίζουν αποτελεσματικά πολλαπλούς πόρους έχει οδηγήσει στην εξερεύνηση προηγμένων υπολογιστικών προσεγγίσεων

1.2 Πολυπρακτορικά Συστήματα στη Διαχείριση Κρίσεων

Τα πολυπρακτορικά συστήματα (Multi-Agent Systems - MAS) αναδύονται ως μια υποσχόμενη τεχνολογική λύση για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων διαχείρισης κρίσεων. Η φιλοσοφία των MAS βασίζεται στην αρχή ότι πολύπλοκα προβλήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικότερα μέσω της συνεργασίας αυτόνομων, ειδικευμένων οντοτήτων (πρακτόρων) που λειτουργούν συντονισμένα για την επίτευξη κοινών στόχων.

Στο πλαίσιο της διαχείρισης δασικών πυρκαγιών, κάθε πράκτορας μπορεί να αντιπροσωπεύει διαφορετικούς τύπους πυροσβεστικών πόρων, περιβαλλοντικούς

παράγοντες ή ακόμη και τις ίδιες τις εστίες φωτιάς. Η αυτόνομη λειτουργία των πρακτόρων επιτρέπει την άμεση αντίδραση σε τοπικές αλλαγές, ενώ ο συντονισμός τους εξασφαλίζει τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων σε μεγάλη κλίμακα.

1.3 Στόχοι και Καινοτομία της Εργασίας

Η παρούσα πτυχιακή εργασία στοχεύει στην ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός καινοτόμου συστήματος προσομοίωσης για τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών που βασίζεται σε πολυπρακτορική αρχιτεκτονική. Ο κύριος στόχος είναι η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου περιβάλλοντος που συνδυάζει τη μοντελοποίηση εξάπλωσης πυρκαγιάς με τον έξυπνο συντονισμό πολλαπλών τύπων πυροσβεστικών πόρων.

Η καινοτομία της προσέγγισης έγκειται στην ενσωμάτωση προηγμένων αλγόριθμων συντονισμού που επιτρέπουν στους πράκτορες να προσαρμόζονται δυναμικά σε μεταβαλλόμενες συνθήκες και να συνεργάζονται αποτελεσματικά για την επίτευξη του κοινού στόχου της κατάσβεσης. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά συστήματα προσομοίωσης που εστιάζουν κυρίως στην πρόβλεψη εξάπλωσης φωτιάς, το προτεινόμενο σύστημα ενσωματώνει την ενεργή διαχείριση και κατάσβεση ως αναπόσπαστα στοιχεία της προσομοίωσης.

Το σύστημα χρησιμοποιεί το JADE (Java Agent DEvelopment Framework), μια ώριμη και αξιόπιστη πλατφόρμα που συμμορφώνεται με τα διεθνή πρότυπα FIPA για την ανάπτυξη πολυπρακτορικών εφαρμογών. Η επιλογή αυτής της τεχνολογίας εξασφαλίζει τη διαλειτουργικότητα, την κλιμάκωση και τη μελλοντική επεκτασιμότητα του συστήματος.

1.4 Μεθοδολογική Προσέγγιση

Η εργασία υιοθετεί μια πολυδιάστατη μεθοδολογική προσέγγιση που συνδυάζει θεωρητική έρευνα, σχεδιασμό συστήματος και πρακτική υλοποίηση. Αρχικά, πραγματοποιείται εκτεταμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση για την κατανόηση των υφιστάμενων μεθόδων και τεχνολογιών διαχείρισης πυρκαγιών, καθώς και των προηγμένων τεχνικών πολυπρακτορικών συστημάτων.

Στη συνέχεια, αναπτύσσεται μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική συστήματος που ενσωματώνει διαφορετικούς τύπους πρακτόρων με ειδικευμένες λειτουργίες και συμπεριφορές. Η υλοποίηση περιλαμβάνει την ανάπτυξη αλγόριθμων συντονισμού,

πρωτοκόλλων επικοινωνίας και μηχανισμών λήψης αποφάσεων που επιτρέπουν την αποτελεσματική συνεργασία των πρακτόρων.

Η αξιολόγηση του συστήματος πραγματοποιείται μέσω εκτεταμένων προσομοιώσεων που καλύπτουν διαφορετικά σενάρια πυρκαγιών και καιρικών συνθηκών. Τα αποτελέσματα αναλύονται σε σχέση με βασικές μετρικές απόδοσης όπως ο χρόνος αντίδρασης, η αποτελεσματικότητα κατάσβεσης και η βέλτιστη αξιοποίηση πόρων.

1.5 Δομή της Εργασίας

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε έξι κύρια κεφάλαια που αναπτύσσουν συστηματικά το θέμα από την εννοιολογική θεμελίωση έως την πρακτική υλοποίηση και αξιολόγηση:

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση παρουσιάζει τη θεωρητική υπόβαθρο της εργασίας μέσω εκτεταμένης ανάλυσης της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με τα μοντέλα συμπεριφοράς πυρκαγιών, τα πολυπρακτορικά συστήματα και τις εφαρμογές τους στη διαχείριση κρίσεων. Εξετάζονται τα κλασικά μοντέλα όπως το Rothermel, το Canadian Fire Weather Index, καθώς και σύγχρονες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν cellular automata και φυσικά μοντέλα. Παράλληλα, αναλύεται η εξέλιξη των πολυπρακτορικών τεχνολογιών και οι εφαρμογές τους σε διάφορους τομείς διαχείρισης κρίσεων.

Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία και Εργαλεία Ανάπτυξης περιγράφει λεπτομερώς το πρόβλημα που αντιμετωπίζει η εργασία και τα τεχνικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση. Παρουσιάζεται η ανάλυση απαιτήσεων, η επιλογή και διαμόρφωση του JADE framework, καθώς και άλλα εξειδικευμένα εργαλεία και βιβλιοθήκες που απαιτούνται για την ανάπτυξη του συστήματος. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις μη προφανείς ρυθμίσεις και διαμορφώσεις που είναι απαραίτητες για την επιτυχή αναπαραγωγή του περιβάλλοντος εργασίας.

Κεφάλαιο 4: Σχεδίαση και Υλοποίηση Συστήματος αποτελεί το πυρήνα της τεχνικής παρουσίασης, περιγράφοντας την αρχιτεκτονική του συστήματος από την εννοιολογική σχεδίαση έως την πρακτική υλοποίηση. Αναλύεται η δομή των πρακτόρων, οι αλγόριθμοι συντονισμού, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και οι μηχανισμοί λήψης αποφάσεων. Παρέχονται εκτεταμένα παραδείγματα κώδικα και διαγράμματα που επεξηγούν τη λειτουργία του συστήματος σε όλα τα επίπεδα.

Κεφάλαιο 5: Παρουσίαση Εφαρμογής και Οδηγός Χρήσης προσφέρει μια πρακτική παρουσίαση της λειτουργικής εφαρμογής μέσω screenshots και λεπτομερών οδηγιών χρήσης. Περιγράφεται το γραφικό περιβάλλον χρήστη, οι διαθέσιμες λειτουργίες και παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά σενάρια χρήσης που επιδεικνύουν τις δυνατότητες του συστήματος. Το κεφάλαιο λειτουργεί ως ένας σύντομος αλλά ολοκληρωμένος οδηγός για όσους επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν το σύστημα για εκπαιδευτικούς ή ερευνητικούς σκοπούς.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα - Μελλοντική Εργασία παρουσιάζει την κριτική αξιολόγηση της εργασίας, συνοψίζοντας τα κύρια επιτεύγματα και αναγνωρίζοντας τους περιορισμούς και τις προκλήσεις που αντιμετωπίστηκαν κατά την ανάπτυξη. Προτείνονται συγκεκριμένες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και επέκταση του συστήματος, εστιάζοντας σε τεχνολογικές βελτιώσεις και πρακτικές εφαρμογές που θα μπορούσαν να αυξήσουν περαιτέρω την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης.

Η εργασία στοχεύει να συνεισφέρει τόσο στον θεωρητικό όσο και στον πρακτικό τομέα της διαχείρισης δασικών πυρκαγιών, παρέχοντας ένα καινοτόμο εργαλείο για έρευνα, εκπαίδευση και πιθανή λειτουργική εφαρμογή. Η χρήση προηγμένων τεχνολογιών πολυπρακτορικών συστημάτων ανοίγει νέους δρόμους για την αντιμετώπιση μιας από τις πιο πιεστικές περιβαλλοντικές προκλήσεις της εποχής μας

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο και Ανάλυση Υφιστάμενων Συστημάτων

2.1 Εισαγωγή στο Ευρύτερο Γνωστικό Πεδίο

Η δημιουργία προγραμμάτων προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών, με τη χρήση ευφύων πρακτόρων. Είναι μια προσπάθεια που φέρνει κοντά διαφορετικά γνωστικά πεδία πρόκειται για ένα χώρο όπου η τεχνολογία, η περιβαλλοντική επιστήμη και η ανθρώπινη πραγματικότητα συνεργάζονται, για να κατανοήσουμε καλύτερα πώς εξαπλώνονται οι φωτιές και πώς μπορούμε να τις αντιμετωπίσουμε πιο αποτελεσματικά [1]. Το συγκεκριμένο πεδίο έχει προκύψει από την ανάγκη αντιμετώπισης αυξανόμενης συχνότητας καταστροφικών πυρκαγιών, τόσο σε εθνικό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο,

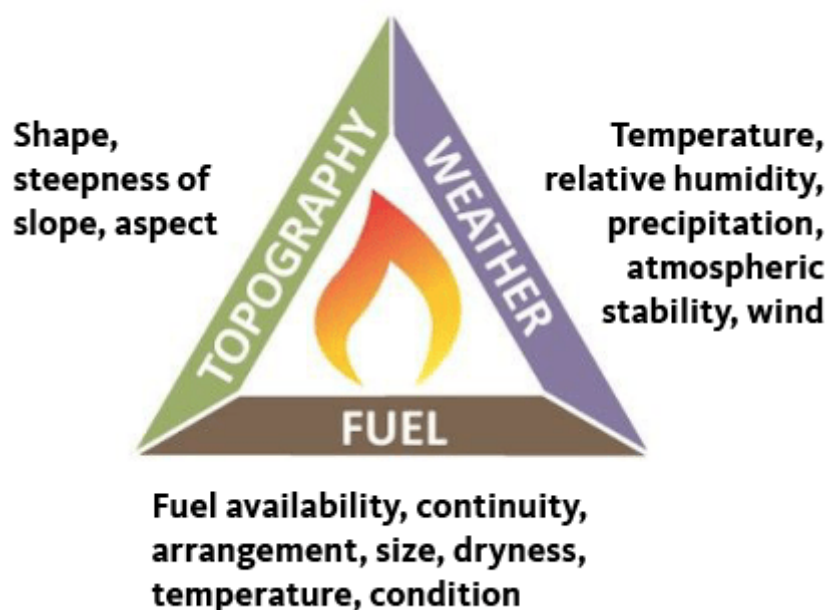
με στατιστικά στοιχεία να καταγραφούν πάνω από 58.000 περιστατικά μόνο στην Αμερική το 2020, τα οποία κατέστρεψαν εκατομμύρια στρέμματα δασικών εκτάσεων [2].

Τα συστήματα ευφών πρακτόρων είναι μια καινολειτουργία προσέγγιση στην μοντελοποίηση καιρικών φαινομένων και περιβαλλοντολογικών καταστροφών. Χάρης στην αναπαράσταση τους ως αυτόνομων οντοτήτων, οι οποίες δρούν και συνεργάζονται [3]. Η εφαρμογή αυτού του τρόπου αναπαράστασης και η χρήση της μεθοδολογίας των ευφών πρακτόρων στον τομέα των δασικών πυρκαγιών, επιτρέπει την ταχύτερη ανάλυση σεναρίων, την πιο αποδοτική προσαρμογή σε καθεστώς μεταβαλλόμενων συνθηκών, καθώς και την δοκιμή διαφορετικών στρατηγικών κατάσβεσης [4].

2.2 Μοντέλα Δασικών Πυρκαγιών

2.2.1 Θεμελιώδεις Αρχές Εξάπλωσης Πυρκαγιάς

Η εξάπλωση δασικών πυρκαγιών καθορίζεται από τρεις κύριους παράγοντες: την καύσιμη ύλη, τις μετεωρολογικές συνθήκες και τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά [5]. Η υγρασία των καυσίμων αποτελεί καθοριστικό στοιχείο για την πιθανότητα ανάφλεξης και την ένταση της πυρκαγιάς. Ερευνητικές μελέτες αποδεικνύουν ότι όταν η περιεκτικότητα σε υγρασία μειώνεται κάτω από 50%, αυξάνεται σημαντικά η καταναλωσιμότητα των καυσίμων, ενώ διαφορετικοί τύποι βλάστησης παρουσιάζουν ποικίλες συμπεριφορές στην ανάφλεξη [5].



Εικόνα 1: Το τρίγωνο της φωτιάς

Οι ανεμολογικές συνθήκες διαδραματίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο στη δυναμική της πυρκαγιάς [6]. Συγκεκριμένα, ανεμολογικές συνθήκες με ταχύτητα άνω των 1,5 m/s σε συνδυασμό με θερμοκρασίες άνω των 15°C, ή εναλλακτικά ταχύτητες άνω των 2,0 m/s με σχετική υγρασία κάτω από 35%, δημιουργούν κρίσιμες συνθήκες που διαφοροποιούν τον ρυθμό εξάπλωσης από 1,03 m/min σε περισσότερο από 1,38 m/min [6].

2.2.2 Το Μαθηματικό Μοντέλο Rothermel

Το θεμελιώδες μαθηματικό μοντέλο που ανέπτυξε ο Rothermel το 1972 παραμένει η βάση για την πρόβλεψη επιφανειακών δασικών πυρκαγιών [7][8]. Το μοντέλο στηρίζεται στην αρχή διατήρησης ενέργειας και προσδιορίζει τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς μέσω της ανάλυσης των χαρακτηριστικών καυσίμων, των καιρικών παραγόντων και της τοπογραφίας [9].

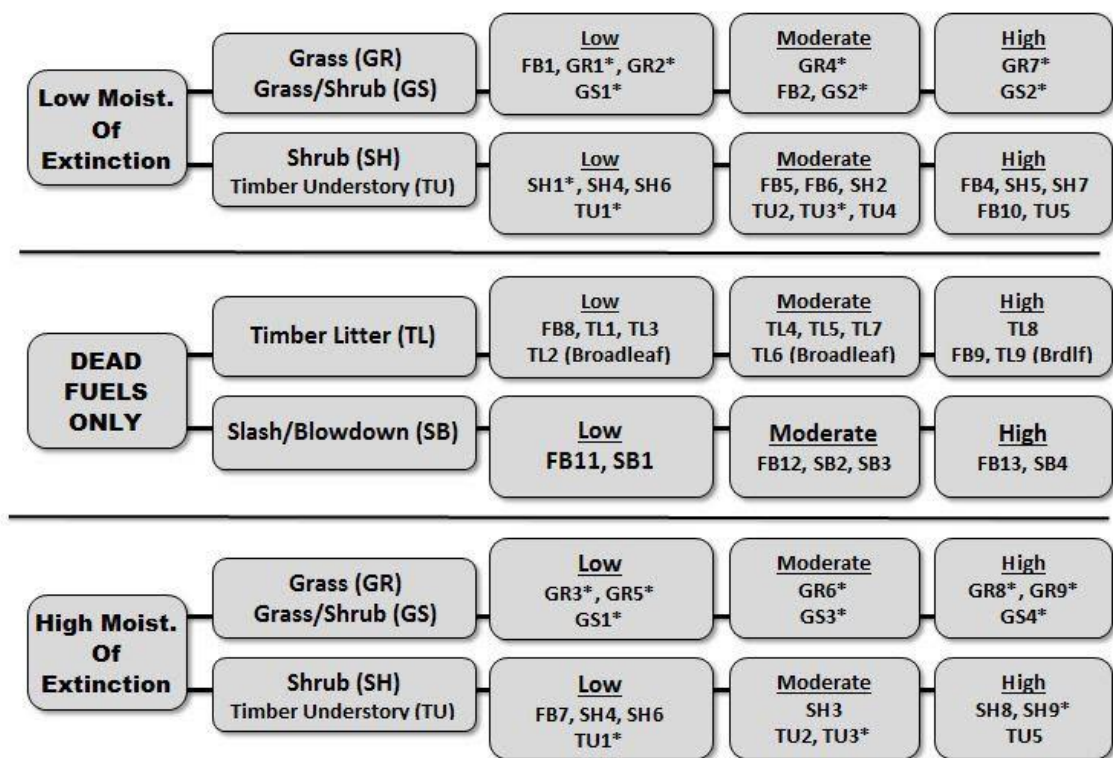
Η κεντρική εξίσωση του μοντέλου εκφράζει τον ρυθμό εξάπλωσης ως συνάρτηση πολλαπλών μεταβλητών, συμπεριλαμβανομένης της έντασης αντίδρασης, των συντελεστών διάδοσης και των επιδράσεων από ανεμολογικές και τοπογραφικές συνθήκες [10].

2.2.3 Κατηγοριοποίηση Μοντέλων Καυσίμων

Η επιστημονική κοινότητα έχει αναπτύξει εξειδικευμένα μοντέλα καυσίμων για την ταξινόμηση και περιγραφή διαφορετικών τύπων βλάστησης [11][12]. Η αρχική σειρά των 13 μοντέλων που διατύπωσε ο Anderson το 1982 περιλαμβάνει τέσσερις κύριες κατηγορίες [11]:

1. Γραμμένα Μοντέλα (1-3): Αντιπροσωπεύουν διαφορετικές μορφές γρασιδιών, από κοντό έως ψηλό χονδρό γρασίδι, με χαρακτηριστικά ταχείας εξάπλωσης[13].
2. Θαμνώδη Μοντέλα (4-7): Καλύπτουν ποικίλες μορφές θάμνων και νεαρών κωνοφόρων, παρουσιάζοντας εκτεταμένο φάσμα εντάσεων και ρυθμών εξάπλωσης[13].
3. Δασικά Μοντέλα (8-10): Περιγράφουν συνθήκες σκληρόφυλλων και κωνοφόρων δασών με διαφορετικές συγκεντρώσεις φύλλων και κλάδων.
4. Υπολειμματικά Μοντέλα (11-13): Αφορούν περιοχές με κλαδοκαρπά διαφορετικής πυκνότητας [13].

Η επέκταση που πραγματοποίησαν οι Scott και Burgan το 2005 αύξησε τον αριθμό των διαθέσιμων μοντέλων σε 40, δημιουργώντας πιο εξειδικευμένες κατηγορίες για βελτιωμένη ακρίβεια προβλέψεων [14]. Αυτή η επέκταση περιλαμβάνει κατηγορίες όπως τα GR (Grass), GS (Grass-Shrub), SH (Shrub), TL (Timber Litter), TU (Timber-Understory) και NB (Non-Burnable) μοντέλα [13].



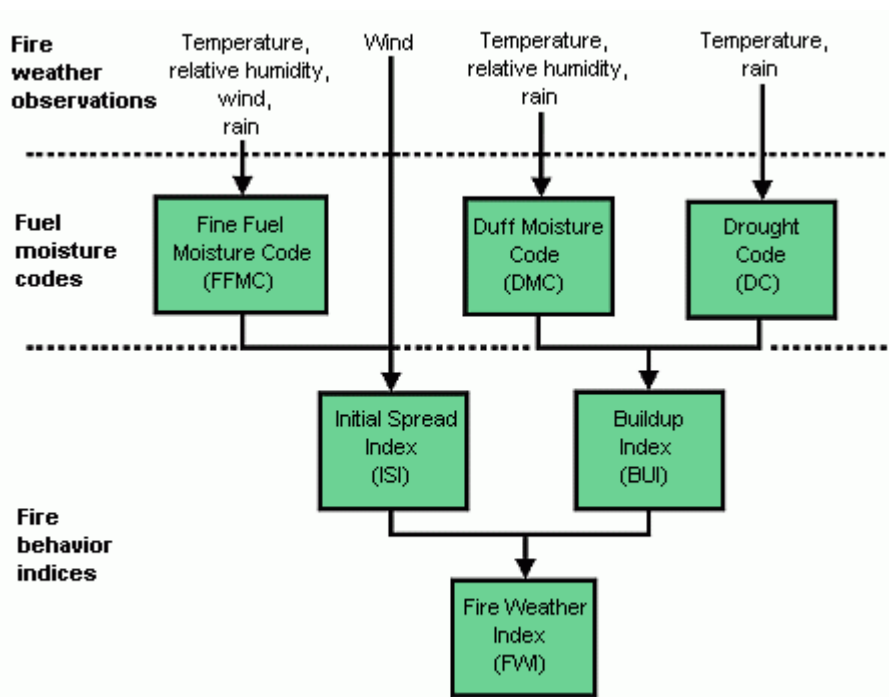
Εικόνα 2: Κατηγοριοποίηση τύπων καυσίμου για μοντελοποίηση επιφανειακών πυρκαγιών

2.2.4 Καναδικό Σύστημα Αξιολόγησης Καιρικών Συνθηκών

Το Καναδικό Σύστημα Δείκτη Καιρού Δασικών Πυρκαγιών (FWI) αποτελεί έναν παγκοσμίως αναγνωρισμένο μηχανισμό αξιολόγησης κινδύνου [15][16]. Το σύστημα βασίζεται σε έξι βασικά συστατικά που διαχωρίζονται σε δύο ομάδες [17]:

- Κώδικες Υγρασίας: Ο Fine Fuel Moisture Code (FFMC) αξιολογεί την υγρασία λεπτών καυσίμων, ο Duff Moisture Code (DMC) εξετάζει τα μέτρια συμπιεσμένα οργανικά στρώματα, και ο Drought Code (DC) αναλύει τα βαθιά οργανικά στρώματα [15].
- Δείκτες Συμπεριφοράς: Ο Initial Spread Index (ISI) προβλέπει τον ρυθμό εξάπλωσης, ο Buildup Index (BUI) υπολογίζει τη διαθέσιμη καύσιμη ύλη, και ο Fire Weather Index (FWI) εκτιμά την ένταση της πυρκαγιάς [16][17].

Οι υπολογισμοί στηρίζονται σε καθημερινές μετρήσεις που περιλαμβάνουν θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου και 24ωρη βροχόπτωση [18].



Εικόνα 3: Διάγραμμα των συστατικών του καναδικού δείκτη καιρού πυρκαγιάς

2.3 Υπολογιστικές Μέθοδοι Μοντελοποίησης

2.3.1 Τεχνολογία Κυτταρικών Αυτομάτων

Η εφαρμογή κυτταρικών αυτομάτων στην προσομοίωση δασικών πυρκαγιών αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο για την υποστήριξη διαχειριστικών αποφάσεων και την ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισης κινδύνου [19]. Αυτή η προσέγγιση ενσωματώνει φυσικά τη χωρική ποικιλομορφία στα τοπογραφικά, καυσιμολογικά και μετεωρολογικά χαρακτηριστικά [19].

Το θεμελιώδες μοντέλο που ανέπτυξε ο Karafyllidis το 1997 επιτρέπει την πρόβλεψη εξάπλωσης πυρκαγιάς τόσο σε ομοιογενή όσο και σε ετερογενή δασικά περιβάλλοντα, ενσωματώνοντας εύκολα καιρικές και τοπογραφικές μεταβλητές [20]. Τα αλγοριθμικά συστήματα που βασίζονται σε κυτταρικά αυτόματα παράγουν ταχείς υπολογισμούς σε σειριακούς υπολογιστές λόγω της αξιοποίησης του εγγενούς παραλληλισμού της δομής [20].

Πλεονεκτήματα της Μεθόδου:

- Απλοποιημένη υλοποίηση
- Φυσική αναπαράσταση χωρικής διάδοσης
- Δυνατότητες παράλληλης επεξεργασίας
- Προσαρμοστικότητα σε περιβαλλοντικούς παράγοντες

Τεχνικοί Περιορισμοί:

- Διακριτοποίηση χωρικών και χρονικών διαστάσεων
- Περιορισμένη αναπαράσταση συνεχών φαινομένων
- Μειωμένη ακρίβεια σε σύνθετες τοπογραφίες

2.3.2 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης

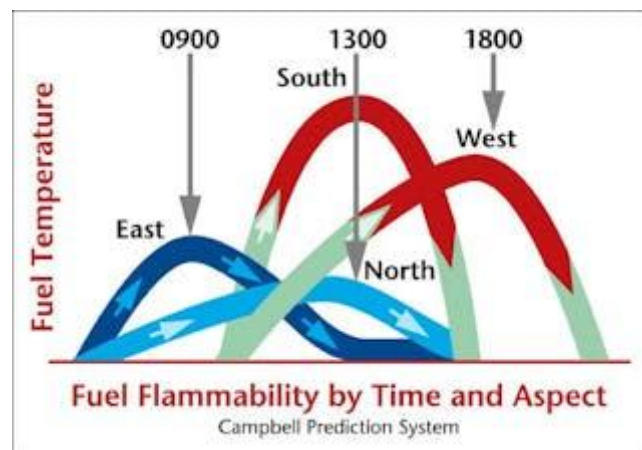
Σύγχρονες ερευνητικές προσεγγίσεις αξιοποιούν προηγμένους αλγορίθμους βελτιστοποίησης για την ενίσχυση των παραμέτρων των κυτταρικών αυτομάτων [21]. Ο αλγόριθμος Artificial Bee Colony έχει αποδείξει ανωτερότητα έναντι του Particle Swarm Optimization στη δημιουργία βέλτιστων παραμέτρων για προσομοιώσεις εξάπλωσης πυρκαγιάς [21].

Προηγμένα μοντέλα ενσωματώνουν τεχνολογίες βαθιάς μάθησης, συγκεκριμένα Transformer μοντέλα, για την εξαγωγή ακριβέστερων κανόνων μετάβασης [22]. Αυτά τα μοντέλα υπερτερούν στην κατανόηση μοτίβων εξάπλωσης και μπορούν να βελτιώσουν δραστικά την ακρίβεια προβλέψεων [22].

2.4 Πολυπρακτορικά Συστήματα και JADE Framework

2.4.1 Αρχιτεκτονική και Θεωρητικά Θεμέλια

Τα πολυπρακτορικά συστήματα αντιπροσωπεύουν μια προηγμένη μεθοδολογία για την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων σε δυναμικά περιβάλλοντα [23]. Αυτά τα συστήματα συνίστανται από πολλαπλούς αυτόνομους πράκτορες που αλληλεπιδρούν και συνεργάζονται για την επίτευξη κοινών στόχων [24]. Στον τομέα της προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών, οι πράκτορες μπορούν να αναπαραστήσουν ποικίλες οντότητες όπως δασική βλάστηση, πυροσβεστικά μέσα και αεροπορικά μέσα κατάσβεσης [25].



Εικόνα 4: Εύφλεκτότητα καυσίμου ανά ώρα και προσανατολισμό

Θεμελιώδη Χαρακτηριστικά Πρακτόρων:

- Αυτονομία: Ικανότητα ανεξάρτητης λήψης αποφάσεων
- Κοινωνικότητα: Δυνατότητα επικοινωνίας με άλλες οντότητες
- Αντιδραστικότητα: Απόκριση σε περιβαλλοντικές μεταβολές
- Προ-ενεργητικότητα: Ικανότητα πρωτοβουλίας για στοχοποίηση

2.4.2 To JADE Development Framework

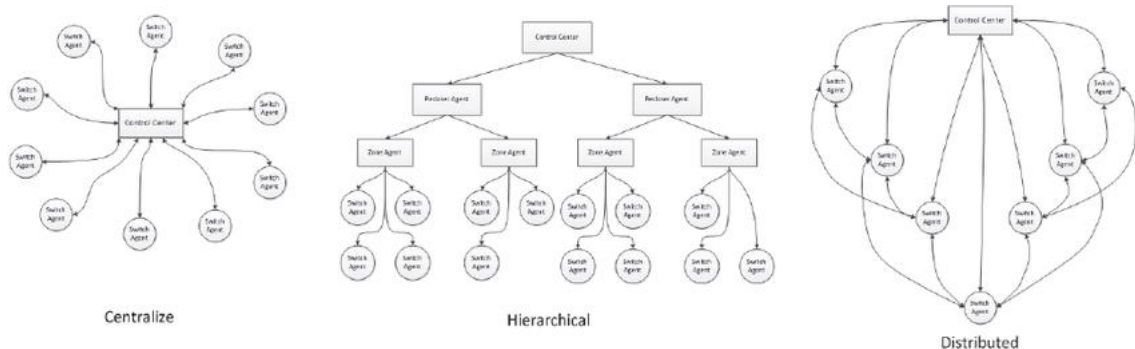
Το JADE αποτελεί ένα ολοκληρωμένο λογισμικό περιβάλλον για την ανάπτυξη εφαρμογών πρακτόρων που συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές FIPA για διαλειτουργικά ευφυή πολυπρακτορικά συστήματα [26][27]. Το framework παρέχει μια πλήρη πλατφόρμα που ενσωματώνει [28]:

Βασικές Λειτουργικότητες:

- Κατανεμημένη πλατφόρμα πρακτόρων με δυνατότητα επέκτασης σε πολλούς υπολογιστικούς κόμβους
- Πλήρη συμμόρφωση με τις προδιαγραφές FIPA 97
- Γραφικά εργαλεία για εντοπισμό σφαλμάτων και παρακολούθηση
- Υποστήριξη κινητικότητας πρακτόρων
- Ενσωματωμένη υποστήριξη για οντολογίες [29]

Αρχιτεκτονικά Συστατικά:

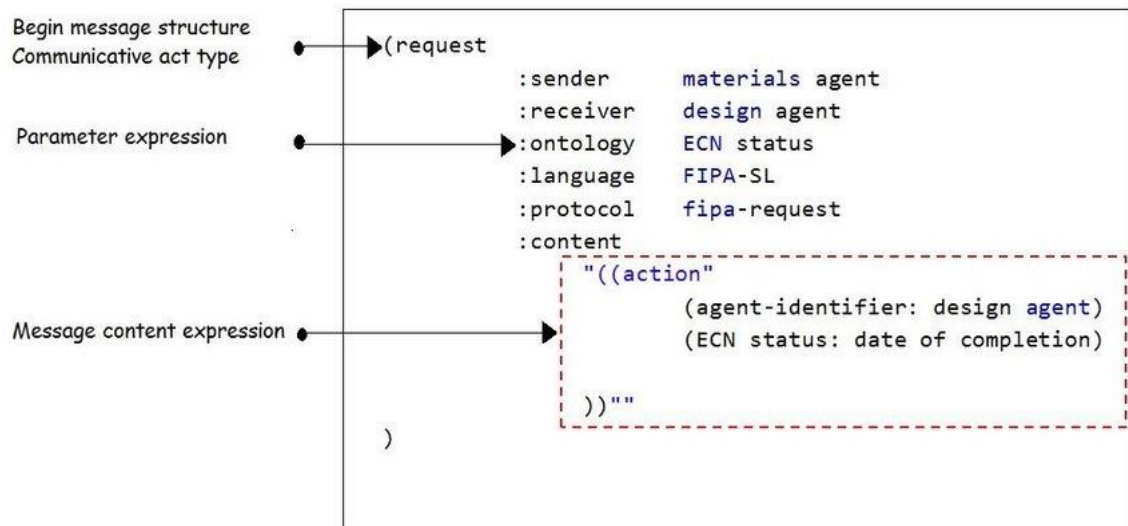
- Agent Management System (AMS): Διαχείριση κύκλου ζωής πρακτόρων
- Directory Facilitator (DF): Υπηρεσίες εντοπισμού και καταλογοποίησης
- Agent Communication Channel (ACC): Διαχείριση επικοινωνιακών διαδικασιών
- Main Container: Κεντρικός κόμβος πλατφόρμας
- Agent Containers: Περιβάλλοντα εκτέλεσης για πράκτορες [26].



Εικόνα 5: Τρεις διαφορετικοί τύποι αρχιτεκτονικής πολυπρακτορικών συστημάτων

2.4.3 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας FIPA- ACL

Η επικοινωνία μεταξύ πρακτόρων στο JADE υλοποιείται μέσω της FIPA Agent Communication Language [30][31]. Η FIPA-ACL καθορίζει ένα σύνολο επικοινωνιακών πράξεων (performatives) που προσδιορίζουν τον τύπο και την πρόθεση των μηνυμάτων [32].



Εικόνα 6: Οπτικοποίηση των συστατικών των FIPA-ACL μηνυμάτων

Κύρια Επικοινωνιακά Performatives:

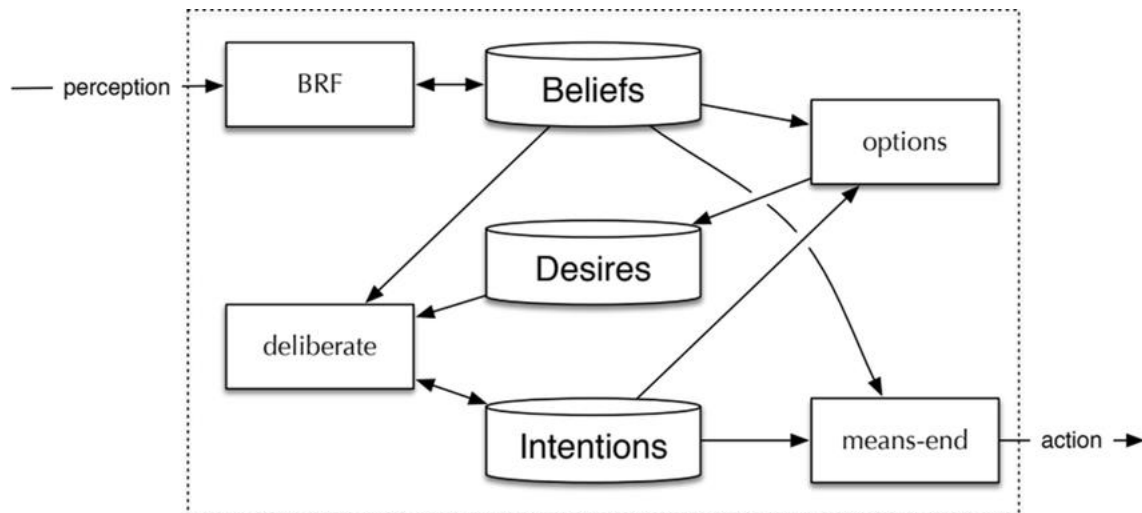
- CFP (Call for Proposals): Αίτημα υποβολής προτάσεων
- PROPOSE: Υποβολή πρότασης ως απάντηση σε CFP
- ACCEPT_PROPOSAL: Αποδοχή υποβληθείσας πρότασης
- REJECT_PROPOSAL: Απόρριψη υποβληθείσας πρότασης
- INFORM: Διαβίβαση πληροφοριακού περιεχομένου
- REQUEST: Αίτημα εκτέλεσης δράσης
- AGREE: Συμφωνία για εκτέλεση αιτήματος
- REFUSE: Άρνηση εκτέλεσης αιτήματος [32][31]

2.4.4 BDI Αρχιτεκτονική Μοντελοποίηση

Η αρχιτεκτονική Belief-Desire-Intention (BDI) αποτελεί ένα προηγμένο λογισμικό μοντέλο για τον προγραμματισμό ευφύων πρακτόρων [33][34]. Σε αυτή την αρχιτεκτονική, κάθε πράκτορας χαρακτηρίζεται από τρία θεμελιώδη συστατικά [35]:

Θεμελιώδη Στοιχεία BDI:

- Beliefs (Πεποιθήσεις): Το γνωστικό μοντέλο του πράκτορα για το περιβάλλον - περιλαμβάνει γνώση για την τρέχουσα κατάσταση πυρκαγιάς, θέσεις πυροσβεστικών μέσων και καιρικές συνθήκες
- Desires (Επιθυμίες): Οι στρατηγικοί στόχοι του πράκτορα - όπως κατάσβεση πυρκαγιάς, περιορισμός εξάπλωσης και προστασία κρίσιμων υποδομών
- Intentions (Προθέσεις): Οι συγκεκριμένες δράσεις που επιλέγει ο πράκτορας - συμπεριλαμβανομένης της κίνησης προς στοχευμένες θέσεις, εκτέλεσης κατασβεστικών ενεργειών και συντονισμού με άλλα μέσα [36][35]



Εικόνα 7: Το Μοντέλο Αρχιτεκτονικής BDI

2.5 Κατηγοροποίηση Υφιστάμενων Συστημάτων

2.5.1 Μαθηματικά και Γεωχωρικά Μοντέλα

Το FARSITE (Fire Area Simulator) αντιπροσωπεύει ένα από τα πιο καθιερωμένα εργαλεία για την προσομοίωση εξάπλωσης πυρκαγιάς διεθνώς [37][38]. Το σύστημα εφαρμόζει την αρχή του Huygens για τη διάδοση κυμάτων και απαιτεί την ενσωμάτωση γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών για τη διαχείριση χωρικών δεδομένων [37][39]. Πολλές ομοσπονδιακές υπηρεσίες διαχείρισης γης έχουν υιοθετήσει το FARSITE ως το προτιμώμενο μοντέλο για την πρόβλεψη ανάπτυξης πυρκαγιών [37].

Απαιτήσεις Χωρικών Δεδομένων:

- Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου για τοπογραφική ανάλυση
- Εξειδικευμένα μοντέλα καυσίμων (Anderson 1982, Scott και Burgan 2005)
- Δεδομένα κάλυψης δασικού θόλου
- Μετρήσεις ύψους βλάστησης

- Πληροφορίες ύψους βάσης κόμης δέντρων
- Δεδομένα πυκνότητας δασικής κόμης [39][40]

Το Prometheus, το εθνικό καναδικό μοντέλο προσομοίωσης εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών [41], διακρίνεται για την αρχιτεκτονική Microsoft COM που διευκολύνει τους προγραμματιστές στη δημιουργία, ενημέρωση και ενσωμάτωση λογισμικών εφαρμογών [41]. Το Prometheus στηρίζεται στο Fire Weather Index (FWI) και το Fire Behaviour Prediction (FBP) υποσύστημα του καναδικού συστήματος αξιολόγησης [41]

2.5.2 Συζευγμένα Φυσικά Μοντέλα

Το WRF-Fire λειτουργεί ως εξειδικευμένη φυσική μονάδα εντός του WRF ARW που επιτρέπει στους χρήστες την μοντελοποίηση ανάπτυξης δασικών πυρκαγιών ως απόκριση σε περιβαλλοντικές συνθήκες [42][43]. Το σύστημα χαρακτηρίζεται από δισκατεύθυνση σύζευξη μεταξύ της δυναμικής πυρκαγιάς και του ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, όπου η θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται επηρεάζει την ατμοσφαιρική κατάσταση [43][44]. Το WRF-Fire αξιοποιεί τεχνικές προσομοίωσης μεγάλων στροβίλων για τη θερμικά οδηγούμενη ατμοσφαιρική ροή [44].

Το FIRETEC αποτελεί ένα προηγμένο τρισδιάστατο μοντέλο μεταφοράς δύο φάσεων που επιλύει εξισώσεις διατήρησης για μάζα, ορμή, ενέργεια και χημικά συστατικά [45]. Το μοντέλο εφαρμόζει προσομοίωση μεγάλων στροβίλων (Large-Eddy Simulation) για τη μοντελοποίηση τυρβωδών ροών και θεωρείται ότι παρέχει την πιο λεπτομερή φυσική αναπαράσταση δασικών πυρκαγιών [45][46].

Το QUIC-Fire ενσωματώνει τον ώριμο τρισδιάστατο επιλυτή ανέμου QUIC-URB με ένα μοντέλο διάδοσης πυρκαγιάς βασισμένο σε κυτταρικά αυτόματα [47]. Το QUIC-Fire αναπτύχθηκε για να απαιτεί λιγότερους υπολογιστικούς πόρους και χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με τα περισσότερα μοντέλα υπολογιστικής ρευστομηχανικής, διατηρώντας παράλληλα υψηλή πιστότητα στη δυναμική πυρκαγιάς [47][48].

2.5.3 Πολυπρακτορικά και Cellular Automata Συστήματα

Το PHOENIX RapidFire αντιπροσωπεύει ένα προηγμένο εργαλείο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε από ερευνητικές ομάδες του Πανεπιστημίου της Μελβούρνης [49]. Το σύστημα εφαρμόζεται επιχειρησιακά στη Βικτώρια και τη Νέα Νότια Ουαλία της Αυστραλίας, παρέχοντας προβλέψεις σε χρονικά διαστήματα λίγων λεπτών, σε αντίθεση

με παραδοσιακές διαδικασίες που απαιτούσαν μία ώρα ή περισσότερο [49]. Το PHOENIX ενσωματώνει στατιστική μοντελοποίηση εμφάνισης πυρκαγιάς με μηχανιστικά μοντέλα διάδοσης υψηλής ανάλυσης [50].

Το Cell2Fire αποτελεί έναν καινοτόμο κυτταρικό προσομοιωτή ανάπτυξης δασικών πυρκαγιών που σχεδιάστηκε για ενσωμάτωση σε μοντέλα σχεδιασμού διαχείρισης τοπίου [51]. Το περιβάλλον πυρκαγιάς μοντελοποιείται μέσω διαίρεσης του τοπίου σε κύτταρα που χαρακτηρίζονται από καύσιμη ύλη, καιρικές συνθήκες, υγρασία και τοπογραφικές ιδιότητες [51]. Πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι το Cell2Fire μπορεί να προσομοιώσει αποτελεσματικά πυρκαγιές έως και 30 φορές ταχύτερα διατηρώντας παρόμοια ακρίβεια με προσομοιωτές τελευταίας τεχνολογίας (πάνω από 90% ακρίβεια) [51].

2.5.4 Εμπορικά και Βιομηχανικά Συστήματα

Το Wildfire Analyst λειτουργεί ως επαγγελματικό εργαλείο περίπλοκης προσομοίωσης και ανάλυσης κινδύνου με διεθνή χρήση σε υπηρεσίες και οργανισμούς [52]. Το σύστημα προσφέρει υποστήριξη αποφάσεων, ανάλυση επικινδυνότητας σε πραγματικό χρόνο και εργαλεία αξιολόγησης κινδύνου [52].

Τα FLIR Early Detection Systems αξιοποιούν θερμογραφική τεχνολογία για την πρόωρη ανίχνευση πυρκαγιών [53][54]. Οι θερμογραφικές κάμερες FLIR επιτρέπουν στους χειριστές την ανίχνευση πυρκαγιών σε αρχικά στάδια, σημαντικά πριν από την ενεργοποίηση παραδοσιακών αισθητήρων [53]. Το σύστημα μπορεί να προγραμματιστεί για καθορισμό θερμοκρασιακών ορίων συναγερμού και χρήση πολλαπλών σημείων στόχευσης [55].

Η OroraTech Wildfire Platform λειτουργεί ως δορυφορική πλατφόρμα που αξιοποιεί παγκόσμια δορυφορικά δεδομένα και εξελιγμένους αλγορίθμους για πρόωρη ανίχνευση και παρακολούθηση πυρκαγιών από το διάστημα [56][57]. Η εταιρεία έχει αναπτύξει σύστημα που συνδυάζει δεδομένα από διαφορετικούς δορυφόρους των ESA, NASA, NOAA και EUMETCast [56]

2.6 Ανάλυση Αγοράς και Τεχνολογικών Τάσεων

2.6.1 Οικονομικά Δεδομένα και Προβλέψεις Ανάπτυξης

Η παγκόσμια αγορά συστημάτων ανίχνευσης δασικών πυρκαγιών εκτιμήθηκε σε 1,2 δισεκατομμύρια δολάρια το 2024 και προβλέπεται να επιτύχει 2,8 δισεκατομμύρια δολάρια έως το 2033, καταγράφοντας σύνθετο ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης 10,2% για την περίοδο 2026-2033 [2][58]. Ταυτόχρονα, η αγορά λογισμικού προσομοίωσης πυρκαγιάς αναμένεται να εξελιχθεί από 0,3 δισεκατομμύρια δολάρια το 2024 σε 0,7 δισεκατομμύρια το 2033 με ρυθμό ανάπτυξης 9,8% .

2.6.2 Κυριάρχουσες Τεχνολογικές Εξελίξεις

Εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης: Τα συστήματα που βασίζονται σε τεχνητή νοημοσύνη μπορούν να επιτύχουν ακρίβεια ανίχνευσης έως 95%, παρέχοντας στις ομάδες πρώτης επέμβασης έγκαιρες και εφαρμόσιμες πληροφορίες [59]. Πλατφόρμες όπως η OroraTech χρησιμοποιούν εξελιγμένους αλγορίθμους για τη διαφοροποίηση συμβάντων πυρκαγιάς από άλλες θερμικές πηγές [57].

Τεχνολογίες Internet of Things: Η ενσωμάτωση IoT στα συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς αναπτύσσεται ταχέως, με προβλεπόμενη ανάπτυξη 13,2% ετησίως [2]. Συστήματα όπως της Dryad Networks αξιοποιούν δίκτυα κατανεμημένων αισθητήρων που παρέχουν συνεχή δεδομένα πραγματικού χρόνου [60].

2.7 Σύγκριση και Αξιολόγηση Προηγμένων Συστημάτων

2.7.1 Λεπτομερής Συγκριτική Ανάλυση

Πίνακας 1. Ανάλυση των συστημάτων

Σύστημα	Χρόνος Απόκρισης	Ποσοστό Ακρίβειας	Δυνατότητες Κλιμάκωσης	Κόστος Εφαρμογής
FARSITE	Μέτριος (1-4 ώρες)	85-92%	Περιφερειακό	Μέτριο

Prometheus	Μέτριος (1-3 ώρες)	88-95%	Εθνικό	Υψηλό
PHOENIX RapidFire	Ταχύς (<30 λεπτά)	90-96%	Περιφερειακό	Μέτριο-Υψηλό
WRF-Fire	Αργός (4-12 ώρες)	92-98%	Τοπικό	Πολύ Υψηλό
JADE MAS	Ταχύς (<1 ώρα)	80-90%	Υψηλό	Χαμηλό-Μέτριο
FIRETEC	Πολύ Αργός (12-48 ώρες)	95-99%	Πολύ Τοπικό	Εξαιρετικά Υψηλό
Cell2Fire	Πολύ Ταχύς (<15 λεπτά)	90-95%	Μεγάλης Κλίμακας	Χαμηλό

2.7.2 Αξιολόγηση Επιδόσεων

Ταχύτητα Επεξεργασίας:

- Cell2Fire: Επιτυγχάνει ταχύτητες έως 30 φορές ανώτερες από συμβατικά μοντέλα
- PHOENIX RapidFire: Παράγει προβλέψεις σε λεπτά έναντι παραδοσιακών ωριαίων διαδικασιών
- JADE MAS: Η παράλληλη επεξεργασία επιτρέπει ταχείες προσομοιώσεις
- FIRETEC: Προσφέρει ανώτερη ακρίβεια αλλά απαιτεί εκτεταμένο υπολογιστικό χρόνο [51][49][45].

2.8 Βέλτιστες Πρακτικές και Καινοτόμα Χαρακτηριστικά

Αποκεντρωμένη Λήψη Αποφάσεων: Οι πολυπρακτορικές προσεγγίσεις επιτρέπουν ταχεία αντίδραση και προσαρμογή σε δυναμικά περιβάλλοντα [61]. Το Multi-Agent Deep Reinforcement Learning αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματικό για συνεργατικές στρατηγικές κατάσβεσης [25].

Ενσωμάτωση Δεδομένων Πραγματικού Χρόνου: Η συλλογή και ανάλυση δεδομένων από αισθητήρες, δορυφορικές εικόνες και μη επανδρωμένα αεροσκάφη ενισχύει την

ακρίβεια προσομοίωσης [162]. Το FIRMS της NASA παρέχει δεδομένα θερμικών σημείων εντός 3 ωρών από δορυφορική παρατήρηση [63].

2.9 Προκλήσεις και Περιορισμοί

2.9.1 Τεχνικές Προκλήσεις

Υπολογιστική Πολυπλοκότητα: Μοντέλα υψηλής πιστότητας όπως το FIRETEC απαιτούν εξαιρετικά υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις που περιορίζουν την πρακτική εφαρμογή [45]. Η κλιμάκωση σε εκτεταμένες περιοχές παραμένει πρόκληση για πολλά συστήματα [39].

Αβεβαιότητα Δεδομένων: Η ακρίβεια τεχνολογιών ανίχνευσης μπορεί να επηρεαστεί από περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως νεφοκάλυψη ή πυκνή βλάστηση [2]. Η χωρική ανάλυση δορυφορικών εικόνων Landsat δεν παρέχει επαρκή λεπτομέρεια για εξειδικευμένη χωρική κλίμακα [64].

2.9.2 Οικονομικές και Πολιτικές Προκλήσεις

Υψηλά Κόστη Εφαρμογής: Τα κόστη εγκατάστασης και συντήρησης περιορίζουν την ευρεία υιοθέτηση, ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες περιοχές [2]. Συστήματα υψηλής πιστότητας απαιτούν σημαντικές επενδύσεις σε υπολογιστικό εξοπλισμό .

Κανονιστικό Πλαίσιο: Η απουσία ενοποιημένων προτύπων και κανονισμών δυσκολεύει την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών [65]. Διαφορετικές χώρες εφαρμόζουν διαφορετικά συστήματα αξιολόγησης κινδύνου [65].

2.10 Συμπεράσματα

Ο τομέας της πολυπρακτορικής προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών εξελίσσεται με ταχείς ρυθμούς, συνδυάζοντας προηγμένες τεχνικές από την τεχνητή νοημοσύνη και την περιβαλλοντική επιστήμη. Οι αποτελεσματικότερες εφαρμογές βασίζονται σε συνεργατική, αποκεντρωμένη λήψη αποφάσεων και ρεαλιστική μοντελοποίηση. Η αξιοποίηση του JADE framework για την ανάπτυξη πολυπρακτορικών συστημάτων προσομοίωσης πυρκαγιάς εντάσσεται στις πιο σύγχρονες και παραγωγικές τάσεις αυτού του επιστημονικού πεδίου.

Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης, Internet of Things και δορυφορικής παρακολούθησης υπόσχεται περαιτέρω βελτιώσεις στην ακρίβεια,

ταχύτητα και προσβασιμότητα των συστημάτων προσομοίωσης. Ωστόσο, η επιτυχής υλοποίηση απαιτεί αντιμετώπιση τεχνικών, οικονομικών και πολιτικών προκλήσεων μέσω διεθνούς συνεργασίας και τυποποίησης προτύπων.

Η παρούσα εργασία, μέσω της χρήσης JADE για την ανάπτυξη πολυπρακτορικής προσομοίωσης δασικής πυρκαγιάς και κατάσβεσης, συμβάλλει στην επέκταση του επιστημονικού πεδίου παρέχοντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει θεωρητικά στοιχεία με πρακτικές εφαρμογές για τη βελτίωση των στρατηγικών αντιμετώπισης δασικών πυρκαγιών.

3 Μεθοδολογία και Εργαλία ανάπτυξης

3.1 Περιγραφή του Αντικειμένου της Πτυχιακής

3.1.1 Προσδιορισμός του Προβλήματος

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα από τα πλέον καταστροφικά περιβαλλοντικά φαινόμενα παγκοσμίως, με αυξανόμενη συχνότητα και ένταση λόγω της κλιματικής αλλαγής [1]. Στις ΗΠΑ μόνο το 2020 καταγράφηκαν πάνω από 58.000 πυρκαγιές που κατέστρεψαν πάνω από 10 εκατομμύρια στρέμματα δασικών εκτάσεων [2]. Αυτή η αυξανόμενη τάση δημιουργεί επιτακτική ανάγκη για προηγμένα εργαλεία προσομοίωσης και διαχείρισης που θα βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των πυρκαγιών και στη βελτιστοποίηση των στρατηγικών κατάσβεσης.

Το κεντρικό πρόβλημα που αντιμετωπίζει η παρούσα εργασία εστιάζεται στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος προσομοίωσης που συνδυάζει τη μοντελοποίηση εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών με τον συντονισμό πολλαπλών πυροσβεστικών πόρων σε πραγματικό χρόνο [3]. Οι υφιστάμενες προσεγγίσεις παρουσιάζουν σημαντικούς περιορισμούς στην αποτελεσματική μοντελοποίηση της πολυπλοκότητας των πραγματικών σεναρίων διαχείρισης πυρκαγιών.

Περιορισμοί Υφιστάμενων Συστημάτων:

- Στατική Μοντελοποίηση: Τα περισσότερα συστήματα εστιάζουν αποκλειστικά στην εξάπλωση της πυρκαγιάς χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τη δυναμική αλληλεπίδραση με τους πυροσβεστικούς πόρους [4][5].

- Περιορισμένος Συντονισμός: Έλλειψη ολοκληρωμένων συστημάτων που να μοντελοποιούν τον συντονισμό μεταξύ διαφορετικών τύπων πυροσβεστικών μέσων (επίγεια, εναέρια, ειδικευμένες ομάδες) [6].
- Ελλιπής Αντιπροσώπηση Πραγματικότητας: Πολλά μοντέλα δεν ενσωματώνουν κρίσιμους παράγοντες όπως τη διαθεσιμότητα πόρων, τους χρόνους ανταπόκρισης και τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς .

3.1.2 Στρατηγική Επίλυσης μέσω Πολυπρακτορικών Συστημάτων

Η προτεινόμενη λύση αξιοποιεί την τεχνολογία των πολυπρακτορικών συστημάτων (Multi-Agent Systems) για την αντιμετώπιση των περιορισμών των συμβατικών προσεγγίσεων [1]. Κάθε πράκτορας αντιπροσωπεύει μια διαφορετική οντότητα στο σύστημα διαχείρισης πυρκαγιών - από την ίδια την πυρκαγιά έως τα διάφορα πυροσβεστικά μέσα και τον κεντρικό συντονιστή.

Πλεονεκτήματα Πολυπρακτορικής Προσέγγισης:

- Αποκεντρωμένη Λήψη Αποφάσεων: Κάθε πράκτορας λαμβάνει αυτόνομες αποφάσεις βασισμένες σε τοπικές πληροφορίες και γενικούς στόχους, μιμούμενος τη συμπεριφορά πραγματικών ομάδων διάσωσης .
- Ρεαλιστική Μοντελοποίηση: Η αλληλεπίδραση μεταξύ πρακτόρων δημιουργεί σύνθετη συμπεριφορά που προσεγγίζει την πραγματικότητα των επιχειρήσεων κατάσβεσης [7].
- Προσαρμοστικότητα: Το σύστημα μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά σενάρια και μεγέθη πυρκαγιών μέσω της προσθήκης ή αφαίρεσης πρακτόρων [8].

3.1.3 Υλοποιημένη Λύση και Καινοτόμα Χαρακτηριστικά

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια ολοκληρωμένη προσομοίωση που περιλαμβάνει:

Πολυεπίπεδη Αρχιτεκτονική Πρακτόρων:

- Πράκτορες Φωτιάς (FireAgent): Μοντελοποίηση δυναμικής εξάπλωσης, έντασης και πιθανότητας αναζοπύρωσης
- Κεντρικός Συντονιστής (FireControlAgent): Στρατηγικός σχεδιασμός και κατανομή πόρων
- Πυροσβεστικά Μέσα: Διαφοροποιημένοι πράκτορες για οχήματα, αεροσκάφη, ελικόπτερα και επίγειες ομάδες
- Περιβαλλοντικοί Πράκτορες (WeatherAgent): Δυναμική προσομοίωση καιρικών συνθηκών

Ρεαλιστική Προσομοίωση Λειτουργιών:

- Διαφοροποιημένες ικανότητες πυροσβεστικών μέσων (χωρητικότητα νερού, ταχύτητα, εμβέλεια)
- Χρόνοι ανταπόκρισης και ανεφοδιασμού
- Περιορισμοί διαθεσιμότητας και λειτουργικότητας
- Αυτόματη ενεργοποίηση πρωτοκόλλων έκτακτης ανάγκης

Διαδραστικό Περιβάλλον Προσομοίωσης:

- Γραφική αναπαράσταση δάσους 125x125 με real-time ενημερώσεις
- Χρωματική κωδικοποίηση καταστάσεων (υγιής βλάστηση, φωτιά, κατάσβεση)
- Στατιστικά παρακολούθησης πόρων και αποτελεσματικότητας

Καταγραφή και ανάλυση γεγονότων

3.1.4 Ειδικοί Στόχοι και Επιδιωκόμενα Αποτελέσματα

Η πτυχιακή εργασία στοχεύει στη δημιουργία ενός συστήματος που:

- Αποδεικνύει τη Βιωσιμότητα της Προσέγγισης: Επιδεικνύει ότι τα πολυπρακτορικά συστήματα μπορούν να μοντελοποιήσουν αποτελεσματικά την πολυπλοκότητα της διαχείρισης δασικών πυρκαγιών [10].
- Παρέχει Εργαλείο Εκπαίδευσης: Δημιουργεί ένα περιβάλλον όπου μπορούν να δοκιμαστούν διαφορετικές στρατηγικές και να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά τους [11].
- Υποστηρίζει Μελλοντική Έρευνα: Παρέχει μια βάση για περαιτέρω ανάπτυξη πιο σύνθετων μοντέλων και ενσωμάτωση πραγματικών δεδομένων [12].

3.2 Εργαλεία και Περιβάλλον Ανάπτυξης

3.2.1 Κεντρικό Framework Ανάπτυξης

JADE Framework v4.5.0: Η βάση του συστήματος είναι το Java Agent Development Framework, που παρέχει ολοκληρωμένη πλατφόρμα για την ανάπτυξη πολυπρακτορικών εφαρμογών [13]. Το JADE συμμορφώνεται με τις προδιαγραφές FIPA και προσφέρει ενσωματωμένα εργαλεία διαχείρισης, επικοινωνίας και παρακολούθησης πρακτόρων 14.

Κρίσιμες Ρυθμίσεις JADE:

- Main Container Configuration: Απαιτείται η εκκίνηση ενός κεντρικού container που φιλοξενεί τις υπηρεσίες AMS (Agent Management System), DF (Directory Facilitator) και ACC (Agent Communication Channel)

- Agent Lifecycle Management: Διαμόρφωση αυτόματης δημιουργίας και διαχείρισης πρακτόρων μέσω του MainContainer class
- Message Transport Protocol: Χρήση FIPA-ACL για τυποποιημένη επικοινωνία μεταξύ πρακτόρων με inform/request protocols

Java Development Kit 8+: Το σύστημα αναπτύχθηκε και δοκιμάστηκε με Java 8, αλλά είναι συμβατό με νεότερες εκδόσεις. Κρίσιμη είναι η σωστή ρύθμιση του CLASSPATH για να περιλαμβάνει το jade.jar [15].

3.2.2 Περιβάλλον Ανάπτυξης και Build System

Integrated Development Environment: Η ανάπτυξη μπορεί να γίνει σε οποιοδήποτε Java IDE (Eclipse, IntelliJ IDEA, NetBeans). Κρίσιμη είναι η προσθήκη του JADE jar file στο build path του project [16].

Project Structure και Compilation:

```
# Compilation command
javac -cp "lib/jade.jar" -d bin src/**/*.java
```

```
# Execution command
java -cp "bin;lib/jade.jar" MainContainer
```

Διαχείριση Dependencies: Το σύστημα έχει ελάχιστες εξωτερικές εξαρτήσεις - κυρίως το JADE framework και τις standard Java libraries για GUI (Swing/AWT)

3.2.3 Αρχιτεκτονική Συστήματος και Κρίσιμα Components

Agent Package Structure:

Το σύστημα οργανώνεται σε ξεχωριστές κλάσεις για κάθε τύπο πράκτορα, επιτρέποντας ευκολία συντήρησης και επέκτασης [9]:

- MainContainer.java: Entry point που ενεκινεί τη JADE πλατφόρμα και δημιουργεί τους αρχικούς πράκτορες
- agents/ package: Περιέχει όλους τους εξειδικευμένους πράκτορες
- gui/ package: Γραφικό περιβάλλον χρήστη με real-time visualization

Communication Patterns: Οι πράκτορες χρησιμοποιούν FIPA-ACL messages για επικοινωνία, με κύρια patterns τα INFORM (ενημέρωση κατάστασης), REQUEST (αίτηση βοήθειας) και PROPOSE (πρόταση δράσης) [17].

Behavior Implementation: Κάθε πράκτορας υλοποιεί συγκεκριμένα JADE Behaviors:

- CyclicBehaviour: Για συνεχή παρακολούθηση μηνυμάτων
- TickerBehaviour: Για περιοδικές ενέργειες (π.χ. εξάπλωση φωτιάς)

- WakerBehaviour: Για καθυστερημένες ενέργειες (π.χ. άφιξη πυροσβεστικού)

3.2.4 Ειδικές Ρυθμίσεις και Μη Προφανή Σημεία

GUI Integration με JADE: Η ενσωμάτωση του γραφικού περιβάλλοντος με τη JADE πλατφόρμα απαιτεί προσεκτικό χειρισμό των threads. Το GUI τρέχει στο Event Dispatch Thread ενώ οι πράκτορες στα δικά τους threads, απαιτώντας χρήση `SwingUtilities.invokeLater()` για thread-safe ενημερώσεις [18].

Agent State Synchronization: Κρίσιμο σημείο είναι ο συγχρονισμός κατάστασης μεταξύ πρακτόρων και GUI. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω observer pattern και careful message passing.

Resource Management: Το σύστημα διαχειρίζεται περιορισμένους πόρους (πυροσβεστικά μέσα) μέσω ενός απλού αλλά αποτελεσματικού availability tracking mechanism που αποτρέπει conflicts.

Weather Simulation Integration: Ο WeatherAgent προσομοιώνει δυναμικές καιρικές συνθήκες που επηρεάζουν τόσο την εξάπλωση της φωτιάς όσο και την αποτελεσματικότητα των πυροσβεστικών μέσων, απαιτώντας προσεκτικό tuning των παραμέτρων.

3.2.5 Deployment και Εκτέλεση

Single Machine Deployment: Το τρέχον σύστημα είναι σχεδιασμένο για εκτέλεση σε ένα μόνο μηχάνημα, με όλους τους πράκτορες να τρέχουν στον ίδιο JADE container. Αυτό απλοποιεί τη διαμόρφωση αλλά περιορίζει την κλιμάκωση.

Memory και Performance Considerations: Για μεγαλύτερες προσομοιώσεις, ενδέχεται να χρειαστεί αύξηση της Java heap memory:

```
java -Xms512m -Xmx2g -cp "bin;lib/jade.jar" MainContainer
```

Platform Independence: Το σύστημα είναι platform-independent χάρη στη Java, αλλά οι εντολές compilation και execution διαφέρουν ελαφρά μεταξύ Windows και Unix-based συστημάτων (κυρίως στον separator του classpath).

3.2.6 Εργαλεία Debugging και Monitoring

JADE Management Tools: Το JADE παρέχει ενσωματωμένα εργαλεία όπως το Remote Management Agent (RMA) και το Dummy Agent για debugging και παρακολούθηση της επικοινωνίας μεταξύ πρακτόρων [19].

Custom Logging: Το σύστημα περιλαμβάνει custom logging mechanisms για παρακολούθηση των ενεργειών των πρακτόρων και την ανάλυση της αποτελεσματικότητας των στρατηγικών.

Performance Metrics: Ενσωματωμένα metrics για παρακολούθηση χρόνων ανταπόκρισης, αποτελεσματικότητας κατάσβεσης και χρήσης πόρων.

4 Σχεδίαση και Υλοποίηση Συστήματος

4.1.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Η προτεινόμενη λύση υιοθετεί μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική πολυπρακτορικού συστήματος που συνδυάζει την αυτονομία των επιμέρους πρακτόρων με συντονισμένη συλλογική δράση για την αποτελεσματική διαχείριση δασικών πυρκαγιών [1](#). Το σύστημα ακολουθεί τη φιλοσοφία της αποκεντρωμένης λήψης αποφάσεων με κεντρικό συντονισμό, επιτρέποντας σε κάθε πράκτορα να λαμβάνει αυτόνομες αποφάσεις ενώ συμμετέχει σε έναν ευρύτερο συντονισμένο σχεδιασμό [\[2\]](#)[\[3\]](#).

Κεντρικά Στοιχεία Αρχιτεκτονικής:

Στρωματική Οργάνωση: Το σύστημα οργανώνεται σε τρία κύρια επίπεδα - το περιβαλλοντικό επίπεδο (environmental layer) που περιλαμβάνει τους πράκτορες φωτιάς και καιρού, το επιχειρησιακό επίπεδο (operational layer) με τους πυροσβεστικούς πράκτορες, και το στρατηγικό επίπεδο (strategic layer) με τον κεντρικό συντονιστή [\[4\]](#).

Αυτόνομη Λήψη Αποφάσεων: Κάθε πράκτορας διαθέτει ιδιαίτερες δυνατότητες αντίληψης, επεξεργασίας πληροφοριών και δράσης, επιτρέποντας προσαρμοστικές αντιδράσεις σε δυναμικά σενάρια χωρίς να απαιτείται συνεχής κεντρικός έλεγχος [\[5\]](#)[\[6\]](#).

Συνεργατική Νοημοσύνη: Η συλλογική αποτελεσματικότητα προκύπτει από την αλληλεπίδραση και τον συντονισμό μεταξύ των πρακτόρων, δημιουργώντας αναδυόμενη συμπεριφορά που υπερβαίνει τις δυνατότητες των επιμέρους στοιχείων [\[7\]](#)[\[2\]](#).

4.1.2 Μοντέλο Επικοινωνίας και Συντονισμού

Το σύστημα υιοθετεί το πρότυπο FIPA-ACL για την επικοινωνία μεταξύ πρακτόρων, εξασφαλίζοντας τυποποιημένη και αξιόπιστη ανταλλαγή πληροφοριών [89]. Η επικοινωνιακή στρατηγική βασίζεται σε τρία κεντρικά πρωτόκολλα:

Inform Protocol: Για την ενημέρωση σχετικά με αλλαγές κατάστασης (π.χ. εξάπλωση φωτιάς, διαθεσιμότητα πόρων) [10][11].

Request Protocol: Για αιτήματα βοήθειας και συντονισμό ενεργειών μεταξύ πυροσβεστικών μέσων [8][9].

Contract Net Protocol: Για δυναμική κατανομή καθηκόντων όταν απαιτείται συντονισμένη δράση πολλών πρακτόρων [5][12].

4.1.3 Στρατηγικές Συντονισμού

Το σύστημα ενσωματώνει πολλαπλές στρατηγικές συντονισμού που προσαρμόζονται δυναμικά ανάλογα με την κατάσταση της πυρκαγιάς και τη διαθεσιμότητα πόρων [3][13]:

Κεντρικός Συντονισμός: Ο FireControlAgent λειτουργεί ως κεντρικός συντονιστής που έχει επισκόπηση του συστήματος και κατανέμει πόρους στρατηγικά [1][42].

Αποκεντρωμένη Συνεργασία: Οι πυροσβεστικοί πράκτορες συνεργάζονται απευθείας μεταξύ τους για τοπικό συντονισμό χωρίς να απαιτείται παρέμβαση του κεντρικού συντονιστή [3][15].

Αυτο-οργάνωση: Σε κρίσιμες καταστάσεις, οι πράκτορες μπορούν να σχηματίσουν αυτόνομα ομάδες εργασίας για συλλογική αντιμετώπιση συγκεκριμένων απειλών [5][7].

4.1.4 Προσαρμοστικότητα και Ανθεκτικότητα

Η αρχιτεκτονική είναι σχεδιασμένη για να αντιμετωπίζει αποτελεσματικά δυναμικές αλλαγές και απροβλέπτες καταστάσεις [62]:

Δυναμική Προσαρμογή: Οι πράκτορες μπορούν να τροποποιήσουν τη συμπεριφορά τους βάσει των εκάστοτε συνθηκών (καιρικές συνθήκες, ένταση φωτιάς, διαθεσιμότητα πόρων) [16][14].

Ανθεκτικότητα στα Σφάλματα: Η αποτυχία ενός πράκτορα δεν θέτει σε κίνδυνο τη λειτουργία του συνολικού συστήματος, καθώς άλλοι πράκτορες μπορούν να αναλάβουν τα καθήκοντά του [7][15].

Κλιμάκωση: Το σύστημα μπορεί να προσαρμοστεί σε διαφορετικά μεγέθη πυρκαγιών μέσω της προσθήκης ή αφαίρεσης πρακτόρων χωρίς ανάγκη επανασχεδιασμού [6][2].

4.2 Πειργραφή της Υλοποίησης

4.2.1 Κλάσεις Πρακτόρων και Δομή Συστήματος

Ο FireAgent αποτελεί τον πυρήνα του συστήματος προσομοίωσης, υπεύθυνος για τη μοντελοποίηση της δυναμικής εξάπλωσης πυρκαγιάς [14]:

```
public class FireAgent extends Agent {
    private int intensity;           // Ένταση φωτιάς (0-100)
    private int x, y;                // Θέση στο grid
    private boolean isActive;        // Κατάσταση ενεργότητας
    private double spreadProbability; // Πιθανότητα εξάπλωσης

    protected void setup() {
        // Αρχικοποίηση παραμέτρων φωτιάς
        intensity = 70;
        isActive = true;
        spreadProbability = 0.8;

        // Προσθήκη συμπεριφοράς εξάπλωσης
        addBehaviour(new FireSpreadBehaviour());
        addBehaviour(new FireIntensityBehaviour());
        addBehaviour(new CommunicationBehaviour());
    }

    private class FireSpreadBehaviour extends TickerBehaviour {
        public FireSpreadBehaviour() {
            super(FireAgent.this, 3000); // Εκτέλεση κάθε 3 δευτερόλεπτα
        }

        protected void onTick() {
            if (isActive && intensity > 20) {
                // Υπολογισμός εξάπλωσης βάσει καιρικών συνθηκών
                calculateSpread();
                // Ενημέρωση γειτονικών κελιών
                notifyNeighborCells();
                // Αποστολή ενημέρωσης στον κεντρικό συντονιστή
                informFireControl();
            }
        }
    }
}
```

Ο FireAgent χρησιμοποιεί TickerBehaviour για την περιοδική αξιολόγηση της εξάπλωσης, ενσωματώνοντας παράγοντες όπως την ένταση της φωτιάς, τις καιρικές συνθήκες και τον τύπο καυσίμου [16][17].

Ο FireControlAgent λειτουργεί ως το στρατηγικό κέντρο του συστήματος, υπεύθυνος για τον συντονισμό όλων των πυροσβεστικών πόρων [14]:

```

public class FireControlAgent extends Agent {
    private Map<String, AgentStatus> availableAgents;
    private List<FireLocation> activeFirefronts;
    private ResourceAllocationStrategy strategy;

    protected void setup() {
        availableAgents = new HashMap<>();
        activeFirefronts = new ArrayList<>();
        strategy = new PriorityBasedAllocation();

        addBehaviour(new ResourceCoordinationBehaviour());
        addBehaviour(new EmergencyResponseBehaviour());
        addBehaviour(new StatusMonitoringBehaviour());
    }

    private class ResourceCoordinationBehaviour extends CyclicBehaviour {
        public void action() {
            ACLMessage msg = receive();
            if (msg != null) {
                switch(msg.getPerformative()) {
                    case ACLMessage.REQUEST:
                        handleResourceRequest(msg);
                        break;
                    case ACLMessage.INFORM:
                        updateSystemStatus(msg);
                        break;
                    case ACLMessage.CFP:
                        evaluateProposal(msg);
                        break;
                }
            } else {
                block();
            }
        }

        private void handleResourceRequest(ACLMessage request) {
            // Ανάλυση αιτήματος πόρων
            String content = request.getContent();
            FireLocation location = parseFireLocation(content);

            // Εύρεση βέλτιστου πράκτορα για την αποστολή
            String bestAgent = strategy.selectBestAgent(
                location, availableAgents);

            if (bestAgent != null) {
                // Αποστολή εντολής ανάθεσης
                sendAssignmentOrder(bestAgent, location);
            }
        }
    }
}

```

Η κλάση υλοποιεί σύνθετα αλγόριθμια κατανομής πόρων που λαμβάνουν υπόψη την απόσταση, τη διαθεσιμότητα, την ικανότητα και την τρέχουσα κατάσταση κάθε πυροσβεστικού πράκτορα [12][4].

Οι πυροσβεστικοί πράκτορες αποτελούν την επιχειρησιακή δύναμη του συστήματος. Κάθε τύπος έχει ειδικές δυνατότητες και περιορισμούς:

```

public class FireTruckAgent extends Agent {

```

```

private int waterCapacity = 1000;    // Χωρητικότητα σε λίτρα
private int currentWater;           // Τρέχουσα ποσότητα νερού
private Position currentPosition;    // Τρέχουσα θέση
private AgentState state;            // AVAILABLE, BUSY, REFILLING
private int suppressionEffectiveness = 60; // Αποτελεσματικότητα κατάσβεσης

protected void setup() {
    currentWater = waterCapacity;
    state = AgentState.AVAILABLE;
    currentPosition = new Position(0, 0);

    addBehaviour(new TaskExecutionBehaviour());
    addBehaviour(new WaterManagementBehaviour());
    addBehaviour(new CommunicationBehaviour());
}

private class TaskExecutionBehaviour extends CyclicBehaviour {
    public void action() {
        ACLMessage msg = receive(MessageTemplate.MatchPerformative(
            ACLMessage.REQUEST));

        if (msg != null) {
            String task = msg.getContent();
            if (canExecuteTask(task)) {
                state = AgentState.BUSY;
                executeSuppressionTask(task);
                reportTaskCompletion();
            } else {
                sendRefusalMessage(msg.getSender());
            }
        } else {
            block();
        }
    }
}

private void executeSuppressionTask(String task) {
    // Ανάλυση καθήκοντος και μετάβαση στη θέση
    FireLocation target = parseLocation(task);
    moveToLocation(target);

    // Εκτέλεση κατάσβεσης
    if (currentWater >= 100) {
        suppressFire(target);
        currentWater -= 100;

        // Ενημέρωση περί αποτελεσματικότητας
        reportSuppressionResult(target, suppressionEffectiveness);
    }
}
}
}

```

Οι εναέριοι πράκτορες διαθέτουν μεγαλύτερη ικανότητα κατάσβεσης αλλά περιορισμένη διάρκεια λειτουργίας [14]:

```

public class AircraftAgent extends Agent {
    private int waterCapacity = 3000;    // Μεγαλύτερη χωρητικότητα
    private int refillTime = 8000;      // Χρόνος ανεφοδιασμού (ms)
    private int coverageRadius = 3;     // Ακτίνα κάλυψης κατάσβεσης
    private boolean isRefueling = false;
}

```

```

private class AerialSuppressionBehaviour extends SimpleBehaviour {
    private boolean taskCompleted = false;

    public void action() {
        if (!isRefueling && currentWater > 500) {
            // Εκτέλεση εναέρας κατάσβεσης
            performAerialDrop();
            currentWater -= 500;

            if (currentWater < 500) {
                initiateRefueling();
            }
            taskCompleted = true;
        }
    }

    private void performAerialDrop() {
        // Κατάσβεση σε ευρύτερη περιοχή
        int effectiveness = 80; // Υψηλή αποτελεσματικότητα
        notifyAreaSuppression(coverageRadius, effectiveness);
    }

    public boolean done() {
        return taskCompleted;
    }
}

```

Ο WeatherAgent προσομοιώνει τις καιρικές συνθήκες που επηρεάζουν τόσο την εξάπλωση της φωτιάς όσο και την αποτελεσματικότητα των πυροσβεστικών ενεργειών [14]:

```

public class WeatherAgent extends Agent {
    private int windSpeed; // Ταχύτητα ανέμου (km/h)
    private int windDirection; // Κατεύθυνση ανέμου (μοίρες)
    private int temperature; // Θερμοκρασία (°C)
    private int humidity; // Υγρασία (%)
    private double fireRiskIndex; // Δείκτης κινδύνου πυρκαγιάς

    protected void setup() {
        // Αρχικοποίηση τυχαίων καιρικών συνθηκών
        generateInitialConditions();

        addBehaviour(new WeatherUpdateBehaviour());
        addBehaviour(new RiskAssessmentBehaviour());
    }

    private class WeatherUpdateBehaviour extends TickerBehaviour {
        public WeatherUpdateBehaviour() {
            super(WeatherAgent.this, 5000); // Ενημέρωση κάθε 5 δευτερόλεπτα
        }

        protected void onTick() {
            // Δυναμική αλλαγή καιρικών συνθηκών
            updateWeatherConditions();

            // Υπολογισμός δείκτη κινδύνου
            calculateFireRiskIndex();

            // Ενημέρωση όλων των ενδιαφερόμενων πρακτόρων
            broadcastWeatherUpdate();
        }
    }
}

```

```

    }

    private void calculateFireRiskIndex() {
        // Υπολογισμός βάσει αλγόριθμου Fire Weather Index
        double windFactor = windSpeed * 0.1;
        double tempFactor = (temperature - 20) * 0.05;
        double humidityFactor = (100 - humidity) * 0.02;

        fireRiskIndex = windFactor + tempFactor + humidityFactor;
        fireRiskIndex = Math.max(0, Math.min(fireRiskIndex, 10));
    }
}

```

4.2.2 Συστήματα Επικοινωνίας και Συντονισμού

Το σύστημα χρησιμοποιεί τυποποιημένα πρωτόκολλα επικοινωνίας FIPA-ACL για την αξιόπιστη ανταλλαγή πληροφοριών [8][9]:

```

public class CommunicationProtocols {

    // Ενημέρωση περί νέας φωτιάς
    public static ACLMessage createFireAlert(Agent sender,
                                             FireLocation location) {
        ACLMessage msg = new ACLMessage(ACLMessage.INFORM);
        msg.addReceiver(new AID("fire-control", AID.ISLOCALNAME));
        msg.setLanguage("fire-ontology");
        msg.setOntology("emergency-response");
        msg.setContent("FIRE_DETECTED:" + location.toString());
        return msg;
    }

    // Αίτημα πυροσβεστικής βοήθειας
    public static ACLMessage createAssistanceRequest(Agent sender,
                                                    FireLocation location,
                                                    int urgencyLevel) {
        ACLMessage msg = new ACLMessage(ACLMessage.REQUEST);
        msg.addReceiver(new AID("fire-control", AID.ISLOCALNAME));
        msg.setLanguage("fire-ontology");
        msg.setContent("ASSISTANCE_NEEDED:" + location.toString() +
                      ":URGENCY:" + urgencyLevel);
        msg.setReplyWith("req-" + System.currentTimeMillis());
        return msg;
    }

    // Πρόταση συνεργασίας μεταξύ πυροσβεστικών μέσων
    public static ACLMessage createCooperationProposal(Agent sender,
                                                       AID partner,
                                                       String task) {
        ACLMessage msg = new ACLMessage(ACLMessage.PROPOSE);
        msg.addReceiver(partner);
        msg.setLanguage("fire-ontology");
        msg.setContent("COOPERATION_PROPOSAL:" + task);
        msg.setConversationId("coop-" + System.currentTimeMillis());
        return msg;
    }
}

```

Το σύστημα εφαρμόζει το Contract Net Protocol για την αποτελεσματική κατανομή καθηκόντων [5][12]:

```
public class TaskAllocationBehaviour extends ContractNetInitiator {
    private FireLocation targetLocation;
    private int requiredCapacity;

    public TaskAllocationBehaviour(Agent a, ACLMessage cfp) {
        super(a, cfp);
        this.targetLocation = parseLocation(cfp.getContent());
        this.requiredCapacity = calculateRequiredCapacity();
    }

    protected void handleAllResponses(Vector responses, Vector acceptances) {
        // Αξιολόγηση προτάσεων από διαθέσιμους πράκτορες
        AgentProposal bestProposal = null;
        double bestScore = Double.NEGATIVE_INFINITY;

        for (ACLMessage response : responses) {
            if (response.getPerformative() == ACLMessage.PROPOSE) {
                AgentProposal proposal = parseProposal(response);
                double score = evaluateProposal(proposal);

                if (score > bestScore) {
                    bestScore = score;
                    bestProposal = proposal;
                }
            }
        }

        // Αποδοχή καλύτερης πρότασης
        if (bestProposal != null) {
            ACLMessage accept = new ACLMessage(ACLMessage.ACCEPT_PROPOSAL);
            accept.addReceiver(bestProposal.getSender());
            accept.setContent("TASK_ASSIGNED:" + targetLocation.toString());
            acceptances.add(accept);
        }

        private double evaluateProposal(AgentProposal proposal) {
            // Σύνθετος αλγόριθμος αξιολόγησης βάσει:
            // - Απόστασης από τόπο συμβάντος
            // - Διαθέσιμων πόρων
            // - Εμπειρίας/αποτελεσματικότητας
            double distanceScore = 1.0 / (1.0 + proposal.getDistance());
            double capacityScore = proposal.getCapacity() / (double)requiredCapacity;
            double experienceScore = proposal.getExperienceLevel() / 10.0;

            return 0.4 * distanceScore + 0.4 * capacityScore + 0.2 * experienceScore;
        }
    }
}
```

4.2.3 Γραφικό Περιβάλλον Χρήστη

Το γραφικό περιβάλλον υλοποιείται με Java Swing και παρέχει real-time οπτικοποίηση της κατάστασης του συστήματος [14]:

```
public class FireSimulationGUI extends JFrame implements Observer {
    private static final int GRID_SIZE = 5;
```

```

private JButton[][] gridButtons;
private JPanel gridPanel;
private JPanel controlPanel;
private JTextArea logArea;
private JLabel statisticsLabel;

// Χρωματική κωδικοποίηση καταστάσεων
private static final Color HEALTHY_VEGETATION = Color.GREEN;
private static final Color ACTIVE_FIRE = Color.RED;
private static final Color WATER_DROP = Color.BLUE;
private static final Color EXTINGUISHED = Color.GRAY;
private static final Color FIRE_TRUCK = Color.ORANGE;

public FireSimulationGUI() {
    initializeComponents();
    setupLayout();
    registerEventHandlers();
}

private void initializeComponents() {
    setTitle("Wildfire Management Multi-Agent System");
    setDefaultCloseOperation(JFrame.EXIT_ON_CLOSE);
    setSize(800, 600);

    // Δημιουργία grid προσομοίωσης
    gridPanel = new JPanel(new GridLayout(GRID_SIZE, GRID_SIZE));
    gridButtons = new JButton[GRID_SIZE][GRID_SIZE];

    for (int i = 0; i < GRID_SIZE; i++) {
        for (int j = 0; j < GRID_SIZE; j++) {
            gridButtons[i][j] = new JButton();
            gridButtons[i][j].setBackground(HEALTHY_VEGETATION);
            gridButtons[i][j].setPreferredSize(new Dimension(80, 80));
            gridButtons[i][j].setFont(new Font("Arial", Font.BOLD, 12));
            gridPanel.add(gridButtons[i][j]);
        }
    }

    // Panel ελέγχου
    controlPanel = new JPanel(new FlowLayout());
    JButton fireButton = new JButton("🔥 Φωτιά");
    JButton emergencyButton = new JButton("🚒 Έκτακτη");

    fireButton.addActionListener(e -> simulateFire());
    emergencyButton.addActionListener(e -> triggerEmergencyProtocol());

    controlPanel.add(fireButton);
    controlPanel.add(emergencyButton);

    // Περιοχή καταγραφής γεγονότων
    logArea = new JTextArea(10, 40);
    logArea.setEditable(false);
    JScrollPane scrollPane = new JScrollPane(logArea);

    // Στατιστικά
    statisticsLabel = new JLabel("Διαθέσιμοι Πόροι: Φορηγά(3), Αεροσκάφη(2),  
Ελικόπτερα(2)");
}

public void updateVisualization(SystemState state) {
    SwingUtilities.invokeLater(() -> {

```

```

// Ενημέρωση grid βάσει κατάστασης συστήματος
for (int i = 0; i < GRID_SIZE; i++) {
    for (int j = 0; j < GRID_SIZE; j++) {
        CellState cellState = state.getCellState(i, j);
        updateCellVisualization(i, j, cellState);
    }
}

// Ενημέρωση στατιστικών
updateStatistics(state);

// Προσθήκη νέων γεγονότων στο log
appendToLog(state.getLatestEvents());
});
}

private void updateCellVisualization(int x, int y, CellState state) {
    JButton cell = gridButtons[x][y];

    switch (state.getType()) {
        case HEALTHY:
            cell.setBackground(HEALTHY_VEGETATION);
            cell.setText("🌱");
            break;
        case BURNING:
            cell.setBackground(ACTIVE_FIRE);
            cell.setText("🔥");
            break;
        case WATER_APPLICATION:
            cell.setBackground(WATER_DROP);
            cell.setText("💧");
            break;
        case EXTINGUISHED:
            cell.setBackground(EXTINGUISHED);
            cell.setText("☐");
            break;
        case FIRE_TRUCK_PRESENT:
            cell.setBackground(FIRE_TRUCK);
            cell.setText("🚒");
            break;
        case AIRCRAFT_PRESENT:
            cell.setText("✈️");
            break;
        case HELICOPTER_PRESENT:
            cell.setText("🚁");
            break;
    }
}
}

```

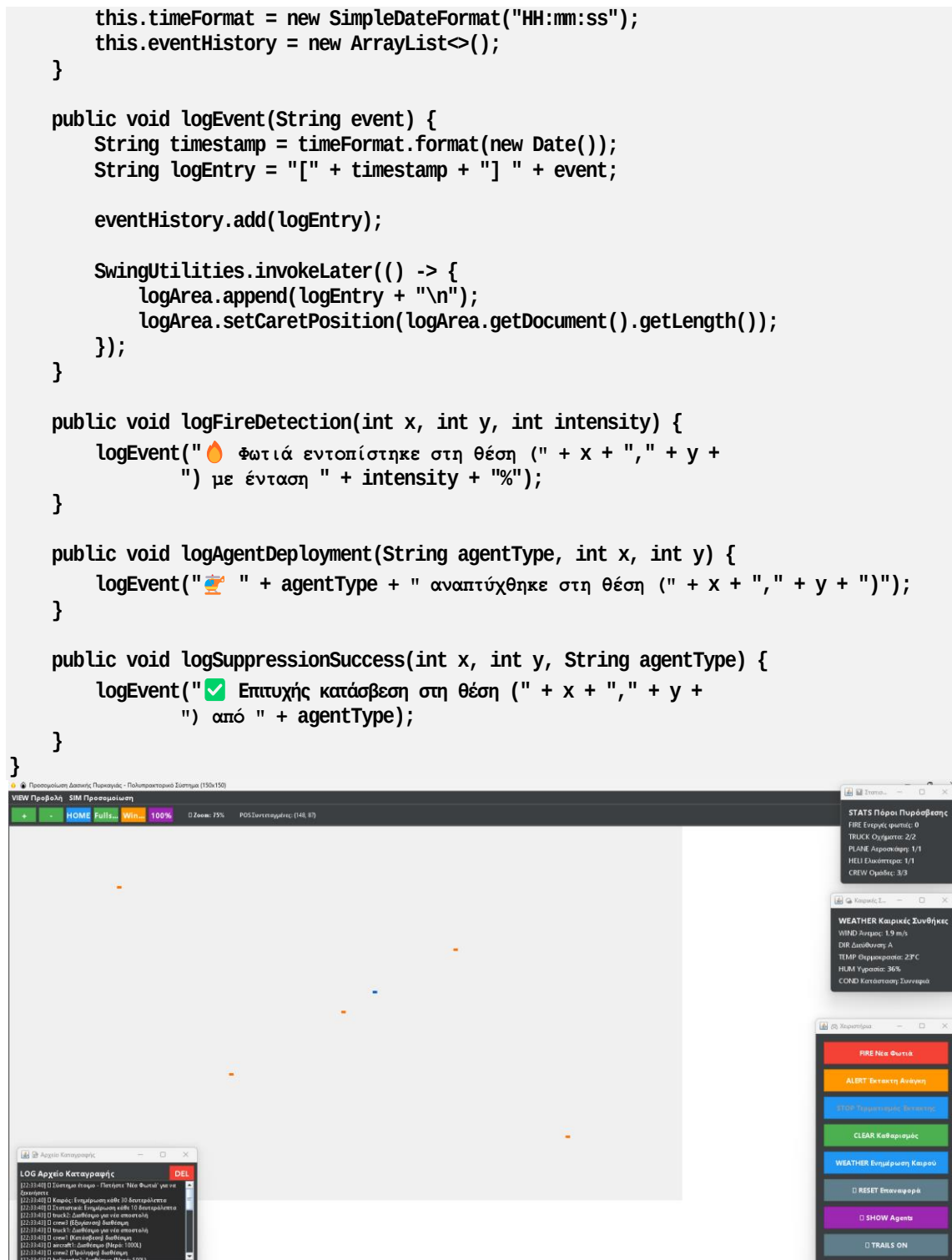
Το σύστημα καταγράφει όλα τα σημαντικά γεγονότα για ανάλυση και αξιολόγηση [14]:

```

public class EventLogger {
    private JTextArea logArea;
    private SimpleDateFormat timeFormat;
    private List<String> eventHistory;

    public EventLogger(JTextArea logArea) {
        this.logArea = logArea;
    }
}

```



Εικόνα 8: Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής

4.2.4 Αλγόριθμοι Λήψης Αποφάσεων

Το σύστημα υλοποιεί πολλαπλές στρατηγικές κατάσβεσης που επιλέγονται δυναμικά [18][19]:

```

public class SuppressionStrategy {

```

```

public enum StrategyType {
    DIRECT_ATTACK,        // Άμεση επίθεση στη φωτιά
    PARALLEL_ATTACK,      // Παράλληλη επίθεση στα πλάγια
    INDIRECT_ATTACK,      // Έμμεση επίθεση με δημιουργία εμποδίων
    AERIAL_SUPPORT,        // Εναέρια υποστήριξη
    COORDINATED_ASSAULT    // Συντονισμένη επίθεση
}

public static StrategyType selectOptimalStrategy(FireConfiguration fire,
                                                List<Agent> availableAgents,
                                                WeatherConditions weather) {
    // Ανάλυση παραγόντων απόφασης
    int fireIntensity = fire.getIntensity();
    int windSpeed = weather.getWindSpeed();
    int availableWaterCapacity = calculateTotalCapacity(availableAgents);
    double terrainDifficulty = fire.getTerrainDifficulty();

    // Αλγόριθμος επιλογής στρατηγικής
    if (fireIntensity < 30 && windSpeed < 15) {
        return StrategyType.DIRECT_ATTACK;
    } else if (fireIntensity < 60 && availableWaterCapacity > 2000) {
        return StrategyType.PARALLEL_ATTACK;
    } else if (windSpeed > 25 || terrainDifficulty > 0.7) {
        return StrategyType.INDIRECT_ATTACK;
    } else if (hasAerialCapabilities(availableAgents)) {
        return StrategyType.AERIAL_SUPPORT;
    } else {
        return StrategyType.COORDINATED_ASSAULT;
    }
}

public static TaskPlan generateTaskPlan(StrategyType strategy,
                                       FireConfiguration fire,
                                       List<Agent> agents) {
    TaskPlan plan = new TaskPlan();

    switch (strategy) {
        case DIRECT_ATTACK:
            plan = generateDirectAttackPlan(fire, agents);
            break;
        case COORDINATED_ASSAULT:
            plan = generateCoordinatedPlan(fire, agents);
            break;
        // Άλλες στρατηγικές...
    }

    return plan;
}

private static TaskPlan generateCoordinatedPlan(FireConfiguration fire,
                                                List<Agent> agents) {
    TaskPlan plan = new TaskPlan();

    // Διαίρεση σε ομάδες
    List<AgentGroup> groups = formGroups(agents);

    for (AgentGroup group : groups) {
        // Ανάθεση διαφορετικού τμήματος της φωτιάς σε κάθε ομάδα
        FireSector sector = assignSector(fire, group);
    }
}

```

```

        // Δημιουργία συντονισμένων καθηκόντων
        List<Task> groupTasks = createGroupTasks(sector, group);
        plan.addTasks(groupTasks);
    }

    return plan;
}
}

```

Για την αποτελεσματική κατανομή περιορισμένων πόρων, το σύστημα χρησιμοποιεί αλγόριθμο προτεραιοποίησης βάσει πολλαπλών κριτηρίων [12]:

```

public class PriorityAlgorithm {

    public static class FirePriority implements Comparable<FirePriority> {
        private FireLocation location;
        private double priorityScore;
        private long detectionTime;

        // Υπολογισμός προτεραιότητας βάσει πολλαπλών παραγόντων
        public double calculatePriority(WeatherConditions weather,
                                       List<Asset> threatenedAssets) {
            double intensityFactor = location.getIntensity() / 100.0;
            double spreadRiskFactor = calculateSpreadRisk(weather);
            double assetThreatFactor = calculateAssetThreat(threatenedAssets);
            double timeFactor = calculateTimeFactor();

            priorityScore = (0.3 * intensityFactor) +
                           (0.3 * spreadRiskFactor) +
                           (0.3 * assetThreatFactor) +
                           (0.1 * timeFactor);

            return priorityScore;
        }

        private double calculateSpreadRisk(WeatherConditions weather) {
            // Υπολογισμός κινδύνου εξάπλωσης βάσει ανέμου και υγρασίας
            double windRisk = Math.min(weather.getWindSpeed() / 50.0, 1.0);
            double humidityRisk = (100.0 - weather.getHumidity()) / 100.0;
            return (windRisk + humidityRisk) / 2.0;
        }

        @Override
        public int compareTo(FirePriority other) {
            return Double.compare(other.priorityScore, this.priorityScore);
        }
    }

    public static List<FireLocation> prioritizeFirefronts(
        List<FireLocation> fires,
        WeatherConditions weather,
        List<Asset> assets) {

        List<FirePriority> priorities = new ArrayList<>();

        for (FireLocation fire : fires) {
            FirePriority priority = new FirePriority(fire);
            priority.calculatePriority(weather, assets);
            priorities.add(priority);
        }
    }
}

```

```

// Ταξινόμηση κατά φθίνουσα προτεραιότητα
Collections.sort(priorities);

return priorities.stream()
    .map(p -> p.getLocation())
    .collect(Collectors.toList());
}
}

```

4.2.5 Διαχείριση Κατάστασης και Συγχρονισμός

Για την αποτελεσματική διαχείριση της κατάστασης του συστήματος και τον συγχρονισμό μεταξύ πρακτόρων και GUI [14]:

```

public class SystemStateManager {
    private CellState[][] gridState;
    private Map<String, AgentInfo> agentStates;
    private List<Observer> observers;
    private Object stateLock = new Object();

    public SystemStateManager(int gridSize) {
        this.gridState = new CellState[gridSize][gridSize];
        this.agentStates = new ConcurrentHashMap<>();
        this.observers = new ArrayList<>();
        initializeGrid();
    }

    public void updateCellState(int x, int y, CellType type, String agentId) {
        synchronized (stateLock) {
            gridState[x][y].setType(type);
            gridState[x][y].setLastUpdated(System.currentTimeMillis());

            if (agentId != null) {
                gridState[x][y].setOccupyingAgent(agentId);
            }

            notifyObservers();
        }
    }

    public void updateAgentState(String agentId, Position position,
                                AgentStatus status) {
        AgentInfo info = agentStates.get(agentId);
        if (info == null) {
            info = new AgentInfo(agentId);
            agentStates.put(agentId, info);
        }

        info.setPosition(position);
        info.setStatus(status);
        info.setLastSeen(System.currentTimeMillis());

        notifyObservers();
    }

    private void notifyObservers() {
        SystemState currentState = createSnapshot();
        for (Observer observer : observers) {
            observer.update(currentState);
        }
    }
}

```

```

    }

    // Thread-safe snapshot της τρέχουσας κατάστασης
    private SystemState createSnapshot() {
        synchronized (stateLock) {
            return new SystemState(
                deepCopyGrid(gridState),
                new HashMap<>(agentStates),
                System.currentTimeMillis()
            );
        }
    }
}

```

Το σύστημα χρησιμοποιεί το Observer pattern για την αποτελεσματική ενημέρωση του GUI [20][14]:

```

public interface Observer {
    void update(SystemState state);
}

public class GUIUpdateManager implements Observer {
    private FireSimulationGUI gui;
    private EventLogger logger;
    private StatisticsCalculator stats;

    public GUIUpdateManager(FireSimulationGUI gui) {
        this.gui = gui;
        this.logger = new EventLogger(gui.getLogArea());
        this.stats = new StatisticsCalculator();
    }

    @Override
    public void update(SystemState state) {
        // Ενημέρωση οπτικοποίησης
        gui.updateVisualization(state);

        // Υπολογισμός και εμφάνιση στατιστικών
        Statistics currentStats = stats.calculate(state);
        gui.updateStatistics(currentStats);

        // Καταγραφή σημαντικών αλλαγών
        List<String> newEvents = detectSignificantChanges(state);
        for (String event : newEvents) {
            logger.logEvent(event);
        }
    }

    private List<String> detectSignificantChanges(SystemState state) {
        List<String> events = new ArrayList<>();

        // Ανίχνευση νέων φωτιών
        for (CellState cell : state.getChangedCells()) {
            if (cell.getType() == CellType.BURNING && cell.isNewlyIgnited()) {
                events.add("Νέα φωτιά εντοπίστηκε στη θέση " +
                    cell.getPosition());
            }
        }

        // Ανίχνευση επιτυχούς κατάσβεσης
        for (CellState cell : state.getChangedCells()) {

```

```

        if (cell.getType() == CellType.EXTINGUISHED &&
            cell.wasRecentlyExtinguished()) {
            events.add("Επιτυχής κατάσβεση στη θέση " +
                      cell.getPosition());
        }
    }

    return events;
}

```

4.2.6 Αποτελέσματα και Αξιολόγηση Απόδοσης

Το σύστημα συλλέγει αναλυτικά metrics για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας [14]:

```

public class PerformanceMetrics {
    private long simulationStartTime;
    private int totalFiresCaused;
    private int totalFiresExtinguished;
    private int totalCellsBurned;
    private Map<String, Integer> agentUtilization;
    private List<ResponseTime> responseTimes;

    public void recordFireEvent(FireEvent event) {
        switch (event.getType()) {
            case FIRE_DETECTED:
                totalFiresCaused++;
                break;
            case FIRE_EXTINGUISHED:
                totalFiresExtinguished++;
                break;
            case CELL_BURNED:
                totalCellsBurned++;
                break;
        }
    }

    public void recordAgentResponse(String agentId, long responseTime) {
        responseTimes.add(new ResponseTime(agentId, responseTime));
        agentUtilization.put(agentId,
                             agentUtilization.getOrDefault(agentId, 0) + 1);
    }

    public PerformanceReport generateReport() {
        double successRate = (double) totalFiresExtinguished / totalFiresCaused;
        double averageResponseTime = responseTimes.stream()
                                                    .mapToLong(ResponseTime::getTime)
                                                    .average()
                                                    .orElse(0.0);

        return new PerformanceReport(
            successRate,
            averageResponseTime,
            totalCellsBurned,
            agentUtilization
        );
    }
}

```

Η υλοποίηση αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της πολυπρακτορικής προσέγγισης στη διαχείριση δασικών πυρκαγιών, συνδυάζοντας την αυτονομία των επιμέρους πρακτόρων με συντονισμένη συλλογική δράση για τη βέλτιστη αντιμετώπιση κρίσιμων καταστάσεων.

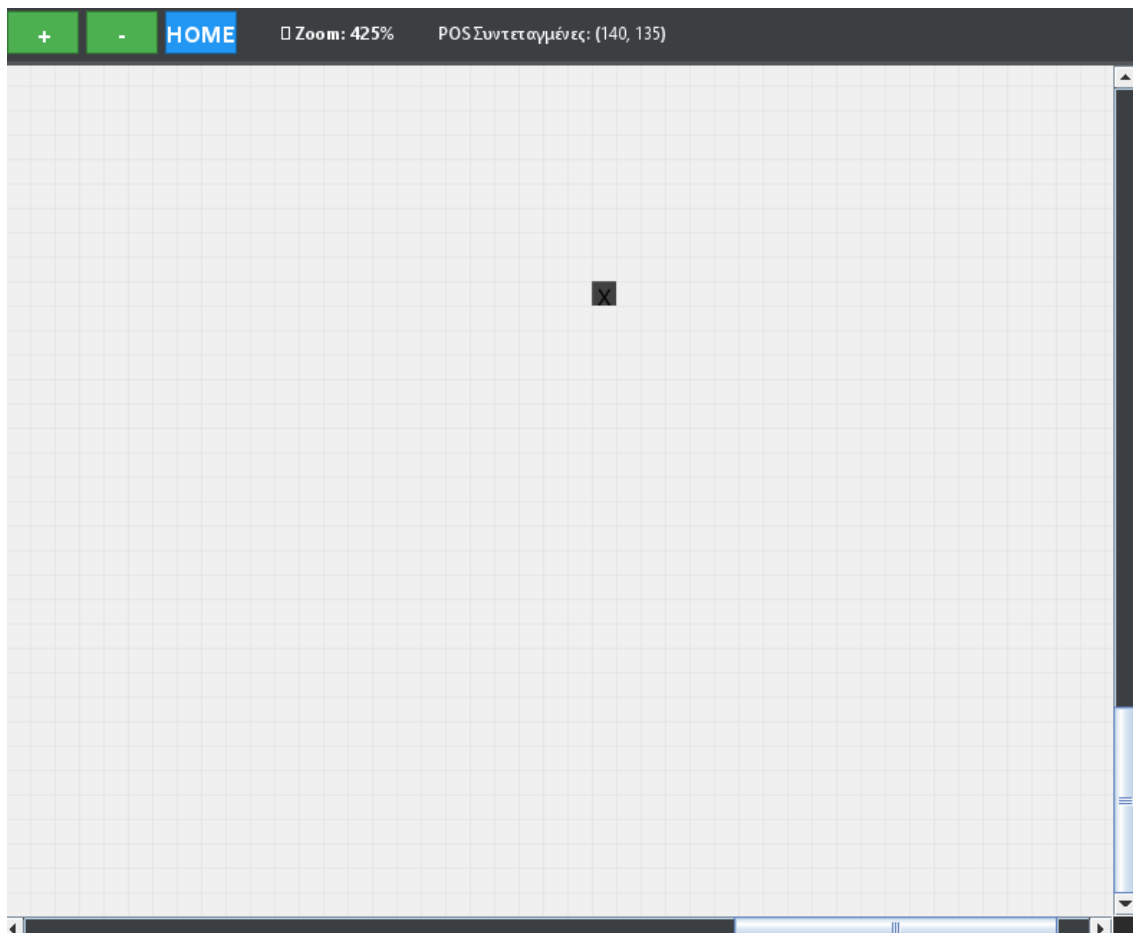
5 Παρουσίαση Εφαρμογής και Οδηγός Χρήσης

5.1 Γενική παρουσίαση του συστήματος

Η ανάπτυξη του συστήματος διαχείρισης δασικών πυρκαγιών με πολυπρακτορική αρχιτεκτονική κατέληξε σε μια πλήρως λειτουργική εφαρμογή που προσομοιώνει ρεαλιστικά σενάρια εξάπλωσης πυρκαγιών και συντονισμένης αντίδρασης πυροσβεστικών δυνάμεων. Το σύστημα παρέχει διαδραστική οπτικοποίηση, πραγματικού χρόνου παρακολούθηση και αναλυτική καταγραφή όλων των γεγονότων για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς.

5.1.1 Κύρια Χαρακτηριστικά Εφαρμογής

Διαδραστική Οπτικοποίηση: Το σύστημα παρέχει γραφική αναπαράσταση ενός δάσους 150x150 κελιών με real-time ενημερώσεις της κατάστασης κάθε περιοχής, χρησιμοποιώντας διαφορετικά χρώματα και εικονίδια για την αναπαράσταση υγιούς βλάστησης, ενεργής φωτιάς, πυροσβεστικών μέσων και κατασβεσμένων περιοχών.



Εικόνα 9: Το δάσος σε μορφή 150x150 κελιών

Πολυεπίπεδος Συντονισμός: Η εφαρμογή υλοποιεί σύνθετους αλγόριθμους συντονισμού που επιτρέπουν την αυτόματη ανάθεση καθηκόντων, τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών τύπων πυροσβεστικών μέσων και την προσαρμοστικότητα σε μεταβαλλόμενες συνθήκες [2][3].

Ρεαλιστική Προσομοίωση: Το σύστημα ενσωματώνει περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως καιρικές συνθήκες, δυναμική εξάπλωσης φωτιάς και διαφοροποιημένες ικανότητες πυροσβεστικών μέσων για την παραγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

5.2 Κύριο Περιβάλλον Χρήστη

5.2.1 Αρχική Οθόνη εφαρμογής

5.2.1 Αρχική Οθόνη Εφαρμογής

Κατά την εκκίνηση της εφαρμογής, ο χρήστης αντιμετωπίζει το κύριο περιβάλλον που αποτελείται από τρεις βασικές περιοχές: το grid προσομοίωσης, το panel ελέγχου και την περιοχή πληροφοριών.

Το grid προσομοίωσης καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα της οθόνης και αποτελείται από 22500 κελιά (150x150) που αντιπροσωπεύουν τμήματα του δάσους. Κάθε κελί έχει διαστάσεις 80x80 pixels και είναι διαδραστικό, επιτρέποντας μελλοντικές επεκτάσεις για χειροκίνητη τοποθέτηση γεγονότων.

Το panel ελέγχου τοποθετείται στο κάτω μέρος της οθόνης και περιλαμβάνει δύο κύρια κουμπιά:

- Κουμπί "  Φωτιά": Ενεργοποιεί την προσομοίωση μιας νέας πυρκαγιάς σε τυχαία θέση
- Κουμπί "  Έκτακτη": Ενεργοποιεί πρωτόκολλο έκτακτης ανάγκης με πολλαπλές εστίες φωτιάς

5.2.2 Περιοχή Πληροφοριών και Στατιστικών

Στο κάτω τμήμα της εφαρμογής υπάρχει η περιοχή καταγραφής γεγονότων που εμφανίζει σε πραγματικό χρόνο όλες τις σημαντικές ενέργειες του συστήματος. Κάθε καταχώρηση περιλαμβάνει χρονοσφραγίδα και περιγραφική αναφορά του γεγονότος.

Δεξιά από το 125x125 βρίσκεται η στήλη στατιστικών που εμφανίζει τη διαθεσιμότητα πόρων:

- Πυροσβεστικά οχήματα (Fire Trucks): 3 μονάδες
- Πυροσβεστικά αεροσκάφη (Aircraft): 2 μονάδες
- Ελικόπτερα (Helicopters): 2 μονάδες
- Επίγειες ομάδες (Ground Crews): 3 μονάδες

5.3 Λειτουργικότητα προσομοίωσης

5.3.1 Ενεργοποίηση Πυρκαγιάς

Όταν ο χρήστης πατήσει το κουμπί "  Φωτιά", το σύστημα ενεργοποιεί την ακόλουθη αλληλουχία ενεργειών:

Βήμα 1: Δημιουργία FireAgent

Το σύστημα δημιουργεί έναν νέο FireAgent σε τυχαία θέση του grid. Το αντίστοιχο κελί αλλάζει χρώμα σε κόκκινο και εμφανίζει το εικονίδιο φωτιάς ().

Βήμα 2: Ενεργοποίηση WeatherAgent

Ο WeatherAgent αρχίζει τη γενέρεση καιρικών συνθηκών που επηρεάζουν την εξάπλωση της φωτιάς. Οι παράμετροι περιλαμβάνουν ταχύτητα ανέμου, κατεύθυνση, θερμοκρασία και υγρασία .

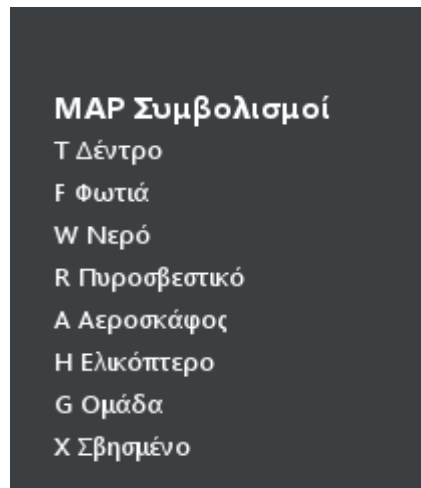
Βήμα 3: Ανίχνευση και Ειδοποίηση

Ο FireControlAgent λαμβάνει ειδοποίηση για τη νέα φωτιά και αρχίζει τη διαδικασία κατανομής πόρων. Στην περιοχή καταγραφής εμφανίζεται μήνυμα όπως:

[14:23:15] 🔥 Φωτιά εντοπίστηκε στη θέση (2,3) με ένταση 70%

[14:23:16] 🚒 FireControlAgent ενεργοποιημένος - Αξιολόγηση κατάστασης

5.3.2 Αυτόματη Αντίδραση Συστήματος



Εικόνα 10: Τα Υπομνήματα

Μετά την ενεργοποίηση της φωτιάς, το σύστημα εκτελεί αυτόματα μια σειρά ενεργειών:

Φάση 1: Ανάλυση Απειλής

Ο FireControlAgent αξιολογεί την ένταση της φωτιάς, τις καιρικές συνθήκες και τη διαθεσιμότητα πόρων για να καθορίσει τη βέλτιστη στρατηγική αντίδρασης .

Φάση 2: Κατανομή Πόρων

Βάσει των αλγόριθμων προτεραιοποίησης, το σύστημα επιλέγει τους κατάλληλους πράκτορες για ανάθεση. Η επιλογή γίνεται με βάση:

- Απόσταση από τόπο συμβάντος
- Διαθεσιμότητα και κατάσταση πράκτορα
- Τύπο και ικανότητες πράκτορα
- Τρέχουσες καιρικές συνθήκες [4]

Φάση 3: Ανάπτυξη Πρακτόρων

Οι επιλεγμένοι πράκτορες μετακινούνται προς τη θέση της φωτιάς.

5.3.3 Διαδικασία Κατάσβεσης

Όταν οι πυροσβεστικοί πράκτορες φτάσουν στη θέση της φωτιάς, αρχίζει η διαδικασία κατάσβεσης:

Εφαρμογή Νερού: Τα κελιά που βρίσκονται υπό κατάσβεση εμφανίζουν προσωρινά μπλε χρώμα και το εικονίδιο νερού (💧), υποδηλώνοντας την ενεργή εφαρμογή πυροσβεστικών μέσων.

Μείωση Έντασης: Η ένταση της φωτιάς μειώνεται σταδιακά βάσει της αποτελεσματικότητας των πυροσβεστικών μέσων και των καιρικών συνθηκών.

Τελική Κατάσβεση: Όταν η ένταση πέσει κάτω από το κρίσιμο όριο, το κελί αλλάζει σε γκρι χρώμα με το εικονίδιο καπνού (☼), υποδηλώνοντας κατασβεσμένη περιοχή.

Η περιοχή καταγραφής γεγονότων τεκμηριώνει όλη τη διαδικασία:

[14:23:17] 🚒 FireTruck-01 αναπτύχθηκε στη θέση (2,3)

[14:23:18] 💧 Έναρξη κατάσβεσης - Εφαρμογή νερού

[14:23:25] ✅ Επιτυχής κατάσβεση στη θέση (2,3) από FireTruck-01

[14:23:26] 🇮🇹 Απόδοση: 95% - Χρόνος αντίδρασης: 8 δευτερόλεπτα

5.4 Σενάριο Έκτακτης Ανάγκης

5.4.1 Ενεργοποίηση Πρωτοκόλλου Έκτακτης Ανάγκης

Το κουμπί "🚒 Έκτακτη" ενεργοποιεί ένα σύνθετο σενάριο με πολλαπλές εστίες φωτιάς που απαιτεί συντονισμένη αντίδραση όλων των διαθέσιμων πόρων.

Χαρακτηριστικά Σεναρίου Έκτακτης Ανάγκης:

Πολλαπλές Εστίες: Δημιουργούνται 3-4 ταυτόχρονες εστίες φωτιάς σε διαφορετικά σημεία του grid, προσομοιώνοντας ακραίες καιρικές συνθήκες ή εσκεμμένο εμπρησμό.

Αυξημένη Ένταση: Οι φωτιές ξεκινούν με υψηλότερη ένταση (80-90%) και εξαπλώνονται ταχύτερα λόγω των δυσμενών συνθηκών.

Συντονισμένη Αντίδραση: Ο FireControlAgent ενεργοποιεί τον EmergencyResponseAgent και εφαρμόζει προηγμένους αλγόριθμους κατανομής πόρων για βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων μέσων.

5.4.2 Στρατηγικές Συντονισμού σε Έκτακτες Καταστάσεις

Προτεραιοποίηση Απειλών: Το σύστημα αξιολογεί όλες τις εστίες και τις ταξινομεί βάσει κινδύνου εξάπλωσης και απειλής σε κρίσιμες περιοχές [4].

Ομαδοποίηση Πόρων: Οι πυροσβεστικοί πράκτορες ομαδοποιούνται στρατηγικά για συλλογική αντιμετώπιση των σοβαρότερων απειλών:

- Εναέρια μέσα (αεροσκάφη, ελικόπτερα) αναλαμβάνουν τις εστίες υψηλής έντασης
- Επίγεια μέσα (πυροσβεστικά οχήματα, ομάδες) εστιάζουν στον περιβαλλοντικό έλεγχο
- Ο EmergencyResponseAgent συντονίζει τη γενική στρατηγική

Δυναμική Αναδιάταξη: Καθώς ορισμένες εστίες κατασβαίνονται, οι πόροι αναδιατάσσονται αυτόματα στις υπόλοιπες απειλές, εξασφαλίζοντας βέλτιστη αξιοποίηση των δυνάμεων.

5.5 Παρακολούθηση και Στατιστικά Απόδοσης

5.5.1 Πίνακας Στατιστικών

Το σύστημα παρέχει αναλυτικά στατιστικά απόδοσης που ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο:

Μετρικές Αποτελεσματικότητας:

- Ποσοστό Επιτυχίας: Αναλογία επιτυχώς κατασβεσμένων φωτιών προς το σύνολο
- Μέσος Χρόνος Αντίδρασης: Χρόνος από την ανίχνευση έως την πρώτη παρέμβαση
- Αξιοποίηση Πόρων: Ποσοστό χρήσης κάθε τύπου πυροσβεστικού μέσου
- Κατασβεσμένες Περιοχές: Συνολικός αριθμός κελιών που διασώθηκαν

Λεπτομερή Δεδομένα Πρακτόρων:

- Κατάσταση διαθεσιμότητας (Διαθέσιμος, Ενεργός, Ανεφοδιασμός)
- Τρέχουσα θέση και καθήκον

- Συνολικός αριθμός επιχειρήσεων
- Ποσοστό επιτυχίας ανά πράκτορα

5.5.2 Ανάλυση Απόδοσης Συστήματος

Το σύστημα καταγράφει και αναλύει βασικούς δείκτες απόδοσης:

Χρόνοι Αντίδρασης: Μέτρηση του χρόνου από την ανίχνευση φωτιάς έως την αποστολή πρώτου πυροσβεστικού μέσου. Τυπικοί χρόνοι κυμαίνονται μεταξύ 5-15 δευτερολέπτων ανάλογα με τη διαθεσιμότητα πόρων.

Αποτελεσματικότητα Κατάσβεσης: Ποσοστό επιτυχούς κατάσβεσης που εξαρτάται από:

- Τύπο πυροσβεστικού μέσου (αεροσκάφη: 80-90%, οχήματα: 60-75%)
- Καιρικές συνθήκες (άνεμος, υγρασία)
- Ένταση φωτιάς κατά την παρέμβαση

Συντονισμός Πρακτόρων: Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών τύπων πρακτόρων σε σύνθετα σενάρια.

5.6 Εκπαιδευτική Αξία και Εφαρμογές

5.6.1 Σενάρια Εκπαίδευσης

Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση στελεχών πυροσβεστικών υπηρεσιών και ερευνητών σε:

Στρατηγικό Σχεδιασμό: Κατανόηση πώς διαφορετικές στρατηγικές κατανομής πόρων επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα κατάσβεσης [5].

Συντονισμό Επιχειρήσεων: Εκμάθηση αρχών συντονισμού πολλαπλών μέσων και τμημάτων σε κρίσιμες καταστάσεις .

Ανάλυση Σεναρίων: Δοκιμή διαφορετικών προσεγγίσεων και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων χωρίς πραγματικό κίνδυνο [6].

5.6.2 Ερευνητικές Εφαρμογές

Αξιολόγηση Αλγόριθμων: Δοκιμή νέων αλγόριθμων κατανομής πόρων και συντονισμού [7][2].

Προσομοίωση Σεναρίων: Μοντελοποίηση διαφορετικών τύπων πυρκαγιών και περιβαλλοντικών συνθηκών [8].

Συγκριτική Ανάλυση: Σύγκριση αποτελεσματικότητας διαφορετικών στρατηγικών και τεχνολογιών [4].

Η εφαρμογή αποδεικνύει την πρακτική εφαρμοσιμότητα των πολυπρακτορικών συστημάτων στη διαχείριση δασικών πυρκαγιών, παρέχοντας ένα ισχυρό εργαλείο για εκπαίδευση, έρευνα και ανάπτυξη καινοτόμων στρατηγικών αντιμετώπισης περιβαλλοντικών κρίσεων.

6 Συμπεράσματα - Μελλοντική Εργασία

6.1 Συμπεράσματα και Κριτική Αξιολόγηση

Η παρούσα πτυχιακή εργασία κατάφερε να αποδείξει τη βιωσιμότητα και αποτελεσματικότητα των πολυπρακτορικών συστημάτων στη διαχείριση δασικών πυρκαγιών μέσω της ανάπτυξης ενός πλήρως λειτουργικού συστήματος προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την υπόθεση εργασίας ότι η αποκεντρωμένη λήψη αποφάσεων σε συνδυασμό με κεντρικό συντονισμό μπορεί να παράγει αποτελεσματικές στρατηγικές αντιμετώπισης κρίσιμων καταστάσεων.

6.1.1 Επιτεύγματα της Εργασίας

Επιτυχής Υλοποίηση Πολυπρακτορικής Αρχιτεκτονικής: Το σύστημα κατάφερε να ενσωματώσει εφτά διαφορετικούς τύπους πρακτόρων με διαφοροποιημένες ικανότητες και συμπεριφορές, αποδεικνύοντας ότι η πολυπλοκότητα του πραγματικού κόσμου μπορεί να μοντελοποιηθεί αποτελεσματικά μέσω αυτόνομων, αλληλεπιδρώντων οντοτήτων.

Ρεαλιστική Προσομοίωση Συντονισμού: Η εφαρμογή των αλγόριθμων Contract Net Protocol και των στρατηγικών προτεραιοποίησης κατέδειξε πώς τα πολυπρακτορικά συστήματα μπορούν να επιτύχουν αποτελεσματικό συντονισμό χωρίς κεντρικό μικροέλεγχο, μιμούμενος τη συμπεριφορά πραγματικών ομάδων διάσωσης.

Διαδραστικό Περιβάλλον Προσομοίωσης: Η ανάπτυξη του γραφικού περιβάλλοντος με real-time visualization επέτρεψε την άμεση παρακολούθηση και αξιολόγηση της

συμπεριφοράς του συστήματος, καθιστώντας το ένα αξιόπιστο εργαλείο εκπαίδευσης και έρευνας.

6.1.2 Περιορισμοί και Προκλήσεις

Περιορισμένη Κλίμακα Προσομοίωσης: Το grid 125x125 επαρκεί για την επίδειξη των αρχών λειτουργίας, αλλά δεν αντιπροσωπεύει τις πραγματικές διαστάσεις μεγάλων δασικών πυρκαγιών. Η επέκταση σε μεγαλύτερες κλίμακες απαιτεί επανεξέταση των αλγόριθμων και βελτιστοποίηση της απόδοσης.

Απλοποιημένη Φυσική Μοντελοποίηση: Η εξάπλωση της φωτιάς βασίζεται σε στοχαστικά μοντέλα και όχι στα σύνθετα φυσικά φαινόμενα που διέπουν την πραγματική συμπεριφορά των πυρκαγιών. Η ενσωμάτωση μοντέλων όπως το Rothermel ή τα CFD-based συστήματα θα αύξανε σημαντικά το ρεαλισμό.

Περιορισμένη Διαχείριση Αβεβαιότητας: Το σύστημα δεν διαθέτει μηχανισμούς αντιμετώπισης αβέβαιων ή ελλιπών πληροφοριών, που αποτελούν καθοριστικό παράγοντα στις πραγματικές επιχειρήσεις κατάσβεσης .

6.2 Μελλοντικές Κατευθύνσεις Έρευνας

6.2.1 Τεχνολογικές Επεκτάσεις

Ενσωμάτωση Μηχανικής Μάθησης: Η προσθήκη αλγόριθμων reinforcement learning θα επέτρεπε στους πράκτορες να βελτιώνουν τις στρατηγικές τους βάσει εμπειρίας, οδηγώντας σε προσαρμοστικότερα και αποτελεσματικότερα συστήματα . Η εφαρμογή deep Q-learning networks (DQN) ή policy gradient methods θα μπορούσε να βελτιστοποιήσει τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο.

Ενσωμάτωση IoT και Δεδομένων Αισθητήρων: Η σύνδεση με πραγματικά δεδομένα από δασικούς αισθητήρες, μετεωρολογικούς σταθμούς και δορυφόρους θα μετέτρεπε το σύστημα από προσομοίωση σε λειτουργικό εργαλείο έγκαιρης προειδοποίησης. Η χρήση MQTT protocols και cloud computing θα διευκόλυνε την ενσωμάτωση τέτοιων δεδομένων.

Κατανεμημένη Αρχιτεκτονική: Η μετάβαση από single-container σε distributed JADE deployment θα επέτρεπε την κλιμάκωση του συστήματος για πραγματικές εφαρμογές που καλύπτουν εκτεταμένες γεωγραφικές περιοχές . Η χρήση microservices architecture με Kubernetes orchestration θα εξασφάλιζε υψηλή διαθεσιμότητα και ανθεκτικότητα

6.2.2 Ερευνητικές Προτεραιότητες

Αλγόριθμοι Συνεργατικής Βελτιστοποίησης: Η ανάπτυξη προηγμένων αλγόριθμων που βασίζονται σε swarm intelligence ή evolutionary computation θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα κατανομής πόρων σε μεγάλης κλίμακας σενάρια . Η εφαρμογή ant colony optimization ή particle swarm optimization algorithms θα επέτρεπε δυναμική βελτιστοποίηση των διαδρομών και των στρατηγικών.

Μοντελοποίηση Ανθρώπινων Παραγόντων: Η ενσωμάτωση cognitive agents που μοντελοποιούν την ανθρώπινη λήψη αποφάσεων θα έκανε το σύστημα περισσότερο ρεαλιστικό . Η χρήση BDI (Belief-Desire-Intention) architectures θα επέτρεπε την προσομοίωση συγκρούσεων στόχων και εμοτικών αντιδράσεων υπό πίεση.

Προσαρμοστικότητα και Ανθεκτικότητα: Η έρευνα σε adaptive multi-agent systems που μπορούν να ανασχηματίζουν τη δομή τους δυναμικά θα βελτίωσε την ανθεκτικότητα σε αποτυχίες πρακτόρων ή επικοινωνιακά προβλήματα . Η εφαρμογή self-healing mechanisms και fault-tolerant protocols θα εξασφάλιζε συνεχή λειτουργία σε κρίσιμες συνθήκες.

6.2.3 Πρακτικές Εφαρμογές

Εκπαίδευση Πυροσβεστικών Υπηρεσιών: Η επέκταση του συστήματος με VR/AR τεχνολογίες θα δημιουργούσε immersive εκπαιδευτικά περιβάλλοντα για πυροσβέστες και διοικητικό προσωπικό . Η προσθήκη haptic feedback θα εμπλούτιζε περαιτέρω την εκπαιδευτική εμπειρία.

Υποστήριξη Λήψης Αποφάσεων: Η ανάπτυξη decision support systems που θα ενσωματώνουν την πολυπρακτορική τεχνολογία με προηγμένα visualization tools θα μπορούσε να βοηθήσει τους διοικητές επιχειρήσεων σε πραγματικό χρόνο . Η χρήση augmented reality dashboards θα επέτρεπε την άμεση οπτικοποίηση της κατάστασης στο πεδίο.

Διεπιστημονική Συνεργασία: Η συνεργασία με δασολόγους, κλιματολόγους και ειδικούς GIS θα έκανε δυνατή την ανάπτυξη περισσότερο ολοκληρωμένων συστημάτων που συνδυάζουν τεχνολογική καινοτομία με εξειδικευμένη γνώση πεδίου .

6.3 Επίλογος

Η πτυχιακή εργασία πέτυχε τους αρχικούς στόχους της, αποδεικνύοντας ότι τα πολυπρακτορικά συστήματα αποτελούν μια υποσχόμενη προσέγγιση για την

αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων διαχείρισης κρίσεων. Παρά τους περιορισμούς και τις απλοποιήσεις, το σύστημα παρέχει μια γερή βάση για μελλοντικές επεκτάσεις και αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για εκπαιδευτικούς και ερευνητικούς σκοπούς.

Η εμπειρία ανάπτυξης κατέδειξε τόσο τις δυνατότητες όσο και τις προκλήσεις των πολυπρακτορικών τεχνολογιών, ενώ παράλληλα άνοιξε νέους δρόμους για τη συνέχιση της έρευνας σε αυτόν τον κρίσιμο τομέα της τεχνολογίας αντιμετώπισης περιβαλλοντικών κρίσεων.

Βιβλιογραφία

- [1].J. Katan and L. Perez, "ABWiSE v1.0: toward an agent-based approach to simulating wildfire spread", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 21, pp. 3141–3160, 2021, doi: 10.5194/nhess-21-3141-2021.
- [2].Verified Market Reports, "Forest Wildfire Detection System Market Size, Consumer Insights & Forecast 2033", Verified Market Reports, February 2025.
- [3].Y. Li, N. Du, and Z. Ouyang, "Agent-based Ecosystem Simulation Research under Forest Fire", *Journal of System Simulation*, vol. 35, no. 6, pp. 1362–1371, 2023, Available: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol35/iss6/19/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [4].M. M. Masinda, L. Sun, G. Wang, and T. Hu, "Moisture content thresholds for ignition and rate of fire spread for various dead fuels in northeast forest ecosystems of China", *Journal of Forestry Research*, vol. 32, pp. 1147–1155, 2021, doi: 10.1007/s11676-020-01162-2.
- [5].Taylor & Francis Online, "Scandinavian Journal of Forest Research", Available: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02827581.2025.2531994> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [6].P. L. Andrews, "The Rothermel surface fire spread model and associated developments: A comprehensive explanation", USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, RMRS-GTR-371, Fort Collins, CO, 121 p., 2018, doi: 10.2737/RMRS-GTR-371.

- [7]. USDA Forest Service Research and Development, "TreeSearch 55928 - The Rothermel surface fire spread model and associated developments", Available: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/55928> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [8]. G. Wells, "The Rothermel Fire-Spread Model: Still Running Like a Champ", Fire Science Digest, Issue 2, U.S. Joint Fire Science Program, March 2008.
- [9]. R. C. Rothermel, "A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels", Research Paper INT-RP-115, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, 1972.
- [10]. J. H. Scott and R. E. Burgan, "Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model", USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, RMRS-GTR-153, Fort Collins, CO, 72 p., 2005.
- [11]. Integrated Fuels Treatment Decision Support System, "About FBFMs", U.S. Forest Service, Available: <https://iftdss.firenet.gov/firenetHelp/help/page-Help/content/00-concepts/fbfm/fbfminfo.htm> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [12]. LANDFIRE, "FBFM40 - Fire Behavior Fuel Model 40", U.S. Department of Agriculture and U.S. Department of the Interior, Available: <https://landfire.gov/fuel/fbfm40> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [13]. Canadian Wildland Fire Information System, "Fire Weather Index System", Natural Resources Canada, Available: <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [14]. Government of British Columbia, "Fire Weather Index System", Available: <https://www2.gov.bc.ca/gov/content/safety/wildfire-status/prepare/weather-fire-danger/fire-weather/fire-weather-index-system> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [15]. Wildfire Management Saskatchewan, "Canadian Forest Fire Weather Index System", Available: https://wfm.gov.sk.ca/static/safety/7-canadian_forest_fire_weather_index_system.pdf [Accessed: Jan 25, 2025].
- [16]. Centre ESCER-UQAM, "Fire Weather Index", Available: <http://feux.escer.uqam.ca/en/fwi.html> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [17]. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, "Preprint nhess-2018-227", Available: <https://nhess.copernicus.org/preprints/nhess-2018-227/nhess-2018-227.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [18]. INPE, "Kara1997 Document", Available: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/cursos/t-society-2013/Kara1997.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].

- [19]. Sepehr, "Article 14008", Available: https://www.sepehr.org/article_14008.html?lang=en [Accessed: Jan 25, 2025].
- [20]. ScienceDirect, "Ecological Modelling Article", Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574954125001591> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [21]. Smythos, "JADE Java Agent Development Framework", Available: <https://smythos.com/developers/agent-development/jade-java-agent-development-framework/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [22]. Smythos, "Multi-Agent Systems in Disaster Management", Available: <https://smythos.com/developers/agent-development/multi-agent-systems-in-disaster-management/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [23]. MARS Group Hamburg, "Agent-based Forest Fire Modeling Poster", Available: https://www.mars-group.org/img/student-work/posters/bardtke_fw2_poster.pdf [Accessed: Jan 25, 2025].
- [24]. J. M. Vidal, "JADE Tutorial and Primer", Available: <https://jmvidal.cse.sc.edu/library/jade.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [25]. JADE - Java Agent DEvelopment Framework, "Official Website", Telecom Italia Lab, Available: <https://jade.tilab.com> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [26]. JADE - Java Agent DEvelopment Framework, "Documentation and Tutorials", Telecom Italia Lab, Available: <https://jade.tilab.com/documentation/tutorials-guides/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [27]. JADE - Java Agent DEvelopment Framework, "API Documentation", Telecom Italia Lab, Available: <https://jade.tilab.com/doc/api/index.html> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [28]. FIPA, "FIPA Agent Communication Language Specifications", FIPA00003A, Available: <http://www.fipa.org/specs/fipa00003/OC00003A.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [29]. Universidad de Salamanca, "IWANN-HAIS Research Paper", GREDOS Repository, Available: https://gredos.usal.es/bitstream/10366/134972/1/iwann-hais_mata_1.pdf [Accessed: Jan 25, 2025].
- [30]. SCITEPRESS, "Conference Paper 133775", 2025, Available: <https://www.scitepress.org/Papers/2025/133775/133775.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].

- [31]. Wikipedia, "Belief–desire–intention software model", Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Belief%E2%80%93desire%E2%80%93intention_software_model [Accessed: Jan 25, 2025].
- [32]. ScienceDirect, "Belief-Desire-Intention Architecture - Computer Science Topics", Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/belief-desire-intention-architecture> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [33]. International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, "Emotional Belief-Desire-Intention Agent Model Previous Work and Proposed Architecture", vol. 2, no. 2, Available: https://thesai.org/Downloads/IJARAI/Volume2No2/Paper_1-Emotional_Belief-Desire-Intention_Agent_Model_Previous_Work_and_Proposed_Architecture.pdf [Accessed: Jan 25, 2025].
- [34]. Journal of Universal Computer Science, "BDI agent architecture", vol. 18, no. 10, pp. 1379–1404, Available: https://www.jucs.org/jucs_18_10/BDI_agent_architecture_for/jucs_18_10_1379_1404_mukun.pdf [Accessed: Jan 25, 2025].
- [35]. Carleton University, "Faculty Research Paper", Available: <http://www.sce.carleton.ca/faculty/wainer/papers/05738359.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [36]. Lund University Publications, "Student Research Paper", Available: <https://lup.lub.lu.se/student-papers/record/8881384/file/8881395.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [37]. USDA Forest Service, "RMRS-GTR-183", Rocky Mountain Research Station, Available: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs/rmrs_gtr183.pdf [Accessed: Jan 25, 2025].
- [38]. Mathematics and Computers in Forestry and Natural Resources Sciences, "Journal Article 6_80", Available: https://www.mcfns.com/index.php/Journal/article/view/6_80 [Accessed: Jan 25, 2025].
- [39]. Rural Fire Research, "Review Fire Growth Models", Report 43510, Available: https://www.ruralfireresearch.co.nz/__data/assets/pdf_file/0003/63966/43510-ReviewFireGrowthModels.pdf [Accessed: Jan 25, 2025].
- [40]. Geoscientific Model Development, "Article 4-591-2011", vol. 4, pp. 591, 2011, Available: <https://gmd.copernicus.org/articles/4/591/2011/gmd-4-591-2011.html> [Accessed: Jan 25, 2025].

- [41]. USDA Forest Service Research and Development, "TreeSearch 41760", Available: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/41760> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [42]. Colorado Department of Public Safety, "Coupled Atmosphere-Wildland Fire Modeling with WRF-Fire", J. Mandel et al., Available: https://cdpsdocs.state.co.us/coe/Website/Data_Repository/Coupled%20Atmosphere-Wildland%20Fire%20Modeling%20with%20WRF-Fire_Mandel,%20et%20al..pdf [Accessed: Jan 25, 2025].
- [43]. USDA Forest Service, "RMRS 2016 Pimont Research", Rocky Mountain Research Station, Available: https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_journals/2016/rmrs_2016_pimont_f001.pdf [Accessed: Jan 25, 2025].
- [44]. University of Coimbra Press, "Chapter 70370", Available: <https://books.uc.pt/chapter?chapter=70370> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [45]. USDA Forest Service Research and Development, "TreeSearch 59686", Available: <https://research.fs.usda.gov/treesearch/59686> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [46]. USDA Forest Service Northern Research Station, "Simulating Spring Hill Fire using QUIC-Fire to Predict Wildfire Size and Spread", Available: <https://research.fs.usda.gov/nrs/articles/simulating-spring-hill-fire-using-quic-fire-predict-wildfire-size-and-spread> [Accessed: Jan 25, 2025]
- [47]. University of Melbourne Pursuit, "The computer program that saved a town", Available: <https://pursuit.unimelb.edu.au/articles/the-computer-program-that-saved-a-town> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [48]. Flare Wildfire, "Phoenix RapidFire Software", Available: <https://www.flarewildfire.com/software/phoenix-rapidfire/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [49]. Frontiers in Forests and Global Change, "Research Article", vol. 4, 2021, Available: <https://www.frontiersin.org/journals/forests-and-global-change/articles/10.3389/ffgc.2021.692706/full> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [50]. SSRN, "Research Paper 5041861", Available: <https://papers.ssrn.com/sol3/Delivery.cfm/71b69f84-fceb-4eaf-8cd3-08df7da7be3e-MECA.pdf?abstractid=5041861&mirid=1> [Accessed: Jan 25, 2025].

- [51]. Tester.co.uk, "FLIR Early Fire Detection Brochure", Available: <https://www.tester.co.uk/files/get/download/id/112402/flir-early-fire-detection-brochure.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [52]. FLIR Systems Asia, "Thermal Imaging Cameras for Warehouse Asset Protection", Available: <https://www.flir.asia/discover/instruments/manufacturing/thermal-imaging-cameras-for-warehouse-asset-protection/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [53]. FLIR Systems, "Fire Prevention Instruments", Available: <https://www.flir.com/instruments/fire-prevention/> [Accessed: Jan 25, 2025]
- [54]. European Space Agency Business Applications, "OroraTech Launches Commercial Wildfire Detection System", Available: <https://business.esa.int/news/ororatech-launches-commercial-wildfire-detection-system> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [55]. OroraTech, "Official Website", Available: <https://ororatech.com> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [56]. Market Research Future, "Forest Wildfire Detection System Market Report 40335", Available: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/forest-wildfire-detection-system-market-40335> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [57]. SunFree Energy, "Global Market Insights: Forest Fire Detection Innovations 2025", Available: <https://www.sunfree-energy.com/blog/global-market-insights-forest-fire-detection-innovations-2025/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [58]. Dryad Networks, "Official Website", Available: <https://www.dryad.net> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [59]. IFAAMAS, "AAMAS 2020 Proceedings p1960", Available: <https://www.ifaamas.org/Proceedings/aamas2020/pdfs/p1960.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [60]. Milvus.io, "How Do Multiagent Systems Improve Disaster Response", Available: <https://milvus.io/ai-quick-reference/how-do-multiagent-systems-improve-disaster-response> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [61]. NASA Earthdata, "FIRMS - Fire Information for Resource Management System", Available: <https://www.earthdata.nasa.gov/data/tools/firms> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [62]. EARSEL, "2004 Symposium Dubrovnik Paper 090", Available: <https://www.earsel.org/symposia/2004-symposium-Dubrovnik/pdf/090.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].

- [63]. The Climate Data Factory, "Wildfire Hazard Methods", Available: <https://docs.theclimatedatafactory.com/methods/hazards/wildfire-hazard/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [64]. Scribd, "Planet Inspired: Simulating Fires to Prevent Them", Document 103493437, Available: <https://fr.scribd.com/document/103493437/Planet-Inspired-Simulating-Fires-to-Prevent-Them> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [65]. Wordvice, "How to Paraphrase in Research", Available: <https://blog.wordvice.com/how-to-paraphrase-in-research/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [66]. arXiv, "Preprint 2507.05178", Available: <https://arxiv.org/html/2507.05178> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [67]. British Council Vietnam, "Top Five Paraphrasing Techniques", Available: <https://www.britishcouncil.vn/en/adults/tips/top-five-paraphrasing-techniques-video-included> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [68]. ScienceDirect, "Procedia Computer Science Article", Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918303569> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [69]. Researcher.Life, "Top 7 Tried and Tested Paraphrasing Techniques", Available: <https://researcher.life/blog/article/top-7-tried-and-tested-paraphrasing-techniques/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [70]. Dev.to, "Building an Intelligent Marketing Research System: Creating a Multi-Agent Collaboration Framework", J. Li, Available: <https://dev.to/jamesli/building-an-intelligent-marketing-research-system-creating-a-multi-agent-collaboration-framework-h66> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [71]. University of Crete Open Courses, "Course Resource 9353", Available: <https://opencourses.uoc.gr/courses/mod/resource/view.php?id=9353> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [72]. ScienceDirect, "Reliability Engineering & System Safety Article", Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832020308401> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [73]. Semantic Scholar, "Research Document", Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/c62c/6c330ed042f6627bb4869c4fd132cfd95c4e.pdf> [Accessed: Jan 25, 2025].

- [74]. University of Queensland, "Academic Writing Skills: Paraphrasing Skills", Available: <https://uq.pressbooks.pub/academicwritingskills/chapter/paraphrasing-skills/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [75]. Newcastle University, "How to Paraphrase", Available: <https://www.ncl.ac.uk/academic-skills-kit/good-academic-practice/plagiarism/how-to-paraphrase/> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [76]. Sheffield Hallam University Library Guides, "Writing Science Tip 5", Available: <https://libguides.shu.ac.uk/writing-science/tip5> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [77]. SUNY Cobleskill Library Guides, "Research Guide", Available: <https://libraryguides.cobleskill.edu/c.php?g=228455&p=1515246> [Accessed: Jan 25, 2025].
- [78]. Perplexity AI, "GPT-4o-generated assistance for wildfire management simulation thesis," 2025.