

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



IONIAN  
UNIVERSITY

-- Πτυχιακή Εργασία --

Ανάπτυξη Στοχαστικών Μοντέλων για τη διάδοση φωτιάς σε  
δάση

Ισαβέλλα Παπαγεωργίου  
Επιβλέπων: – Μάρκος Αυλωνίτης –

October 3, 2023

## Επιβλέπων(ουσα)

**Μάρκος Αυλωνίτης**, Καθηγητής,  
*Ιόνιο Πανεπιστήμιο, τμ. Πληροφορικής*

## Τριμελής Επιτροπή

**Μάρκος Αυλωνίτης**, Καθηγητής,  
*Ιόνιο Πανεπιστήμιο, τμ. Πληροφορικής*  
**Ιωάννης Καρύδης**, Επίκουρος Καθηγητής,  
*Ιόνιο Πανεπιστήμιο, τμ. Πληροφορικής*

**Αλέξανδρος Πανάρετος**, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό,  
*Ιόνιο Πανεπιστήμιο, τμ. Πληροφορικής*

# Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη και μελέτη στοχαστικών μεθόδων για την προσομοίωση διάδοσης δασικών πυρκαγιών. Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μια σημαντική απειλή για το περιβάλλον και την ανθρώπινη ασφάλεια, και η δυνατότητα πρόβλεψης της διάδοσής τους είναι ζωτικής σημασίας. Στο πλαίσιο αυτής της ερευνητικής εργασίας, υλοποιήθηκε το μοντέλο Alexandridis για την προσομοίωση της διάδοσης πυρκαγιών, με αναγκαίες προσαρμογές και βελτιώσεις. Η προσομοίωση αυτή βασίζεται σε στοχαστικές μεθόδους και εκτελέστηκε σε περιβάλλον Python. Η επίδραση των διαφορετικών παραγόντων που επηρεάζουν την διάδοση των πυρκαγιών μελετήθηκε απομονωμένα για κάθε έναν από αυτούς. Τα αποτελέσματα από αυτήν την προσομοίωση αναλύθηκαν με εμπειρικό τρόπο, βάσει των εξαγόμενων εικόνων του μοντέλου. Έτσι καλύφθηκε η έλλειψη πραγματικών δεδομένων από πυρκαγιές για την επαλήθευση της ακρίβειας του μοντέλου. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση πολλαπλών διαφορετικών σεναρίων και τιμών παραμέτρων. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης αποτελούν σημαντικό κομμάτι της έρευνας και αναδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου που αναπτύχθηκε. Συνοψίζοντας, η παρούσα πτυχιακή εργασία προσφέρει μια συνεκτική και ενδελεχή ανάλυση της προσομοίωσης διάδοσης δασικών πυρκαγιών και της αποτελεσματικότητας του μοντέλου Alexandridis. Τα αποτελέσματα και οι γνώσεις που προέκυψαν από αυτήν την έρευνα καταδεικνύουν το ενδεχόμενο ανάπτυξης ενός ακόμα, αποτελεσματικότερου μοντέλου για την αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών και τη βελτίωση των μεθόδων πρόβλεψης και πρόληψης αυτών.

# Πρόλογος και Ευχαριστίες

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε κατά την χειμερινή και θερινή περίοδο του Ακαδημαϊκού Έτους 2022 - 2023, στα πλαίσια του Προγράμματος Προπτυχιακών Σπουδών του Ιονίου Πανεπιστημίου.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε υπό την επίβλεψη του κ. Μάρκου Αυλωνίτη, Καθηγητή του Τμήματος Πληροφορικής του Ιονίου Πανεπιστημίου, με συνεξεταστές τον κ. Ιωάννη Καρύδη, Επίκουρου Καθηγητή του Τμήματος Πληροφορικής και τον κ. Αλέξανδρο Πανάρετο, μέλος ΕΔΙΠ του τμήματος Πληροφορικής του Ιονίου Πανεπιστημίου. Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η μελέτη και ανάπτυξη στοχαστικών μοντέλων για τη διάδοση της φωτιάς σε δασικές πυρκαγιές. Συγκεκριμένα μελετάται εις βάθος το μοντέλο Alexandridis.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Οφείλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες, προς τον επιβλέποντα της εργασίας, Καθηγητή κ. Μάρκο Αυλωνίτη, για την καθοδήγησή του, και την πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε σε κάθε στάδιο εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας. Επίσης, τον κ. Ιωάννη Καρύδη, Επίκουρου Καθηγητή του Ιονίου Πανεπιστημίου, για την καθοδήγηση του, ιδιαίτερα στο τεχνικό μέρος της εργασίας. Χωρίς τη συμπαράσταση και συνεχή βοήθειά τους, η ολοκλήρωση αυτής της εργασίας δεν θα ήταν δυνατή. Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια και τους φίλους μου, για την κατανόηση και συμπαράσταση που έδειξαν ολόκληρη την περίοδο εκπόνησης της εργασίας αυτής.

# Περιεχόμενα

|       |                                                                                   |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| A     | Εισαγωγή                                                                          | 1  |
| A.1   | ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΔΙΑΔΟΣΗ ΤΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ . . . .                       | 1  |
| A.2   | ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ<br>ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ . . . . . | 3  |
| B     | Ανάπτυξη στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης για τη διάδοση<br>της φωτιάς           | 10 |
| B.1   | Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΤΗΣ ΧΛΩΡΙΔΑΣ . . . .                      | 13 |
| B.2   | Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ . .                       | 13 |
| B.3   | Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΨΟΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ . . . . .                                    | 15 |
| C     | Υλοποίηση του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης                                   | 16 |
| C.1   | ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ . . . . .                                                 | 16 |
| C.2   | ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΚΕΛΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ. . . . .                          | 23 |
| C.3   | ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΥΣΗ ΕΝΟΣ ΚΕΛΙΟΥ. . . . .                       | 28 |
| C.3.1 | Υπολογισμός της πιθανότητας $P_s$ . Η τοπογραφική επιρροή. . . . .                | 29 |
| C.3.2 | Υπολογισμός της πιθανότητας $P_w$ . Η επιρροή του αέρα. . . . .                   | 36 |
| D     | Αποτελέσματα                                                                      | 41 |
| E     | Συμπεράσματα                                                                      | 58 |
|       | Συντμήσεις                                                                        | 64 |

*Περιεχόμενα*

iv

Γλωσσάρι Ξενικών Όρων

65

# Κατάλογος Σχημάτων

|      |                                                                                                                                                         |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| A.1  | Συνήθεις τύποι γειτονιών για αλγόριθμους CA. . . . .                                                                                                    | 6  |
| B.2  | Γεωμετρία φλόγας. Η γωνία της φλόγας $\theta_f$ , μετρίεται από την κατεύθυνση κάθετο στην κατεύθυνση της διάδοσης.[21] . . . . .                       | 14 |
| C.3  | Αναπαράσταση μόνο των καταστάσεων της προσομοίωσης, όπου πράσινα είναι τα κελιά με καύσιμο που δεν καίγονται ακόμα (Κατάσταση 2). . . . .               | 22 |
| C.4  | Αναπαράσταση των καταστάσεων της προσομοίωσης και του DEM, όπου τα πράσινα κελιά είναι πλέον διάφανα για να διακρίνεται η αναπαράσταση του DEM. . . . . | 23 |
| C.5  | Σύγκριση αποτελεσμάτων σε επίπεδο έδαφος και λόφο. . . . .                                                                                              | 34 |
| D.6  | Έξοδος του μη τροποποιημένου αλγόριθμου. . . . .                                                                                                        | 43 |
| D.7  | Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για τις ίδιες εισόδους με το σχήμα D.6. . . . .                                                                    | 43 |
| D.8  | Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για $\sigma = 12$ . . . . .                                                                                        | 44 |
| D.9  | Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για $\sigma = 60$ . . . . .                                                                                        | 44 |
| D.10 | Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για $A = 100$ . . . . .                                                                                            | 45 |
| D.11 | Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για $\alpha = 0.1$ . . . . .                                                                                       | 45 |
| D.12 | Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για $\alpha = 0.2$ . . . . .                                                                                       | 46 |
| D.13 | Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για $\alpha = 1$ . . . . .                                                                                         | 46 |
| D.14 | Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για $\alpha = 0.1$ και $l = 100$ . . . . .                                                                         | 47 |
| D.15 | Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για $\sigma = 30$ και σημείο εκκίνησης το (60,60). . . . .                                                         | 48 |
| D.16 | Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 15(m/s) και κατεύθυνση Νότια. . . . .                                                          | 49 |

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| D.17 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 15(m/s) και κατεύθυνση Βόρεια. . . . .                                                                      | 49 |
| D.18 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 15(m/s) και κατεύθυνση Ανατολικά. . . . .                                                                   | 50 |
| D.19 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 15(m/s) και κατεύθυνση Δυτικά. . . . .                                                                      | 50 |
| D.20 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 30(m/s) και κατεύθυνση Νότια. . . . .                                                                       | 51 |
| D.21 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 10(m/s) και κατεύθυνση Νότιο-ανατολικά. . . . .                                                             | 51 |
| D.22 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 15(m/s) και κατεύθυνση Βόρειο-δυτικά. . . . .                                                               | 52 |
| D.23 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για αλλαγή ταχύτητας ανέμου από 10(m/s) σε 5(m/s). . . . .                                                                      | 53 |
| D.24 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου από Νότια σε Ανατολικά. . . . .                                                                   | 54 |
| D.25 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου από Νότια σε Ανατολικά με ταχύτητα 20 (m/s). . . . .                                              | 55 |
| D.26 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου από Νότια σε Βόρεια. . . . .                                                                      | 56 |
| D.27 Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου από Νότιο-ανατολικά σε Βόρειο-δυτικά και αλλαγή ταχύτητας ανέμου από 3 (m/s) σε 15 (m/s). . . . . | 57 |

## Κατάλογος Πινάκων

|            |                                                                                                            |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>B.1</i> | <i>Σύνολο καταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρίσκεται ένα κύτταρο στο μοντέλο CA Alexandridis. . . . .</i> | 11 |
| <i>B.2</i> | <i>Κανόνες στο μοντέλο CA Alexandridis. . . . .</i>                                                        | 12 |
| <i>D.1</i> | <i>Δεδομένα εισόδου-εξόδου μοντέλου τοπογραφικής επιρροής. . . . .</i>                                     | 42 |
| <i>D.2</i> | <i>Δεδομένα εισόδου-εξόδου μοντέλου επίδρασης του αέρα. . . . .</i>                                        | 48 |
| <i>D.3</i> | <i>Δεδομένα εισόδου-εξόδου μοντέλου επίδρασης του αέρα με αλλαγές στο βήμα 26. . . . .</i>                 | 52 |

## Κεφάλαιο Α

### Εισαγωγή

Στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας, εξετάζεται η απαιτητική πρόκληση της μοντελοποίησης των πυρκαγιών, εστιάζοντας στην ανάπτυξη επιστημονικών μεθόδων που προσεγγίζουν την σύνθεση, την εξάπλωση και την επίδραση των πυρκαγιών, προσφέροντας πολύτιμες προοπτικές για την κατανόηση και αντιμετώπιση αυτών των φυσικών καταστροφών.

Παρά τον όρο **φυσικές** καταστροφές, όπως οι πυρκαγιές έχουν οριστεί από τον Οργανισμό Προστασίας Περιβάλλοντος των Η.Π.Α, μόνο 10-15% των πυρκαγιών παγκοσμίως, προκύπτουν από φυσικά αίτια[23]. Φαίνεται έτσι πως συντριπτική πλειοψηφία προκαλείται από τον άνθρωπο, επιτηδευμένα ή λόγω ατυχήματος. Τα τελευταία χρόνια, η συχνότητα και η ένταση των δασικών πυρκαγιών έχει αυξηθεί ως αποτέλεσμα ενός συνδυασμού παραγόντων, όπως η κλιματική αλλαγή, οι πρακτικές εκμετάλλευσης της γης και η αύξηση του πληθυσμού. Για αυτό τον λόγο, υπάρχει ανάγκη για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση των πυρκαγιών και κατά συνέπεια την ανάπτυξη σύγχρονων μεθόδων προσομοίωσης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών. Τα μοντέλα αυτά θα πρέπει να δίνουν έγκυρες προβλέψεις, καθώς και να βοηθούν στον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών μετριασμού.

#### A.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την διάδοση των πυρκαγιών

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την διάδοση των δασικών πυρκαγιών είναι κυρίως η τοπογραφία, οι καιρικές συνθήκες, η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η βλάστηση της περιοχής,

καθώς και η υγρασία, τόσο του εδάφους όσο και του αέρα[7].

Είναι αποδεδειγμένο πως η διάδοση της φωτιάς επηρεάζεται από την τοπογραφία, ανεξάρτητα από το είδος της καύσιμης ύλης[11]. Οι πυρκαγιές διαδίδονται ταχύτερα σε ανηφορική κλίση επειδή λόγω της βαρύτητας, η απόσταση μεταξύ της καύσιμης ύλης μειώνεται[4]. Επιπλέον, οι απόκρημνες περιοχές ενισχύουν την φυσική κίνηση του ζεστού αέρα προς τα πάνω, με αποτέλεσμα να ενισχύεται ο ρυθμός κατανάλωσης του καυσίμου και κατά συνέπεια να επιταχύνεται η εξάπλωση του πεδίου της φωτιάς. Η τοπογραφική παράγοντες φυσικά δεν αφορούν μόνο την κλίση του εδάφους, αλλά και τον προσανατολισμό του. Καθώς οι διαφορετικοί προσανατολισμοί λαμβάνουν διαφορετικά επίπεδα ηλιακού φωτός και έκθεσης στους ανέμους, η υγρασία του εδάφους, και του καυσίμου που βρίσκεται πάνω σε αυτό, κυμαίνεται[10]. Για παράδειγμα, οι πλαγιές με νότιο προσανατολισμό τείνουν να είναι πιο ξηρές, με αποτέλεσμα την ταχύτερη διάδοση της φωτιάς εξ αιτίας της αυξημένης ηλιακής ακτινοβολίας και μειωμένης υγρασίας του καυσίμου. Σε συνδυασμό με αυτούς τους βασικούς παράγοντες, υπάρχει και το φαινόμενο κατά το οποίο η γενική μορφολογία του εδάφους, οι γκρεμοί, οι πεδιάδες, ακόμα και στενά φαράγγια που μπορούν να δημιουργήσουν το "φαινόμενο της καμινάδας", μπορούν να σταματήσουν, ή να διευκολύνουν την εξέλιξη της φωτιάς[3].

Φυσικά, εκτός από την τοπογραφία, ένας κύριος παράγοντας στην διάδοση των πυρκαγιών, είναι οι καιρικές συνθήκες, με έμφαση στην ταχύτητα και την κατεύθυνση του αέρα. Ο αέρας μπορεί να μεταφέρει θερμότητα ή ακόμα και σωματίδια που ακόμα φλέγονται, με αποτέλεσμα την ταχύτερη επέκταση του πεδίου της φωτιάς. Οι ισχυροί άνεμοι μπορούν, όχι μόνο να επιταχύνουν την εξέλιξη της φωτιάς, αλλά και να αυξήσουν την έντασή της και να αλλάξουν την κατεύθυνση της διάδοσης. Η μεταφορά μικρότερων σωμάτων όπως κομμάτια από κλαδιά, σάχτες και κουκουνάκια, μπροστά από την κύρια φωτιά δημιουργεί καινούργια σημεία εκκίνησης πυρκαγιών, τα οποία συμβάλουν στην ταχύτερη διάδοση στην ευρύτερη περιοχή. Το φαινόμενο αυτό αποκαλείται "spotting" [12]. Παράλληλα με την ταχύτητα του ανέμου, είναι προφανές από τα παραπάνω, πως μεγάλης σημασίας είναι και ο παράγοντας της κατεύθυνσης του ανέμου. Η κατεύθυνση του ανέμου μάλιστα μπορεί να καθορίσει την πορεία της διάδοσης, ιδιαίτερα όταν συνδυάζεται με τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά που διοχετεύουν ή ανακατευθύνουν τους ανέμους[5]. Σε τέτοιες περιπτώσεις, όπου η φωτιά κατευθύνεται από τον άνεμο, η πρόβλεψη της διάδοσης και ο περιορισμός της αποτελούν ιδιαίτερη πρόκληση. Λιγότερο σημαντικούς, αλλά όχι αμελητέους παράγοντες αποτελούν και οι συνθήκες της

ατμόσφαιρας, σημειωτέον πριν την έναρξη της πυρκαγιάς η οποία θα τους επηρεάσει σημαντικά. Η θερμοκρασία του αέρα επηρεάζει την διάδοση όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, στην περίπτωση των πλαγιών με νότιο προσανατολισμό. Με τον ίδιο τρόπο επιδρά στην εξάπλωση και η σχετική υγρασία της ατμόσφαιρας, εφόσον επηρεάζει με αντίστοιχο τρόπο την υγρασία του καυσίμου[13]. Φαίνεται λοιπόν πως η υγρασία της ατμόσφαιρας, του εδάφους και του καυσίμου είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας για την μοντελοποίηση της πυρκαγιάς, καθώς μπορεί να καθορίσει αν η εξέλιξη της θα ευνοηθεί ή αν θα ανασταλεί. Αξίζει να σημειωθεί πως τα επίπεδα υγρασίας, ιδιαίτερα αυτά του καυσίμου, αλλάζουν λόγω μεταβολών στην θερμοκρασία κατά την διάρκεια της ημέρας. Καθώς περνάει η μέρα ξηραίνονται και γίνονται πιο εύφλεκτα, συμβάλλοντας στην ταχύτερη διάδοση της φωτιάς.

Το καύσιμο έχει καθοριστικό ρόλο στην ταχύτητα και κατεύθυνση της διάδοσης της φωτιάς. Ως καύσιμο στις δασικές πυρκαγιές, συνήθως ορίζεται η χλωρίδα της περιοχής, ωστόσο ο όρος μπορεί να έχει και ευρύτερη έννοια, σε διαφορετικά σενάρια. Είναι σημαντικό να διακρίνεται ο τύπος της χλωρίδας που αποτελεί το καύσιμο της πυρκαγιάς. Για διαφορετικά είδη χλωρίδας κυμαίνονται τα επίπεδα υγρασίας, όπως προαναφέρθηκε, αλλά και η ευφλεκτότητα και δομή τους[16]. Για παράδειγμα, τα λιβάδια και οι θαμνώδεις εκτάσεις τείνουν να αναφλέγονται πιο εύκολα και να καίγονται γρήγορα λόγω των λεπτών καυσίμων τους, ενώ τα δάση με μεγαλύτερα δέντρα μπορούν να υποστούν πιο έντονες πυρκαγιές με μεγαλύτερα μήκη φλόγας. Σημαντικό χαρακτηριστικό αποτελεί επίσης και η πυκνότητα της χλωρίδας, η οποία περιλαμβάνει παράγοντες όπως η διάταξη, η συνέχεια και το φορτίο του καυσίμου[5]. Σε δασικές περιοχές, η παρουσία ενός συνεχούς καλύμματος των κορυφών των δέντρων μπορεί να επιτρέψει στις πυρκαγιές να εξαπλωθούν από τα καύσιμα του εδάφους προς το κορυφαίο στρώμα των δέντρων. Η ύπαρξη βλάστησης σε υψηλότερο επίπεδο αυξάνει την πιθανότητα κατακόρυφης εξάπλωσης της φωτιάς και της δημιουργίας αυτού του φαινομένου που αποκαλείται crown fire[9].

## A.2 Υπολογιστικά και Στοχαστικά Μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης πυρκαγιών

Παρά το γεγονός ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την διάδοση των πυρκαγιών είναι σχετικά απλοί, η ακριβής πρόβλεψη της διάδοσης των δασικών πυρκαγιών, είναι ένα σύνθετο πρόβλημα,

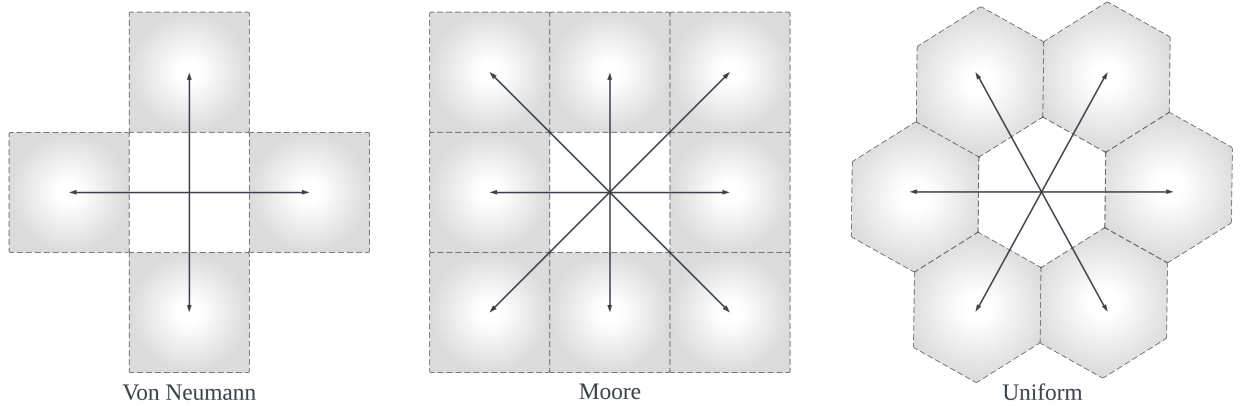
που έχει απασχολήσει, και συνεχίζει να απασχολεί, ένα μεγάλος εύρος επιστημών και επιστημόνων.

Τα στοχαστικά μοντέλα είναι μαθηματικά εργαλεία τα οποία ενσωματώνουν την έννοια της τυχαιότητας και της αβεβαιότητας για την προσομοίωση σύνθετων συστημάτων ή διαδικασιών. Έχουν εύρος εφαρμογών σε διάφορα επιστημονικά πεδία, συμπεριλαμβανομένων των προσομοιώσεων, για την σύλληψη της εγγενούς μεταβλητότητας και τυχαιότητας που υπάρχει σε φαινόμενα του πραγματικού κόσμου, όπως είναι και η συμπεριφορά των πυρκαγιών. Επιτρέπουν την αναπαράσταση τυχαίων παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Εξετάζοντας πολλαπλά πιθανά σενάρια, τα στοχαστικά μοντέλα παρέχουν μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της συμπεριφοράς ενός συστήματος[20]. Μια συνηθισμένη εφαρμογή των στοχαστικών μοντέλων είναι η προσομοίωση Μόντε Κάρλο. Αυτή η μέθοδος παράγει ένα μεγάλο αριθμό τυχαίων δειγμάτων από πιθανοτικές κατανομές για να εκτιμήσει την περιοχή των δυνατών αποτελεσμάτων και τις συναφείς πιθανότητες τους. Για κάθε δείγμα, το σύστημα προσομοιώνεται και παρατηρούνται τα αποτελέσματα. Επαναλαμβάνοντας αυτήν τη διαδικασία για πολλά δείγματα, δημιουργείται μια συλλογή από αποτελέσματα που αντικατοπτρίζουν την ποικιλία των πιθανών εξελίξεων. Αυτό το σύνολο από δείγματα επιτρέπει την εκτίμηση του πιθανού εύρους των διαφορετικών αποτελεσμάτων που μπορεί να προκύψουν και τις συναφείς πιθανότητες τους. Με αυτόν τον τρόπο, η προσομοίωση Μόντε Κάρλο βοηθά την κατανόηση του πιθανού συνόλου αποτελεσμάτων, αντιμετωπίζοντας την αβεβαιότητα και την τυχαιότητα που συναντάται σε πολύπλοκα συστήματα[27]. Στην περίπτωση της πρόβλεψης για την διάδοση πυρκαγιών, τα στοχαστικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση περιβαλλοντικών διεργασιών που επηρεάζονται από την τυχαιότητα, όπως τα κλιματικά μοντέλα και η δυναμική των οικοσυστημάτων, βελτιώνοντας τις προβλέψεις και την κατανόηση της συμπεριφοράς των φυσικών συστημάτων.

Με βάση την ανάλυση στοχαστικών μοντέλων και τις εφαρμογές τους στην προσομοίωση πολύπλοκων συστημάτων, ένας σημαντικός τομέας ενδιαφέροντος είναι η χρήση υπολογιστικών μοντέλων για προσομοιώσεις. Στην σχετική έρευνα, η ανάπτυξη και χρήση υπολογιστικών μοντέλων έχει αποδειχθεί πολύτιμο εργαλείο για την κατανόηση των σύνθετων δυναμικών της συμπεριφοράς και διάδοσης των πυρκαγιών. Υπάρχουν πολλά διαφορετικά μοντέλα που επιχειρούν την πρόβλεψη του σύνθετου αυτού φαινομένου που αποτελεί η διάδοση δασικών πυρκαγιών. Παραδοσιακά, τα μοντέλα αυτά χωρίζονται σε 3 κατηγορίες: τα

θεωρητικά φυσικά μοντέλα, τα εμπειρικά μοντέλα και τα ήμι-εμπειρικά μοντέλα [18]. Τα υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης της διάδοσης των δασικών πυρκαγιών συνδυάζουν τα θεωρητικά φυσικά μοντέλα με έναν κατάλληλο αλγόριθμο, και απεικονίζουν την εμφάνιση και εξέλιξη πραγματικών πυρκαγιών, στην μορφή γραφικών και κινούμενων εικόνων. Συνδυάζοντας τις γνώσεις που αποκτήθηκαν από τα στοχαστικά μοντέλα με το δομημένο πλαίσιο των αλγόριθμων, οι ερευνητές και οι επαγγελματίες μπορούν να εξερευνήσουν πώς οι τοπικές αλληλεπιδράσεις, η τυχαιότητα και η δυναμική του χώρου διαμορφώνουν συλλογικά τη συμπεριφορά πολύπλοκων συστημάτων. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν δεδομένα raster ή διανυσματικής μορφής για την απεικόνιση της διάδοσης. Οι πιο συχνές μέθοδοι περιλαμβάνουν τη διάδοση κυμάτων Huygens, τα Κυτταρικά Αυτόματα (CA), τη θεωρία διεξόδου και τη θεωρία fractal [18]. Από τις μεθόδους αυτές τα κυτταρικά αυτόματα (CA), τα οποία μελετώνται σε αυτή την εργασία, είναι ιδιαίτερα δημοφιλή για την συμβατότητά τους με την οπτικοποίηση της διάδοσης της φωτιάς στον χώρο και στον χρόνο. Τα CA έχουν χρησιμοποιηθεί τόσο σε δισδιάστατες [1], όσο και σε τρισδιάστατες [25] εφαρμογές. Τα CA βασίζονται στην διάταξη πλέγματος που αποδίδουν στον χώρο. Ο χώρος ενδιαφέροντος χωρίζεται από ένα πλέγμα, όπου κάθε διακριτή μονάδα, δηλαδή ένα κελί, έχει μία κατάσταση. Σε αυτό το πλέγμα, η αλληλεπίδραση των κελιών ορίζεται από την επιλογή μίας γειτονιάς γύρω από κάθε κελί. Το είδος της γειτονιάς εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και ορίζει σε μεγάλο βαθμό την λειτουργία του μοντέλου. Για παράδειγμα, η καταλληλότερη αναπαράσταση για CA που επιχειρούν να προσομοιώσουν την συμπεριφορά διάδοσης πυρκαγιών, είναι η χρήση εξάγωνων κελιών με 6 γειτονικά κελιά, το καθένα από τα οποία εφάπτεται σε μία πλευρά του εξάγωνου όπως φαίνεται στο σχήμα Α.1. Αυτή η διάταξη ονομάζεται Uniform, και αναπαριστά πιο ρεαλιστικά τις πραγματικές επιλογές κατευθύνσεως για την διάδοση της φωτιάς. Ωστόσο, λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας αυτής της αναπαράστασης, πιο συχνά συναντάται η χρήση γειτονιάς Moore, όπως φαίνεται στο σχήμα Α.1, με 8 γειτονικά κελιά, όπου το κάθε κελί είναι τετράγωνο. Μία επίσης συνήθης επιλογή σε αναπαραστάσεις με τετράγωνα κελιά, είναι οι γειτονιές Von Neumann, παράδειγμα των οποίων απεικονίζεται επίσης στο σχήμα Α.1.

Ένα ακόμα βασικό χαρακτηριστικό των αλγόριθμων CA, είναι οι διακριτές καταστάσεις στις οποίες μπορούν να βρίσκονται τα κελιά τους. Πρόκειται για ένα σύνολο διακριτών τιμών, η κάθε μία από τις οποίες αναπαριστά μια πραγματική κατάσταση που σχετίζεται με το πρόβλημα που προσομοιώνει ο αλγόριθμος. Στο παράδειγμα των προσομοιώσεων πυρκαγιών, οι καταστάσεις που επιλέγονται συνήθως αφορούν την καύση του περιεχομένου ενός



Σχήμα Α.1: Συνήθεις τύποι γειτονιών για αλγόριθμους CA.

κελίου ή τον τύπο του περιεχομένου του, και ακόμα πιο συχνά έναν συνδυασμό των δύο. Στα περισσότερα CA που αναπαριστούν την συμπεριφορά πυρκαγιών οι καταστάσεις είναι παρόμοιες, ωστόσο υπάρχουν παραλλαγές στον αριθμό των καταστάσεων, δηλαδή στο μέγεθος του συνόλου, ανάλογα με τον σκοπό της προσομοίωσης.

Αφού έχει δημιουργηθεί η αναπαράσταση της διάταξης και της κατάστασης του πεδίου εφαρμογής, το τελικό βήμα για την ολοκλήρωση του αλγόριθμου είναι οι κανόνες που ορίζουν την ενημέρωση των καταστάσεων. Σε κάθε χρονικό βήμα, δηλαδή επανάληψη του αλγόριθμου, τα κελιά εξετάζονται με βάση αυτούς τους κανόνες, για να διαπιστωθεί αν θα ενημερωθεί η κατάστασή τους. Τα Probabilistic Cellular Automata (PCA), ή αλλιώς Stochastic Cellular Automata, είναι ένα είδος κυτταρικών αυτόματων, το οποίο χρησιμοποιεί κανόνες για την αλλαγή καταστάσεων, που βασίζονται στην τυχαιότητα[19]. Αυτό το είδος κυτταρικών αυτόματων είναι το καταλληλότερο για την μελέτη πυρκαγιών, λόγω της πολυπλοκότητας που περιγράφει αυτό το φαινόμενο. Εφόσον η ακριβής πρόβλεψη της συμπεριφοράς των πυρκαγιών δεν είναι δυνατή, η αμέσως καλύτερη λύση είναι η στοχαστική προσέγγιση για την σύλληψη της απρόβλεπτης αυτής συμπεριφοράς.

Ανάμεσα σε αυτά τα μοντέλα, μία από τις σημαντικότερες εργασίες πάνω στον τομέα της μοντελοποίησης των πυρκαγιών, η οποία βρίσκεται στις αναφορές της πλειοψηφίας των σύγχρονων ερευνών πάνω στο θέμα αυτό, είναι αυτή που προτείνεται από τους Alexandridis et al.[1] για την προσομοίωση των πυρκαγιών με την χρήση Κυτταρικών Αυτόματων (CA). Τα δεδομένα εισόδου και η λειτουργία του μοντέλου θα αναλυθεί στο κεφάλαιο Β, καθώς ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, βασίζεται στο μοντέλο Alexandridis. Το

μοντέλο Alexandridis έχει χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση πυρκαγιών και έπειτα την σύγκριση των αποτελεσμάτων με πραγματικά δεδομένα. Ένα παράδειγμα τέτοιας εργασίας είναι η εφαρμογή του μοντέλου για την πρόβλεψη του μετώπου φωτιάς στα Υρκανικά δάση του Ιράν [4]. Το συμπέρασμα αυτής της εφαρμογής ήταν πως το μοντέλο έχει αποδεκτή απόδοση, με την χρήση των εμπειρικών σταθερών από το μοντέλο Alexandridis, χωρίς τροποποιήσεις. Άλλες εργασίες συνδύαζαν το μοντέλο Alexandridis με άλλα παλαιότερα θεωρητικά μοντέλα όπως το μοντέλο time correction Wang Zhengfei, το οποίο είναι ένα από τα δημοφιλέστερα μοντέλα στην Κίνα, με σκοπό να βελτιώσουν την απόδοση του και το εύρος εφαρμογής του [17]. Φαίνεται λοιπόν πως υπάρχει μεγάλη σκοπιμότητα στην αναπαραγωγή μοντέλων CA σε συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης, με ελάχιστες παραλλαγές πάνω στον βασικό αλγόριθμο. Οι τροποποιήσεις αυτές μπορούν να αυξήσουν δραματικά την ακρίβεια του μοντέλου, λόγω των διαφοροποιήσεων των περιοχών που έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά, αλλά και διαφορετικές ανάγκες. Σε ένα ακόμα τέτοιο παράδειγμα, οι Tan και Vicente, χρησιμοποίησαν PCA για την προσομοίωση πυρκαγιών σε αστικές περιοχές στις Φιλιππίνες[19]. Οι τροποποιήσεις που χρειάστηκε να εισαχθούν αφορούσαν τόσο το μέγεθος του κελιού, όσο και την εισαγωγή μεταβλητών που αφορούν τα κτήρια, τα οποία σε δασικές εκτάσεις δεν αποτελούν αξιοσημείωτο παράγοντα, αλλά σε αστικές περιοχές, ο ρόλος τους είναι ζωτικής σημασίας. Τα κτήρια οπτικοποιήθηκαν ως πολύγωνα που εφάπτονται στο αρχικό πλέγμα το οποίο είναι κοινό στα κυτταρικά αυτόματα. Σε αντίθεση με το μοντέλο Alexandridis που έχει 4 πιθανές καταστάσεις για τα κελιά του, το μοντέλο που προτείνεται περιλαμβάνει 5 διαφορετικές καταστάσεις, όπου 2 από αυτές αντιπροσωπεύουν ένα κελί που καίγεται. Η διαφορά βρίσκεται στην δυνατότητα του κελιού, που βρίσκεται σε αυτή την κατάσταση, να διαδώσει την φωτιά στα γειτονικά του κελιά. Στον υπολογισμό της πιθανότητας διάδοσης της φωτιάς για τα κελιά που έχουν αυτή την δυνατότητα, εκτός από τους παράγοντες που αφορούν τη δομή των κτηρίων, την θερμότητα, και τον άνεμο, χρειάστηκαν και εμπειρικές σταθερές, για τον λεπτό συντονισμό των αναμενόμενων αποτελεσμάτων έπειτα από την μοντελοποίηση. Αυτό το φαινόμενο συναντάται συχνά στην σχετική βιβλιογραφία, και θα αναλυθεί περισσότερο στην υλοποίηση του μοντέλου Alexandridis στο κεφάλαιο Β. Παρόμοια εφαρμογή είναι αυτή των Jellouli et al., οι οποίοι προσαρμόσαν το μοντέλο σε μία κοιλάδα μεταξύ ποταμών στο Ουεντ Λάου του Μαρόκου[8].

Μία ακόμη αξιολογή προσέγγιση στην εφαρμογή παραλλαγών σε υπάρχοντα μοντέλα είναι αυτή των Mutthulakshmi et al., οι οποίοι χρησιμοποίησαν το μοντέλο Alexandridis για να προσομοιώσουν τόσο την διάδοση της πυρκαγιάς, όσο και τις πυροσβεστικές προσπάθειες. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να διαπιστώσουν, ποια στρατηγική είναι βέλτιστη για την αντιμετώπιση

της προσομοιωμένης πυρκαγιάς[14]. Αντίστοιχα, σε ένα άρθρο των Freire και DaCamara, με αντικείμενο εφαρμογής μία μεγάλη δασική πυρκαγιά στην περιοχή Algarve της Πορτογαλίας, το μοντέλο Alexandridis τροποποιήθηκε με σκοπό να ταιριάζει περισσότερο σε πυρκαγιές που οδηγούνται κυρίως από τον άνεμο. Με την τροποποίηση των κανόνων ώστε να μπορεί να διαδοθεί η φωτιά σε μη γειτονικά κελιά λόγω του δυνατού αέρα, φάνηκε πως η καταστροφική πυρκαγιά που προσομοιώθηκε, είχε μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι το βασικό μοντέλο πάνω στο οποίο έγινε η βελτίωση[6]. Φαίνεται με αυτό τον τρόπο, πως τα σχετικά απλά στην υλοποίηση μοντέλα Κυτταρικών Αυτόματων, μπορούν εκτός από το να αναπαραχθούν για την διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής τους, μπορούν και να επεκταθούν, ώστε να παρέχουν νέες ή βελτιωμένες προβλέψεις ανεξάρτητα από το περιβάλλον εφαρμογής τους. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ένα άρθρο το οποίο προτείνει μία τροποποίηση η οποία μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί για κάθε εκδοχή μοντέλου διάδοσης με κυτταρικό αυτόματο, καθώς δεν επηρεάζει την συνάρτηση της πιθανότητας, ή το πλήθος και το είδος των καταστάσεων. Στο έργο αυτό προτείνεται η εφαρμογή μίας συνάρτησης, για την μετατροπή του χρονικού βήματος μεταξύ καταστάσεων, από σταθερή σε δυναμική μεταβλητή. Σύμφωνα με τους Liyang Sun et al., η ταχύτητα διάδοσης είναι ένας παράγοντας άμεσα συνδεδεμένος με την συχνότητα στην οποία θα έπρεπε να γίνονται οι προβλέψεις για τα επόμενα στάδια της φωτιάς[18]. Με την ύπαρξη μίας συνάρτησης που λαμβάνει υπόψη την ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς, δίνεται η δυνατότητα αυξομείωσης του χρονικού βήματος σε κάθε επανάληψη του κώδικα. Με την μείωση του χρονικού βήματος, όταν η φωτιά διαδίδεται με μεγαλύτερη ταχύτητα, οι προβλέψεις παρέχονται έγκαιρα για τις απαραίτητες ενέργειες κατάσβεσης. Αντίθετα, με την αύξηση του χρονικού βήματος, όταν η διάδοση της φωτιάς είναι πιο αργή, διασώζονται πολύτιμη υπολογιστικοί πόροι, οι οποίοι θα καταναλώνονταν για επαναλήψεις χωρίς ιδιαίτερη πρόοδο, για παράδειγμα όταν μία φωτιά βρίσκεται στα τελικά στάδια πριν την κατάσβεσή της. Μία άλλη εργασία προτείνει την συνδυαστική χρήση της μηχανικής μάθησης και της ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, για την σύγκριση δύο διαφορετικών εφαρμογών Κυτταρικών Αυτόματων, με σκοπό την βελτιστοποίηση τους [24]. Αναλύοντας τις εικόνες που εξάγουν τα μοντέλα, σύμφωνα με την εργασία αυτή, μπορούν να εντοπιστούν λάθη στην ανάπτυξη του μοντέλου, τα οποία δεν μπορούν να ανιχνευθούν από άλλες τεχνικές όπως η σύγκριση μέσω των αποτελεσμάτων για προσομοιώσεις με κοινές παραμέτρους. Οι μέθοδοι που προτείνονται είναι:

- Χρήση ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, εξάγοντας και συγκρίνοντας σχήματα
- Random forests σε συνδυασμό με την ψηφιακή επεξεργασία εικόνας

- Deep learning

Η χρήση των παραπάνω μεθόδων για την αξιολόγηση και την βελτιστοποίηση του μοντέλου που υλοποιείται στην παρούσα εργασία, μπορεί να επιτρέψει περαιτέρω βελτιώσεις στην ακρίβεια και την αξιοπιστία των προβλέψεων σχετικά με τη διάδοση των πυρκαγιών. Η χρήση ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας, σε συνδυασμό με την ανάλυση των σχημάτων, μπορεί να βοηθήσει στην αναγνώριση των μοτίβων και των ενδείξεων που προηγούνται της φωτιάς, βοηθώντας στην πρόβλεψη της εξάπλωσης της. Οι Random Forest αλγόριθμοι αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση και την πρόβλεψη πολύπλοκων συστημάτων. Σε συνδυασμό με την ψηφιακή επεξεργασία εικόνας, μπορούν να παρέχουν ακριβείς προβλέψεις σχετικά με την εξάπλωση της φωτιάς βασιζόμενοι σε πολλές παραμέτρους και εικόνες που εξάγονται από το μοντέλο. Το Deep Learning, ιδιαίτερα τα νευρωνικά δίκτυα, έχουν τη δυνατότητα να αναγνωρίσουν πολύπλοκα μοτίβα και να πραγματοποιήσουν ακριβείς προβλέψεις βασιζόμενα σε μεγάλα σύνολα δεδομένων. Η χρήση Deep Learning μπορεί να αποτελέσει μια εξαιρετική επιλογή για την πρόβλεψη και την αντιμετώπιση της φωτιάς, καθώς μπορεί να εξάγει σημαντικές συνδέσεις μεταξύ πολλών παραγόντων. Οι πειραματικές δοκιμές και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτής της εργασίας θα βοηθήσουν στην καλύτερη επιλογή της προσέγγισης που ταιριάζει καλύτερα στο πρόβλημά που παρουσιάζεται.

## Κεφάλαιο Β

# Ανάπτυξη στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης για τη διάδοση της φωτιάς

Για την ανάπτυξη του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης εξάπλωσης της φωτιάς, υιοθετείται η μοντελοποίηση σύμφωνα με την εργασία των Alexandridis et al. [1]. Το μοντέλο Alexandridis αντιπροσωπεύει μια κομβική πρόοδο στον τομέα των αλγορίθμων προσομοίωσης και πρόβλεψης πυρκαγιών λόγω της μοναδικής ικανότητάς του να ενσωματώνει διάφορα διεπιστημονικά στοιχεία. Σε αντίθεση με τα συμβατικά μοντέλα που βασίζονται αποκλειστικά σε ιστορικά δεδομένα και απλοποιημένες προσεγγίσεις, το μοντέλο Alexandridis λαμβάνει υπόψη μια ποικιλία παραγόντων, όπως η τοπογραφία, οι καιρικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά βλάστησης, που προαναφέρθηκαν, αλλά και πιο σύνθετους παράγοντες, όπως η διάδοση κλαδιών και κουκουναριών με την βοήθεια του αέρα, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στην ανάφλεξη κυττάρων, με πιο ακανόνιστο σχέδιο από αυτό που προβλέπει ο κυρίως αλγόριθμος. Με τη σύνθεση αυτών των πολύπλευρων στοιχείων, το μοντέλο προσφέρει μια πιο ολοκληρωμένη και ρεαλιστική αναπαράσταση της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών, και έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές έρευνες έπειτα από την έκδοσή του το 2008, με παραλλαγές που το καθιστούν πιο κατάλληλο για συγκεκριμένες περιπτώσεις χρήσης. Η απλότητα και η χαμηλή απαίτηση σε υπολογιστική ισχύ που περιγράφουν το μοντέλο Alexandridis, επιτρέπει την τροποποίηση του μοντέλου σε μελλοντικές εργασίες, με τέτοιο τρόπο ώστε να ταιριάζει σε διαφορετικά σενάρια και ανάγκες.

Το μοντέλο βασίζεται σε έναν βασικό αλγόριθμο CA, όπου κάθε κελί μπορεί να έχει μία κατάσταση από τις 4 διαθέσιμες, και υπάρχουν κανόνες για το πότε και τον τρόπο με τον οποίο η κατάσταση ενός κελιού μπορεί να αλλάξει. Οι καταστάσεις αλλά και οι κανόνες του μοντέλου Alexandridis περιγράφονται στους πίνακες B.1 και B.2. Οι μεγαλύτερες παραδοχές του μοντέλου, που συμβάλλουν στην απλότητα και την χαμηλή υπολογιστική πολυπλοκότητά του, είναι πως, ένα κελί μπορεί να καίγεται μόνο για ένα χρονικό βήμα μέχρι να καεί ολοσχερώς, και πως υπάρχουν κελιά που δεν μπορούν να καούν καθόλου (όπως ασφαλτος, υδάτινη περιοχή κ.α.). Είναι γνωστό πως η ύπαρξη εύφλεκτων υλικών όπως η βενζίνη μπορεί να συμβάλλει στην διάδοση της φωτιάς μέσω υλικών που δεν είναι από τη φύση τους εύφλεκτα, όπως η ασφαλτος, η οποία κατηγοριοποιείται στα κελιά χωρίς δασικό καύσιμο (Κατάσταση 1). Σε αυτές τις ιδιαίτερες περιπτώσεις η πιο απλή λύση είναι, εφόσον έχει γνωστοποιηθεί η περιοχή στην οποία υπάρχουν αυτές οι συνθήκες, να σημειωθούν τα κελιά εκείνης της περιοχής ως κελιά που περιέχουν δασικό καύσιμο (Κατάσταση 2), ώστε να υπάρξει πιο ακριβής εικόνα κατά την προσομοίωση.

Πίνακας B.1: Σύνολο καταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρίσκεται ένα κύτταρο στο μοντέλο CA Alexandridis.

| Κατάσταση (State) | Περιγραφή                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| State = 1         | Το κελί δεν περιέχει δασικό καύσιμο.<br>Αυτή η κατάσταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει κύτταρα που αντιπροσωπεύουν μία αστική περιοχή, ή δρόμους.<br>Υποθέτουμε πως αυτά τα κελιά δεν μπορούν να καούν. |
| State = 2         | Το κελί περιέχει δασικό καύσιμο το οποίο δεν έχει ανάψει.                                                                                                                                                            |
| State = 3         | Το κελί περιέχει δασικό καύσιμο το οποίο καίγεται.                                                                                                                                                                   |
| State = 4         | Το κελί περιείχε δασικό καύσιμο το οποίο έχει καεί ολοσχερώς.                                                                                                                                                        |

Όπως φαίνεται από τους κανόνες, μόνο ένα κελί που καίγεται (Κατάσταση 3) μπορεί να μεταδώσει την φωτιά στα γειτονικά κελιά (Κανόνας 4). Τα 8 γειτονικά κελιά ορίζονται ως τα κελιά που βρίσκονται δίπλα (4) ή διαγώνια(4) στο κεντρικό, δηλαδή πρόκειται για μία γειτονιά Moore[22], η οποία ακολουθεί την εξίσωση 1, όπου  $r = 1$ .

$$N_{x_0, y_0}^M = \{(x, y) : |x - x_0| \leq r, |y - y_0| \leq r\} \quad (1)$$

Πίνακας Β.2: Κανόνες στο μοντέλο CA Alexandridis.

| Νούμερο   | Κανόνας                                                                                            | Περιγραφή                                                                                                                             |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Κανόνας 1 | Αν $state(i, j, t) = 1$ ,<br>τότε $state(i, j, t + 1) = 1$ .                                       | Ένα κελί που βρίσκεται σε κατάσταση 1, δηλαδή χωρίς δασικό καύσιμο, παραμένει στην ίδια κατάσταση και δεν μπορεί να καεί.             |
| Κανόνας 2 | Αν $state(i, j, t) = 3$ ,<br>τότε $state(i, j, t + 1) = 4$ .                                       | Ένα κελί που βρίσκεται σε κατάσταση 3, δηλαδή καίγεται, θα καεί ολοσχερώς στο επόμενο βήμα.                                           |
| Κανόνας 3 | Αν $state(i, j, t) = 4$ ,<br>τότε $state(i, j, t + 1) = 4$ .                                       | Ένα κελί που βρίσκεται σε κατάσταση 4, δηλαδή έχει καεί ολοσχερώς, παραμένει στην ίδια κατάσταση.                                     |
| Κανόνας 4 | Αν $state(i, j, t) = 3$ , τότε<br>$state(i \pm 1, j \pm 1, t + 1) = 3$<br>με πιθανότητα $P_{burn}$ | Όταν ένα κελί που καίγεται (κατάσταση 3), στο τρέχον βήμα, η φωτιά μπορεί να διαδοθεί στα γειτονικά κελιά, με πιθανότητα $P_{burn}$ . |

Αυτή η μεθοδολογία αναπαράστασης του δισδιάστατου πλέγματος, είναι διαφορετική από την πιο συνήθη (και πιο ακριβής) αναπαράσταση, η οποία περιλαμβάνει εξάγωνα κελιά, αντί των τετράγωνων, με 6 γειτονικά κελιά. Ενώ η τελευταία είναι πιο ακριβής αναπαράσταση της πραγματικής συμπεριφοράς της φωτιάς κατά την διάδοσή της στον χώρο, αυξάνει δραματικά την υπολογιστική πολυπλοκότητα του μοντέλου και για αυτό δεν επιλέχθηκε για το μοντέλο Alexandridis.

Σύμφωνα με τον Κανόνα 4, η πιθανότητα, να γίνει διάδοση της φωτιάς από ένα κελί σε ένα άλλο, το οποίο πληροί τις παραπάνω προϋποθέσεις, ορίζεται ως  $P_{burn}$  και δίνεται από την εξίσωση 2.

$$P_{burn} = P_h(1 + P_{veg})(1 + P_{den})P_wP_s \quad (2)$$

Ως  $P_h$  χαρακτηρίζεται η σταθερή πιθανότητα να καεί ένα κελί που βρίσκεται δίπλα σε ένα κελί που καίγεται ενώ περιλαμβάνει συγκεκριμένο τύπο και πυκνότητα χλωρίδας, χωρίς την επίδραση του αέρα και σε επίπεδη επιφάνεια [2]. Αυτή η σταθερή πιθανότητα μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 3.

$$P_h \propto R_0 60t / l_{cell} \quad (3)$$

Οι υπόλοιπες μεταβλητές,  $P_{veg}$ ,  $P_{den}$ ,  $P_w$  και  $P_s$ , αντιπροσωπεύουν τους παράγοντες του περιβάλλοντος που επηρεάζουν την πιθανότητα διάδοσης της φωτιάς, οι οποίοι είναι αντίσ-

τοιχα ο τύπος και η πυκνότητα της χλωρίδας, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου και τέλος, το ανάγλυφο του εδάφους.

## B.1 Η επίδραση του τύπου και της πυκνότητας της χλωρίδας

Η επίδραση του τύπου και της πυκνότητας της χλωρίδας, αντιπροσωπεύονται από τις πιθανότητες  $P_{veg}$  και  $P_{den}$  αντίστοιχα, και έχουν διακριτές τιμές, ανάλογα με την χλωρίδα της περιοχής που μελετάται. Για παράδειγμα, η εργασία στην οποία εισήχθηκε το μοντέλο Alexandridis, που εφαρμόζει την προσομοίωση στην περίπτωση της πυρκαγιάς των Σπετσών, το 1990, χρησιμοποιεί τιμές  $P_{veg}$  τριών κατηγοριών (1-3). Η κατηγορία 1 αντιπροσωπεύει τις καλλιεργημένες εκτάσεις, η κατηγορία 2 τις περιοχές που καταλαμβάνονται από θαμνώδη φυτά και η κατηγορία 3 περιοχές που καλύπτονται από πευκόδεντρα. Οι τιμές αυτές έχουν οριστεί εμπειρικά [1] με βάση την αντίσταση τους στην φωτιά, όπου -0.3 είναι η τιμή για την μεγάλη αντίσταση, 0 για την μέτρια αντίσταση και 0.4 για την ευαισθησία στην φωτιά (π.χ. πευκόδεντρα). Με όμοιο τρόπο ορίζεται και η τιμή της  $P_{den}$ , με την τιμή -0.4 να αντιπροσωπεύει την αραιή βλάστηση, την τιμή 0 να αντιπροσωπεύει την κανονική πυκνότητα βλάστησης και την τιμή 0.3 να αντιπροσωπεύει την πυκνή βλάστηση. Οι ίδιες ακριβώς εμπειρικές τιμές χρησιμοποιούνται και στο μοντέλο Alexandridis που εφαρμόστηκε στην προσομοίωση πυρκαγιών στα Υρκανικά δάση του Ιράν [4]. Οι δύο αυτές μελέτες περίπτωσης αφορούσαν το ίδιο είδος χλωρίδας (κυρίως πευκόδεντρα), με αποτέλεσμα να μην υπάρχει ανάγκη για τροποποίηση των μεταβλητών. Το γεγονός αυτό δεν αποκλείει την προσαρμοστικότητα του μοντέλου για διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης.

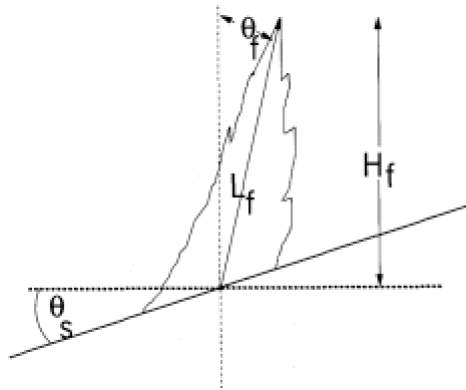
## B.2 Η επίδραση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου

Υπάρχουν πολλά εμπειρικά μοντέλα στην βιβλιογραφία, για την μοντελοποίηση της επίδρασης του ανέμου στην ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς. Η σχέση που χρησιμοποιείται πιο συχνά βρίσκεται στην εξίσωση 4 [26],

$$R_w = R_{0w} e^{\beta \theta_f} \quad (4)$$

όπου  $R_w$  η ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς παρουσία ανέμου,  $R_{0w}$  η ταχύτητα διάδοσης της

φωτιάς όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι ίση με μηδέν,  $\theta_f$  η γωνία της φλόγας, όπως αυτή μετρίεται από την κατεύθυνση κάθετο στην κατεύθυνση της διάδοσης, και  $\beta$  είναι μία σταθερά η οποία συνήθως λαμβάνεται μέσω γραμμικής παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων από πειραματικά δεδομένα. Ο τρόπος υπολογισμού της γωνίας  $\theta_f$ , περιγράφεται και στο σχήμα Β.2. Οι θετικές τιμές υποδεικνύουν ότι η φλόγα κλίνει προς την κατεύθυνση της διάδοσης της πυρκαγιάς, και οι αρνητικές τιμές υποδεικνύουν ότι η φλόγα κλίνει προς την αντίθετη κατεύθυνση.



Σχήμα Β.2: Γεωμετρία φλόγας. Η γωνία της φλόγας  $\theta_f$ , μετρίεται από την κατεύθυνση κάθετο στην κατεύθυνση της διάδοσης.[21]

Όταν η κατεύθυνση της διάδοσης είναι ίδια με αυτή του ανέμου η γωνία της φλόγας ορίζεται ως  $\theta_f$ , ενώ όταν η κατεύθυνση διάδοσης είναι αντίθετη από αυτή του ανέμου ορίζεται ως  $-\theta_f$ . Σε κάθε άλλη περίπτωση η  $\theta_f$  ορίζεται ίση με το μηδέν. Ένας εναλλακτικός τρόπος υπολογισμού της γωνίας  $\theta_f$  φαίνεται στην εξίσωση 5, όπου  $V$  είναι η ταχύτητα του ανέμου.

$$\tan(\theta_f) = 0.4226V \quad (5)$$

Το μοντέλο Alexandridis ωστόσο χρησιμοποιεί μία πιο ευέλικτη εμπειρική σχέση της επίδραση του αέρα, όπου η πιθανότητα που περιέχει την επίδραση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του αέρα υπολογίζεται από τις εξισώσεις 6 και 7, όπου  $c_1, c_2$  σταθερές που πρέπει να καθοριστούν και  $\theta$  η γωνία μεταξύ κατεύθυνσης της διάδοσης και κατεύθυνσης του ανέμου. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως με αυτό τον τρόπο υπολογισμού, η κατεύθυνση του αέρα μπορεί να πάρει συνεχείς τιμές από  $0^\circ$  έως  $360^\circ$ , σε αντίθεση με τις περισσότερες τεχνικές που προαναφέρθηκαν, όπου η κατεύθυνση του ανέμου μπορούσε να πάρει μόνο ορισμένες διακριτές τιμές.

$$P_w = e^{c_1 V} f_t \quad (6)$$

$$f_t = e^{V c_2 (\cos(\theta) - 1)} \quad (7)$$

### B.3 Η επίδραση του υψόμετρου του εδάφους

Η επίδραση του υψόμετρου το εδάφους μοντελοποιείται με την χρήση της εξίσωσης 8 όπως φαίνεται από την βιβλιογραφία [21].

$$R_s = R_{0s} e^{\alpha \theta_s} \quad (8)$$

$R_{0s}$  είναι η ταχύτητα διάδοσης όταν η κλίση του εδάφους είναι μηδενική (επίπεδο έδαφος),  $\theta_s$  είναι η γωνία της κλίσης και  $\alpha$  μία σταθερά η οποία μπορεί να προσαρμοστεί με εμπειρικά δεδομένα. Με βάση την εξίσωση 8, προκύπτει η πιθανότητα που μοντελοποιεί την επίδραση της κλίσης του εδάφους, όπως φαίνεται στην εξίσωση 9.

$$P_s = e^{\alpha \theta_s} \quad (9)$$

Για τον υπολογισμό της γωνίας  $\theta_s$  έχει μεγάλη σημασία η τοποθέτηση των κελιών σε σχέση με το κελί από όπου διαδίδεται η φωτιά. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που τα δύο κελιά έχουν πλευρά η οποία εφάπτεται, δηλαδή το κελί βρίσκεται πάνω, κάτω, δεξιά ή αριστερά από το κεντρικό, η γωνία ορίζεται από την εξίσωση 10, ενώ αν τα κελιά βρίσκονται διαγώνια στο κεντρικό, τότε η γωνία ορίζεται από την εξίσωση 11.

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{E_1 - E_2}{l}\right) \quad (10)$$

$$\theta_s = \tan^{-1}\left(\frac{E_1 - E_2}{l\sqrt{2}}\right) \quad (11)$$

## Κεφάλαιο C

# Υλοποίηση του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης

Το προηγούμενο κεφάλαιο κατέδειξε την θεωρητική βάση των κυτταρικών αυτομάτων και του μοντέλου Alexandridis στην πρόβλεψη της διάδοσης των πυρκαγιών. Έχοντας ορίσει το θεωρητικό πλαίσιο, το τρέχον κεφάλαιο αφιερώνεται στην υλοποίηση του μοντέλου με χρήση Python. Αυτό περιλαμβάνει την κατασκευή του πλέγματος, την επιλογή των γειτονιών για την αλληλεπίδραση των κελιών, την παραμετροποίηση των διάφορων καταστάσεων που μπορεί να πάρουν τα κελιά, και την εφαρμογή των κανόνων που καθοδηγούν την εξέλιξη του συστήματος.

Η ενότητα αυτή αποσκοπεί στην αναλυτική παρουσίαση του κώδικα, επισημαίνοντας τις βασικές συναρτήσεις και δομές δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τις βελτιστοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν για την αύξηση της απόδοσης και της ακρίβειας του μοντέλου.

### C.1 Κατασκευή του πλέγματος

Για την αναπαράσταση του πλέγματος το οποίο θα αποτελέσει την βάση για τον αλγόριθμό PCA, δημιουργήθηκε μία κλάση `Grid`, η οποία έχει παραμέτρους ύψους και πλάτους, οι οποίες καθορίζουν το μέγεθος του πλέγματος. Για τον κώδικα, το πλέγμα αναπαριστάται από έναν πίνακα του επιθυμητού ύψους και πλάτους, όπου αρχικά κάθε κελί έχει την τιμή 0. Η μέθοδος αρχικοποίησης ενός αντικειμένου κλάσης `Grid`, φαίνεται στο παρακάτω απόσπασμα κώδικα C.1

Listing C.1: Κλάση Grid. Μέθοδος-κατασκευαστής

---

```

1  class Grid():
2
3      """ Description
4      Parameters
5      -----
6      self: Grid
7      the Grid to initialise
8
9      height: int
10     the height of the grid in cells
11
12     width: int
13     the width of the grid in cells
14
15     Functionality
16     -----
17     it initialises the grid with given dimensions
18
19     """
20     def __init__(self, height, width):
21         self.height = height
22         self.width = width
23         self.grid = np.zeros((self.height, self.width), dtype=object)

```

---

Η κλάση `Grid` αποτελεί τον πυρήνα για την χωρική αναπαράσταση του προβλήματος. Χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη `NumPy`, η αρχικοποίηση του πλέγματος γίνεται μέσω ενός διδιάστατου πίνακα με διαστάσεις `height` x `width`. Κάθε κελί του πίνακα αρχικοποιείται με την τιμή 0, προσφέροντας ένα ενιαίο σημείο εκκίνησης για την εξέλιξη του μοντέλου.

Είναι επίσης σημαντικό να σημειωθεί ότι το `dtype=object` επιτρέπει την αποθήκευση άλλων αντικειμένων σε κάθε κελί του πίνακα, και στην περίπτωση αυτού του μοντέλου, έχει δημιουργηθεί μία νέα κλάση της οποίας τα αντικείμενα θα αποθηκεύονται στις θέσεις του πίνακα. Η κλάση αυτή είναι η `Cell`, η οποία αντιπροσωπεύει κάθε κελί του πλέγματος και τις ιδιότητες που μπορεί να έχει. Η κυριότερη ιδιότητα, που εφαρμόζεται σε κάθε είδους κυτταρικού αυτόματου, είναι η κατάσταση στην οποία βρίσκεται. Όπως φαίνεται στο δοθέν απόσπασμα κώδικα C.2, η κατάσταση κάθε κελιού αναπαριστάται μέσω μιας κλάσης `Enum` (enumerated type),

ειδικότερα `IntEnum`, που αντιστοιχεί διακριτές ακέραιες τιμές σε κάθε πιθανή κατάσταση. Οι καταστάσεις αντιστοιχούν σε αυτές που περιγράφονται στον πίνακα B.1, και έχουν λάβει συντομευμένες αγγλικές περιγραφές οι οποίες φαίνονται στο απόσπασμα.

Listing C.2: Κλάση `State`. Αντιπροσωπεύει το σύνολο των διακριτών καταστάσεων του μοντέλου Alexandridis

---

```

1 # Discrete states of cells
2 class State(IntEnum):
3     NO_FUEL = 1
4     NOT_BURNING = 2
5     BURNING = 3
6     BURNED = 4

```

---

Χρησιμοποιώντας την κλάση `IntEnum`, το κάθε κελί μπορεί να βρίσκεται σε μία από αυτές τις 4 διακριτές καταστάσεις, κάτι που ενισχύει την αναγνωσιμότητα και την ασφάλεια του κώδικα παρέχοντας σαφείς ετικέτες για διακριτές καταστάσεις και διευκολύνοντας την κατανόηση και τη συντήρηση του προγράμματος.

Εκτός από την κατάσταση του, το κελί πρέπει να έχει και χαρακτηριστικά που περιγράφουν την χλωρίδα που περιέχει. Αυτές οι μεταβλητές αφορούν το  $p_{veg}$  και  $p_{den}$  που μελετήθηκαν στο κεφάλαιο B. Τέλος, το αντικείμενο της κλάσης `Cell` περιλαμβάνει μία ιδιότητα η οποία αποθηκεύει το υψόμετρο του κελιού. Στο απόσπασμα C.3 φαίνεται ο πλήρης κώδικας της κλάσης `Cell`, χωρίς τον ορισμό του υψόμετρου, καθώς υπολογισμός αυτής της μεταβλητής παρατίθεται αναλυτικά παρακάτω.

Listing C.3: Κλάση `Cell`. Μέθοδος-κατασκευαστής και μέθοδοι `get-set`.

---

```

1 class Cell():
2     """Description
3     Parameters
4     -----
5     self: Cell
6     the Cell to initialise
7
8     pveg: float
9     discrete value of the vegetation type
10
11     pden: float

```

```

12     discrete value of the vegetation density
13
14     state: IntEnum
15     the state in which the cell is initialised in
16
17     Functionality
18     -----
19     it initialises the Cell with given FuelAttributes and state
20
21     """
22     def __init__(self, pveg, pden, state):
23         self.pveg = pveg
24         self.pden = pden
25         self.state = state
26
27     def getState(self):
28         return self.state
29
30     def setState(self, state):
31         self.state = state
32
33     def getFuelAttributes(self):
34         return self.pveg, self.pden
35
36     def setFuelAttributes(self, pveg, pden):
37         self.pveg= pveg;
38         self.pden= pden;

```

---

Με τη χρήση των παραπάνω τριών κλάσεων, υπάρχουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία ώστε να συμπληρωθεί το πλέγμα. Για να αποδώσουμε τιμές σε κάθε κελί του πλέγματος χρησιμοποιούμε την μέθοδο `PopulateGrid()` της κλάσης `Grid`. Η μέθοδος `PopulateGrid()` είναι υπεύθυνη για την αρχικοποίηση του πλέγματος, δηλαδή την τοποθέτηση των κελιών σε καταστάσεις που είναι είτε καύσιμες είτε όχι. Η παράμετρος `p_nofuel` ορίζει την πιθανότητα ένα κελί να είναι στην Κατάσταση 1, δηλαδή να μην περιέχει καύσιμη ύλη (`NO_FUEL`). Στην υλοποίηση, το πλέγμα `grid_rep` χρησιμοποιείται για να αποθηκεύσει προσωρινά την κατάσταση του κάθε κελιού. Σε κάθε κελί ανατίθεται μια τιμή βάσει της πιθανότητας `p_nofuel`. Αν το κελί είναι στην Κατάσταση 1 (`NO_FUEL`), τότε οι παράμετροι του κελιού `pveg` και `pden`

τίθενται σε 0, καθώς δεν περιέχει καύσιμο ώστε αυτό να έχει χαρακτηριστικά. Διαφορετικά, αυτές οι παράμετροι αρχικοποιούνται τυχαία με βάση ένα διακριτό σύνολο το οποίο ορίζεται από το μοντέλο Alexandridis ως ακέραιες τιμές από το 1 έως το 3, όπως περιγράφηκε και στην ενότητα B.1. Σε αυτήν την περίπτωση, το κελί τίθεται στην Κατάσταση 2 (NOT\_BURNING), η οποία υποδεικνύει πως το κελί δεν καίγεται αυτή τη χρονική στιγμή, αλλά περιέχει καύσιμο το οποίο μπορεί να καεί, όπως προκύπτει και από τον πίνακα B.1. Αφού οριστούν οι παράμετροι, ανάλογα με το αν ένα κελί θα περιέχει καύσιμο ή όχι, το κελί αρχικοποιείται, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους αυτές. Ο κώδικας που υλοποιεί την μέθοδο `PopulateGrid()` φαίνεται στο απόσπασμα C.4.

Συνοπτικά, αυτή η μέθοδος είναι ο πυρήνας για την αρχική διαμόρφωση του πλέγματος, προσφέροντας τη δυνατότητα μοντελοποίησης διαφόρων συνθηκών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Listing C.4: Κλάση Grid. Μέθοδος `PopulateGrid()`.

---

```

1
2     """ Description
3     Parameters
4     -----
5     self: Grid
6     the Grid to populate
7
8     p_nofuel: float
9     the probability of cells being unable to be burned => class ←
10         NoFuel()
11     In the future this is set by the user based on real-life evidence ←
12         , for now it is random.
13
14     Functionality
15     -----
16     it populates the grid with cells that are either able or unable ←
17         to be burned (class Nofuel() || Fuel() )
18
19     """
20     def PopulateGrid(self, p_nofuel):
21         # probability to have a cell with no fuel
22         self.p_nofuel = p_nofuel
23         grid_rep = np.zeros((self.height, self.width), dtype=int)

```

```

21     for i in range(len(self.grid)):
22         for j in range(len(self.grid[i])):
23             # Change how the grid is populated
24             grid_rep[i][j] = np.random.choice(3,1,p=[0,p_nofuel,1-↵
                p_nofuel])
25
26             if grid_rep[i][j] == 1:
27                 pveg = 0
28                 pden = 0
29                 state = State.NO_FUEL
30
31             else:
32                 pveg = np.random.choice([1,2,3],1)
33                 pden = np.random.choice([1,2,3],1)
34                 state = State.NOT_BURNING
35
36             # initialise Cell
37             self.grid[i][j] = Cell(pveg,pden,state)

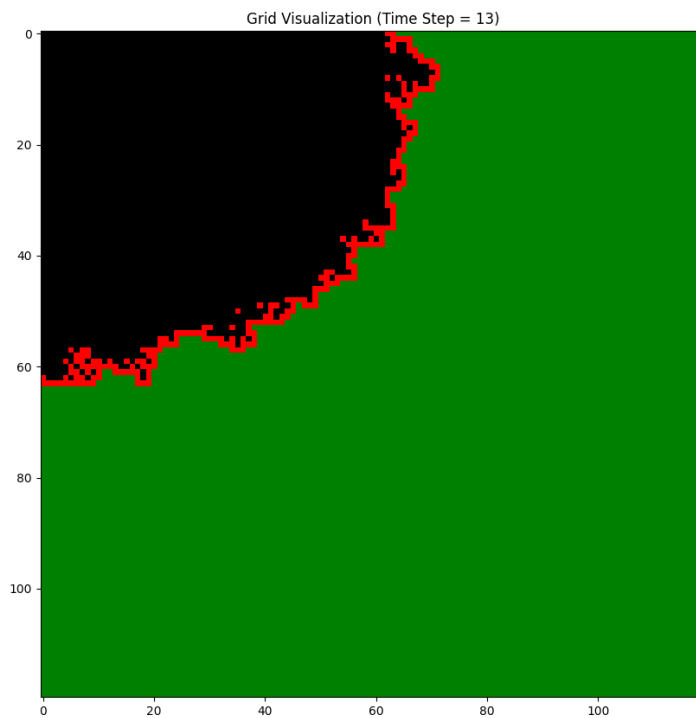
```

Μια σημαντική λειτουργικότητα που είναι προγραμματισμένη για μελλοντική ενσωμάτωση στο μοντέλο είναι η δυνατότητα του χρήστη να ορίζει, είτε χειροκίνητα είτε μέσω εργαλείων αναγνώρισης εικόνας, τα σημεία του πλέγματος που βρίσκονται σε Κατάσταση 1 (NO\_FUEL). Αυτό θα επιτρέπει μια πιο ρεαλιστική και προσαρμοσμένη στις συνθήκες προσομοίωση. Προς το παρόν, το μοντέλο χρησιμοποιεί τυχαία κατανομή για την εκχώρηση της Κατάστασης 1, προσφέροντας έναν απλοποιημένο, αλλά εύχρηστο τρόπο για την αρχική διαμόρφωση του πλέγματος.

Για την αναπαράσταση και την οπτικοποίηση των καταστάσεων των κελιών του πλέγματος χρησιμοποιείται η μέθοδος `ShowGrid()`. Εφόσον το πλέγμα αναπαριστά τον χώρο πάνω στον οποίο διαδίδεται η φωτιά, είναι σημαντικό να γίνει οπτικοποίηση και άλλων χαρακτηριστικών των κελιών που αφορούν το ανάγλυφο του εδάφους, όπως ο τύπος και η πυκνότητα της χλωρίδας και το υψόμετρο των κελιών. Λόγω του εύρους εφαρμογής αυτού του μοντέλου, τα χαρακτηριστικά που αφορούν την χλωρίδα δεν ήταν απαραίτητο να αναπαρασταθούν, καθώς εκλείπουν τα δεδομένα σύγκρισης που είναι απαραίτητα για τον έλεγχο της ακρίβειας του μοντέλου σε προσομοιώσεις που αφορούν τον τύπο και την πυκνότητα της χλωρίδας. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκε η αναπαράσταση του υψόμετρου, για τον έλεγχο της επίδρασης της κλίσης του εδάφους, όπως αυτή μελετήθηκε στην ενότητα B.3. Το Digital Elevation

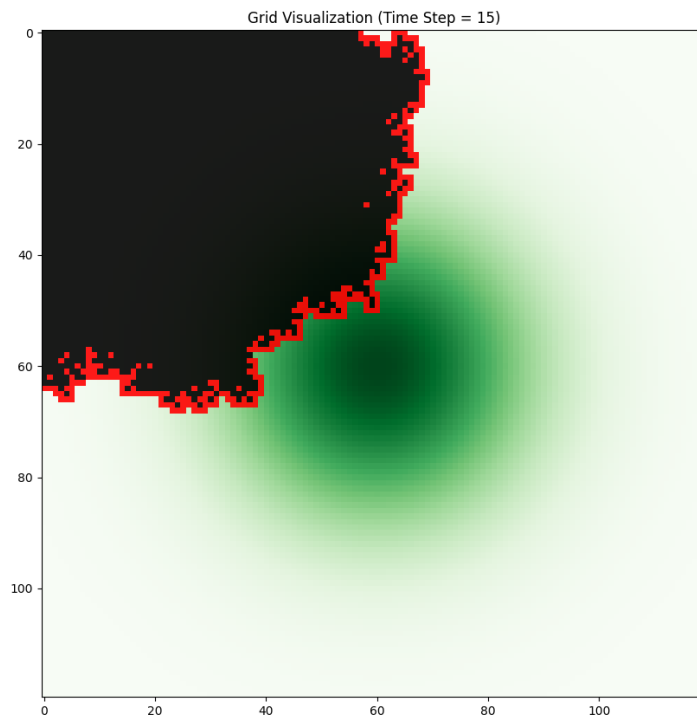
Model (DEM) είναι μια ψηφιακή αναπαράσταση της επιφάνειας ενός τοπίου, που περιλαμβάνει τα υψομετρικά του χαρακτηριστικά. Συνήθως παρουσιάζεται ως ένας δισδιάστατος πίνακας ή ως ένα τρισδιάστατο μοντέλο του εδάφους. Στο πεδίο της πρόβλεψης διάδοσης φωτιάς, το DEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λάβει υπόψη παράγοντες όπως η κλίση του εδάφους, το οποίο επηρεάζει την ταχύτητα και την κατεύθυνση της φωτιάς. Στην περίπτωση αυτής της εργασίας, το DEM αποτελείται από τον δισδιάστατο πίνακα που αποτελεί το πλέγμα, με τα στοιχεία του κάθε κελιού να περιλαμβάνουν το υψόμετρο, ο υπολογισμός του οποίου αναδεικνύεται παρακάτω.

Η μέθοδος `ShowGrid` εκτελεί το overlay δύο διαφορετικών αναπαραστάσεων: των καταστάσεων των κελιών και του υψόμετρου. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά χρωματικά σχήματα, το ένα για τον προσομοιωτή και το άλλο για το DEM.



Σχήμα C.3: Αναπαράσταση μόνο των καταστάσεων της προσομοίωσης, όπου πράσινα είναι τα κελιά με καύσιμο που δεν καίγονται ακόμα (Κατάσταση 2).

Στο σχήμα C.3 φαίνεται η απεικόνιση του προσομοιωτή πριν την προσθήκη του DEM. Έστερα τα πράσινα κελιά, με καύσιμο που δεν καίγονται ακόμα (Κατάσταση 2), μετατράπηκαν σε διαφανή ώστε να διακρίνεται το DEM και να παρατηρείται καλύτερα η συμπεριφορά του μοντέλου στις διαφορετικές περιπτώσεις κλίσης του εδάφους, όπως φαίνεται στην εικόνα C.4.



Σχήμα C.4: Αναπαράσταση των καταστάσεων της προσομοίωσης και του DEM, όπου τα πράσινα κελιά είναι πλέον διάφανα για να διακρίνεται η αναπαράσταση του DEM.

## C.2 Έλεγχος των κελιών για την εξέλιξη της διάδοσης.

Στην παρούσα υποενότητα, κεντρικό θέμα είναι ο μηχανισμός ελέγχου των κελιών του πλέγματος, ο οποίος είναι απαραίτητος για την ακριβή προσομοίωση της διάδοσης της φωτιάς. Είναι φανερό πως υπάρχει ανάγκη για μία μέθοδο η οποία θα ορίζει τα κελιά που θα ελεγχθούν από τον αλγόριθμο σε κάθε επανάληψη. Σκοπός αυτής της μεθόδου είναι όχι μόνο να ορίσει

τα οκτώ γειτονικά κελιά, αλλά και να αποφύγει την εξέταση εκτός των ορίων του πλέγματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τα κελιά που βρίσκονται στα όρια του πλέγματος (σε γωνία ή πλευρά), τα οποία δεν έχουν οκτώ γειτονικά κελιά, όπως ένα κεντρικό κελί. Η μέθοδος `window()` παρέχει ένα δυναμικό πλαίσιο εντός του οποίου λαμβάνονται υπόψη μόνο τα κελιά που είναι εντός των ορίων του πλέγματος. Δημιουργώντας έναν πίνακα 9 κελιών, αντιπροσωπεύει την γειτονιά Moore (συμπεριλαμβανομένου και του κεντρικού κελιού). Αυτός ο πίνακας περιέχει δυαδικές τιμές οι οποίες αντιπροσωπεύουν εάν το αντίστοιχο κελί θα ελεγχθεί από τον αλγόριθμο διάδοσης. Ο κώδικας για την υλοποίηση της μεθόδου `window()`, φαίνεται στο παρακάτω απόσπασμα C.5.

Listing C.5: Κλάση Grid. Μέθοδος για τον ορισμό των έγκυρων γειτονικών κελιών.

```

1
2     """ Description
3     Parameters
4     -----
5     self: Grid
6     the Grid on which to perform the simulation
7
8     center_x: int
9     x coordinate of the center cell
10
11     center_y: int
12     y coordinate of the center cell
13
14     Functionality
15     -----
16     it creates a window based on the location of the cell within the ↔
17         grid
18
19     Returns
20     -----
21     the "window" numpy array with 0s and 1s where 1 indicates a cell ↔
22         to be checked by the ignition algorithm
23
24     """
25     def window(self, center_x, center_y):
26         x = center_x

```

```

25     y = center_y
26     window = np.ones((3, 3), dtype=int)
27     if x == 0:
28         window[0, :] = [0, 0, 0]
29         if y == 0:
30             window[:, 0] = [0, 0, 0]
31         elif y == self.width - 1:
32             window[:, -1] = [0, 0, 0]
33     if x == self.height - 1:
34         window[-1, :] = [0, 0, 0]
35         if y == 0:
36             window[:, 0] = [0, 0, 0]
37         elif y == self.width - 1:
38             window[:, -1] = [0, 0, 0]
39     if y == 0:
40         window[:, 0] = [0, 0, 0]
41     elif y == self.width - 1:
42         window[:, -1] = [0, 0, 0]
43
44     window[1, 1] = 0
45
46     return window

```

---

Όπως φαίνεται στο απόσπασμα C.5, ο πίνακας `window()` με τιμές 1 σε όλες τις θέσεις του, και έπειτα πραγματοποιούνται εκτενής έλεγχοι, για να προσδιοριστεί η θέση του κελιού, και κατά συνέπεια ποια από τα κελιά της γειτονιάς του βρίσκονται εκτός ορίων του πλέγματος. Έπειτα από τον ορισμό των γειτονικών κελιών, γίνεται κατά σειρά ο έλεγχος τους, για να αποφασιστεί αν θα διαδοθεί η φωτιά σε αυτά, στο τρέχον χρονικό βήμα. Για τον σκοπό αυτό, δημιουργήθηκε η μέθοδος `checkNeighbours()`, η οποία χρησιμοποιεί την πληροφορία που εξάγει η μέθοδος `window()`, για να ελέγξει μόνο τα έγκυρα κελιά, αποφεύγοντας έτσι την προσπάθεια πρόσβασης σε κελί εκτός ορίων.

---

Listing C.6: Κλάση Grid. Μέθοδος για τον έλεγχο των γειτονικών κελιών.

---

```

1
2 def checkNeighbours(self, center_x, center_y, time_step):
3     x = center_x
4     y = center_y

```

```

5
6     window = self.window(x,y)
7     for i in range(len(window)):
8         for j in range(len(window[i])):
9             if window[i][j] == 1:
10                if self.grid[x+i-1][y+j-1].state == State.NOT_BURNING:
11                    # decide if to ignite
12                    if condition:
13                        self.ignite(x+i-1,y+j-1)

```

---

Για την απλοποίηση του κώδικα, και για να είναι πιο ευανάγνωστος, γίνεται διάσπαση σε μικρότερες μεθόδους με συγκεκριμένες λειτουργίες. Έτσι, η αλλαγή της κατάστασης ενός κελιού από Κατάσταση 2 (NOT\_BURNING) σε Κατάσταση 3 (BURNING), που μεταφράζεται στην ανάφλεξή του στον φυσικό κόσμο, αποτελεί ξεχωριστή μέθοδο, η οποία ονομάζεται `ignite()`. Ο κώδικας που την υλοποιεί βρίσκεται στο απόσπασμα C.7. Η μέθοδος περιλαμβάνει και τον έλεγχο της κατάστασης του κελιού, για την αποφυγή και ενημέρωση του χρήστη, σε περίπτωση απόπειρας ανάφλεξης ενός κελιού που δεν περιλαμβάνει καύσιμο, δηλαδή είναι στην Κατάσταση 1 (NO\_FUEL).

Listing C.7: Κλάση Grid. Μέθοδος `ignite()`.

```

1
2 def ignite(self, ignition_x, ignition_y):
3     x = ignition_x
4     y = ignition_y
5
6     if self.grid[x][y].state == State.NO_FUEL:
7         sys.exit("You tried to burn a cell with no fuel")
8     else:
9         self.grid[x][y].setState(State.BURNING)

```

---

Στην παρούσα εργασία, η μέθοδος `caSimulation` αντιπροσωπεύει την κεντρική λειτουργικότητα στη διαδικασία του αλγορίθμου για την προσομοίωση της διάδοσης φωτιάς. Η συνάρτηση αυτή υλοποιεί τις βασικές ενέργειες που διέπουν την εξέλιξη της κατάστασης των κελιών του πλέγματος κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου. Η συνάρτηση δέχεται ως είσοδο την παράμετρο `count`, η οποία αντιπροσωπεύει το τρέχον χρονικό βήμα της προσομοίωσης. Αρχικά, δημιουργείται μια λίστα `burning_cells` που θα περιλαμβάνει τα κελιά που βρίσκον-

ται στην Κατάσταση 3 (BURNING). Επιπλέον, υπάρχει μια λίστα `cells_to_check`, η οποία αποσκοπεί στην τυχαία επιλογή των κελιών που θα εξεταστούν. Η τυχαία αναδιάταξη της λίστας `cells\_to\_check` εισάγει μια επιπλέον στοχαστική συνιστώσα στον αλγόριθμο, η οποία είναι σημαντική για την προσομοίωση της πραγματικότητας. Στη φύση, η διάδοση της φωτιάς δεν ακολουθεί κάποια γραμμική ή προκαθορισμένη σειρά. Ειδικά σε μοντέλα CA, όπου τα κελιά ενημερώνονται βάσει των γειτονικών κελιών, η σειρά με την οποία γίνεται η ενημέρωση μπορεί να έχει σημαντικό αντίκτυπο στην εξέλιξη του συστήματος. Έτσι, η τυχαία αναδιάταξη επιτρέπει στον αλγόριθμο να λαμβάνει υπόψη τον μη προβλέψιμο χαρακτήρα και την πολυπλοκότητα της φυσικής διάδοσης της φωτιάς, καθιστώντας την προσομοίωση πιο ρεαλιστική. Η συνάρτηση `caSimulation` ελέγχει κάθε κελί του πλέγματος, και εάν το κελί βρίσκεται σε Κατάσταση 3 (BURNING), καλεί την μέθοδο `checkNeighbours()` που προαναφέρθηκε, για την εξέταση των γειτονικών κελιών. Αυτή η διαδικασία είναι απαραίτητη για την κατανόηση της δυναμικής της φωτιάς, καθώς καθορίζει ποια κελιά είναι υποψήφια για αλλαγή κατάστασης.

Τέλος, η συνάρτηση προβαίνει στην εφαρμογή του Κανόνα 2, όπως αυτός περιγράφεται στον πίνακα B.2, ο οποίος ορίζει ότι Ένα κελί που βρίσκεται σε κατάσταση 3, δηλαδή καίγεται, θα καεί ολοσχερώς στο επόμενο βήμα. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης εμφανίζεται στον χρήστη μέσω της μεθόδου `ShowGrid` που αναλύθηκε παραπάνω, ώστε να υπάρχει απεικόνιση των καταστάσεων των κελιών σε κάθε χρονικό βήμα και κατ' επέκταση απεικόνιση της εξέλιξης.

Σε αυτό το σημείο ολοκληρώνονται οι αλγοριθμικές λειτουργίες και οι κανόνες που καθοδηγούν την προσομοίωση, δίνοντας μας ένα ενοποιημένο και συνεκτικό μοντέλο για την αξιολόγηση της διάδοσης των δασικών πυρκαγιών. Ο κώδικας που υλοποιεί την μέθοδο `caSimulation`, βρίσκεται στο παρακάτω απόσπασμα C.8.

Listing C.8: Μέθοδος `caSimulation()`.

---

```

1
2     """ Description
3     Parameters
4     -----
5     self: Grid
6     the Grid on which to perform the simulation
7
8     count: the step counter of the iteration
9

```

```

10     Functionality
11     -----
12     it changes the cell values of the input Grid (specifically the  $\leftrightarrow$ 
        cell status)
13     based on the Cellular Automata Rules.
14     """
15
16     def caSimulation(self, count):
17         time_step = count
18         burning_cells = []
19         # check neighbours
20         cells_to_check = []
21         for x in range(len(self.grid)):
22             for y in range(len(self.grid[x])):
23                 cells_to_check.append((x, y))
24                 np.random.shuffle(cells_to_check)
25
26         for cell in cells_to_check:
27             x,y = cell
28             if self.grid[x][y].state == State.BURNING:
29                 self.checkNeighbours(x,y,time_step)
30                 burning_cells.append((x,y))
31
32         # enforce rule 2: if a cell is in state 3 – BURN, it will be  $\leftrightarrow$ 
            BURNED down in the next time step
33         for cell in burning_cells:
34             x,y = cell
35             self.grid[x][y].setState(State.BURNED)
36
37         self.ShowGrid('sim',time_step)

```

---

### C.3 Υπολογισμός των συνθηκών για την καύση ενός κελιού.

Για να διαπιστωθεί εάν ένα κελί θα μεταβεί από την Κατάσταση 2 (NOT\_BURNING) σε Κατάσταση 3 (BURNING) στο επόμενο βήμα, χρησιμοποιείται η πιθανότητα ( $P_{burn}$ ), όπως ορίζεται

από τον Κανόνα 4 [B.2] του μοντέλου Alexandridis. Ιδιαίτερα για τα στοχαστικά κυτταρικά αυτόματα, η κατανόηση και η εφαρμογή των πιθανοτήτων που επηρεάζουν την μετάβαση ενός κελιού από μία κατάσταση σε μία άλλη είναι θεμελιώδης.

Ενόψει της απουσίας αληθινών δεδομένων για την διασταύρωση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου, ήταν απαραίτητο να αναπτυχθεί μια μεθοδολογία που απομονώνει και εξετάζει κάθε παράγοντα που συμβάλλει στην πιθανότητα ( $P_{burn}$ ). Αυτό επιτρέπει την εκτίμηση της επιρροής κάθε μεμονωμένης πιθανότητας στη συνολική διαμόρφωση του μοντέλου, και κατ' επέκταση, στην προσομοίωση της φωτιάς. Αφού απομονωθούν οι πιθανότητες, αυτές μελετώνται εξονυχιστικά μέσω εμπειρικών δεδομένων και ερευνητικών δημοσιεύσεων που ασχολούνται με τη συμπεριφορά της φωτιάς. Η στοχαστική φύση του μοντέλου επιτρέπει την αναγνώριση και την κατανόηση των αβεβαιοτήτων και των στατιστικών διακυμάνσεων που είναι χαρακτηριστικές στη φυσική διάδοση της φωτιάς. Μέσω αυτής της διαδικασίας, δίνεται η δυνατότητα να βελτιωθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία της προσομοίωσης, επιτυγχάνοντας ένα πιο ρεαλιστικό και εφαρμόσιμο μοντέλο.

### C.3.1 Υπολογισμός της πιθανότητας $P_s$ . Η τοπογραφική επιρροή.

Ο πρώτος παράγοντας που μελετήθηκε, ήταν αυτός της τοπογραφίας, οποίος συμβολίζεται στο μοντέλο Alexandridis ως  $P_s$ , από το πρώτο γράμμα της λέξης "slope", δηλαδή της κλίσης. Ο υπολογισμός της γωνίας της κλίσης ( $\theta_s$ ) αναλύθηκε στην ενότητα B.3.

Αρχικά, το μοντέλο υπολογισμού της πιθανότητας  $P_s$ , χρησιμοποιήθηκε αυτούσιο, για την προσομοίωση της διάδοσης της φωτιάς. Για την εφαρμογή των εξισώσεων 10 και 11, έπρεπε να εισαχθεί μία νέα παράμετρος `position` η οποία ορίζει εάν τα κελιά βρίσκονται στον ίδιο άξονα, ή είναι διαγώνια. Αυτός ο έλεγχος γίνεται στην συνάρτηση `checkNeighbours()`, όπως φαίνεται παρακάτω στο απόσπασμα C.9, για κάθε γειτονικό κελί, πριν υπολογιστεί η πιθανότητα καύσης ( $P_{burn}$ ) του κελιού.

Listing C.9: Τροποποίηση της μεθόδου ώστε να ελέγχει την θέση του γειτονικού κελιού σε σχέση με το κεντρικό που διαδίδει την φωτιά.

```

1
2 window = self.window(x,y)
3     for i in range(len(window)):
4         for j in range(len(window[i])):
```

```

5         if window[i][j] == 1:
6             if self.grid[x+i-1][y+j-1].state == State.NOT_BURNING:
7                 if x == x+i-1 or y == y+j-1:
8                     position = 0
9                 else:
10                    position = 1

```

---

Για τον υπολογισμό της πιθανότητα καύσης  $P_{burn}$ , δημιουργήθηκε μία ακόμα μέθοδος, η οποία ονομάστηκε `calculatePburn()`. Για τον μεμονωμένο έλεγχο της επίδρασης του εδάφους στην πιθανότητα  $P_{burn}$ , όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες που εμφανίζονται στην εξίσωση 2, έχουν εξαλειφθεί, και παραμένει μόνο η πιθανότητα  $P_s$ . Έτσι για τους σκοπούς αυτής της υλοποίησης, ισχύει ότι  $P_{burn} = P_s$ . Για αυτές τις συνθήκες, η συνάρτηση `calculatePburn`, υλοποιείται όπως φαίνεται στο απόσπασμα C.10. Η τιμή  $\alpha = 0.078$  προέρχεται από το μοντέλο του Eskandari [4], ωστόσο τροποποιείται στην συνέχεια, καθώς αποτελεί τιμή βελτιστοποίησης, με βάση τα διαθέσιμα πραγματικά δεδομένα της επιστημονικής εργασίας.

---

Listing C.10: Αρχική υλοποίηση της μεθόδου `calculatePburn`.

---

```

1
2     def calculatePburn(self, cell_from, cell_to, position):
3
4         a = 0.078
5         # cell altitudes
6         E1 = Cell.getAltitude(cell_from)
7         E2 = Cell.getAltitude(cell_to)
8         height_diff = E2-E1
9         l = 25.0
10        if position == 0:
11            theta_s = atan(height_diff / l)
12        elif position == 1:
13            theta_s = atan(height_diff / (l * sqrt(2)))
14
15        P_s = exp(a*theta_s)
16
17        P_burn = P_s
18
19        return P_burn

```

---

Για τον έλεγχο του παραπάνω μοντέλου υπολογισμού της πιθανότητας  $P_{burn}$ , υπήρξε ανάγκη για την δημιουργία ανάγλυφου στο προσομοιωμένο έδαφος, ώστε να διασταυρωθεί η συμπεριφορά της προσομοίωσης, με την αναμενόμενη φυσική διάδοση σε ανηφορικό ή κατηφορικό έδαφος. Για τον σκοπό αυτό, φυσικά προστίθεται η ιδιότητα που αντιπροσωπεύει το υψόμετρο του κελιού στην κλάση `Cell`. Βλέπουμε πως η συνάρτηση `calculatePburn()` καλεί την συνάρτηση `getAltitude()` της κλάσης `Cell` στο απόσπασμα C.10, ωστόσο ο ορισμός του υψομέτρου αυτού (με την μέθοδο `setAltitude()`, είναι καθαυτό μία πρόκληση. Για τον ορισμό υψομέτρων με φυσική συνέχεια, όπως θα παρατηρούνταν στον πραγματικό κόσμο, επιστρατεύθηκε η συνάρτηση της Gaussian κατανομής (12), η οποία είναι μια κωδωνοειδής καμπύλη, στην διδιάστατη μορφή της (13), για τον σχηματισμό ενός τρισδιάστατου σχήματος στο κέντρο του πλέγματος [15], το οποίο αποτελεί την αναπαράσταση ενός βουνού στον φυσικό κόσμο.

$$g_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (12)$$

$$G_{\sigma}(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (13)$$

Η παράμετρος  $\sigma$  στο μοντέλο της διδιάστατης κατανομής Gauss είναι κρίσιμη για τον καθορισμό της κυρτότητας της Gaussian καμπύλης. Ένα μικρό  $\sigma$  οδηγεί σε μια πιο απότομη καμπύλη, δηλαδή ένα βουνό με στενή κορυφή, ενώ ένα μεγάλο  $\sigma$  παράγει μια πιο επίπεδη και εκτεταμένη κατανομή. Στο παρακάτω απόσπασμα C.11 του κώδικα που υλοποιεί τις `getter` και `setter` μεθόδους για το υψόμετρο ενός κελιού, φαίνεται πως υπολογίστηκαν τα  $x$  και  $y$ , ως απόσταση από το κεντρικό κελί του "λόφου". Παρατηρείται επίσης πως η τυπική απόκλιση  $\sigma$ , υπολογίζεται ξεχωριστά για τον άξονα  $x$  και  $y$ . Για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, οι τιμές παραμένουν πάντα ίσες ώστε να υπάρχει συμμετρία σε κάθε άξονα, ωστόσο μέσω του μοντέλου, υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας ασύμμετρων λόφων, ορίζοντας διαφορετικές τιμές  $\sigma_x$  και  $\sigma_y$ , τέτοιες ώστε  $\sigma_x \neq \sigma_y$ . Γίνεται χρήση μιας επιπλέον παραμέτρου  $A$  η οποία ρυθμίζει το εύρος των τιμών της συνάρτησης, συνεπώς και το υψηλότερο σημείο του "λόφου", στο κέντρο του πλέγματος, που θα έχει ύψος ίσο με  $A$ .

Listing C.11: Getter και setter του υψομέτρου ενός αντικειμένου `Cell`

```

1  def getAltitude(self):
2      return self.altitude
3
4
```

```

5  def setAltitude(self, grid, x, y):
6      mu_x = grid.width / 2
7      mu_y = grid.height / 2
8      sigma_x = grid.width / 6
9      sigma_y = grid.height / 6
10     A=1000
11     altitude = A * exp(-(((x - mu_x) ** 2) / (2 * sigma_x ** 2) + ((y -
        - mu_y) ** 2) / (2 * sigma_y ** 2))))
12     self.altitude = altitude

```

---

Εφόσον έχουν οριστεί, όλες οι απαραίτητες μεταβλητές για τον υπολογισμό της πιθανότητας καύσης  $P_{burn}$  ενός κελιού, η πιθανότητα ενσωματώνεται στην `checkNeighbours()`, όπως φαίνεται στο απόσπασμα C.12, με την βοήθεια της συνάρτησης `np.random.choice()`, της βιβλιοθήκης `numpy`.

Listing C.12: Τροποποίηση της μεθόδου ώστε να λαμβάνει υπόψη την  $P_{burn}$

```

1
2  def checkNeighbours(self, center_x, center_y, time_step):
3      x = center_x
4      y = center_y
5
6      window = self.window(x,y)
7      for i in range(len(window)):
8          for j in range(len(window[i])):
9              if window[i][j] == 1:
10                 if self.grid[x+i-1][y+j-1].state == State.NOT_BURNING:
11                     if x == x+i-1 or y == y+j-1:
12                         position = 0
13                     else:
14                         position = 1
15                 p_burn = Grid.calculatePburn(self, self.grid[x][y], ←
                    self.grid[x+i-1][y+j-1], position)
16                 print("burning cell: {},{} with p_burn = {}".format(x←
                    ,y,p_burn))
17
18                 if np.random.rand() < p_burn:
19                     self.ignite(x+i-1,y+j-1)

```

---

Έτσι, είναι εφικτό να εκτελεσθεί το πρόγραμμα, και να παρατηρηθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Για την εκτέλεση της προσομοίωσης αρχικοποιείται ένα πλέγμα διαστάσεων  $120 * 120$ , με τη πιθανότητα για κελιά που βρίσκονται σε Κατάσταση 1 (NO\_FUEL), να είναι  $p_{nofuel} = 0$ . Ο αλγόριθμος εκτελείται για 60 βήματα, όπως φαίνεται στο απόσπασμα C.13. Η εκτέλεση του αλγόριθμου όπως προτείνεται στην βιβλιογραφία [4], χωρίς αλλαγές, παρέχει αποτελέσματα που δεν συμπίπτουν με τα αναμενόμενα. Από το Σχήμα C.5 φαίνεται πως η διάδοση της φωτιάς ακόμα και μετά το κεντρικό σημείο του πλέγματος, από όπου το έδαφος ξεκινάει να έχει κατηφορική κλίση, δεν διαφέρει από αυτή του επίπεδου εδάφους (C.5a, ενώ αναμένεται να επιβραδύνει στο κέντρο, και να διατηρήσει σταθερό ρυθμό στα άκρα, όπου βρίσκονται οι "πρόποδες" του λόφου που προσομοιώνεται.

Listing C.13: Εκτέλεση αλγορίθμου.

---

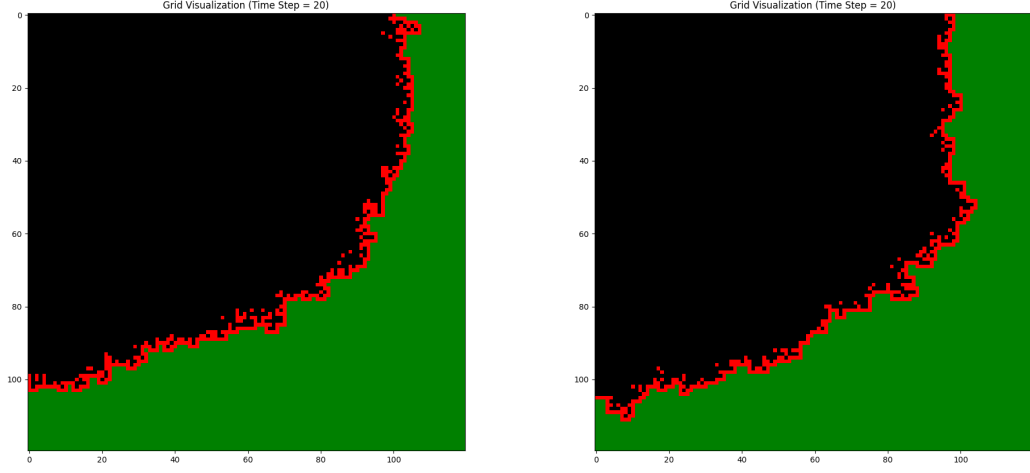
```

1
2     if __name__ == "__main__":
3         height = 120
4         width = 120
5         grid = Grid(height,width)
6         count = 1
7
8         grid.PopulateGrid(0)
9         grid.ignite(1,1)
10        steps = 60
11        for i in range(steps):
12            grid.caSimulation(count)
13            count += 1

```

---

Διαπιστώνεται έτσι πως το μοντέλο για την επίδραση της κλίσης του εδάφους στην διάδοση της φωτιάς B.3, δεν εφαρμόζεται μεμονωμένα, χωρίς να γίνουν κάποιες απαραίτητες τροποποιήσεις. Αρχικά, είναι φανερό πως η εξίσωση για τον υπολογισμό της πιθανότητας  $P_s$ , επιστρέφει τιμές μεγαλύτερες του ενός, οι οποίες δεν είναι αποδεκτές για μια μεταβλητή που αντιπροσωπεύει πιθανότητα, και κατ' επέκταση θα πρέπει να ορίζεται στο διάστημα  $[0, 1]$ . Η συνάρτηση  $\tan^{-1}(x)$ , η οποία χρησιμοποιείται από το μοντέλο Alexandridis για τον υπολογισμό της γωνίας κλίσης  $\theta_s$ , είναι η αντίστροφη της συνάρτησης  $\tan(x)$ , η οποία έχει οριζόντιες ασυμπτώτους για  $y = \pi/2$  και  $y = -\pi/2$ . Αυτό σημαίνει ότι η συνάρτηση δεν παίρνει τιμές σε αυτά τα σημεία.



(a) Βήμα 20 σε επίπεδο έδαφος

(b) Βήμα 20 σε λόφο υψηλής κυρτότητας.

Σχήμα C.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων σε επίπεδο έδαφος και λόφο.

Συνεπώς, η αντίστροφη συνάρτηση  $\tan^{-1}(x)$  έχει εύρος  $(-\pi/2, \pi/2)$ . Γνωρίζοντας τα όρια των τιμών που μπορεί να έχει η γωνία κλίσης  $\theta_s$ , είναι εύκολο να οριστούν τα όρια των τιμών που δίνει η εξίσωση της  $P_s$  (9), και να διαπιστωθεί έτσι, πως για τιμές  $\theta_s \in [0, 90]$ , η  $P_s$  παίρνει τιμές στο διάστημα  $[1, 1118.786618]$ , το οποίο δεν συμπίπτει με το πεδίο τιμών των πιθανοτήτων.

Η διαδικασία για την κανονικοποίηση της πιθανότητας  $P_s$  υπήρξε διαιρετική. Αρχικά, η εξίσωση 9 της διαρέθηκε με το 2. Αυτό επειδή για επίπεδο έδαφος, όπου η γωνία  $\theta_s$  είναι μηδενική, το αποτέλεσμα της συνάρτησης είναι  $e^{\alpha \cdot 0} = 1$ . Για την εναρμόνιση αυτού του αποτελέσματος με την πραγματικότητα — όπου στο επίπεδο έδαφος δεν θα έπρεπε να υπάρχει ούτε θετική ούτε αρνητική επιρροή στην εξάπλωση της φωτιάς — το αρχικό αποτέλεσμα ρυθμίστηκε ώστε να παίρνει την τιμή 0.5. Ακολούθησε σιγμοειδής μετασχηματισμός, με στόχο την κλιμάκωση της πιθανότητας στο επιθυμητό εύρος  $[0, 1]$ , με τρόπο που αντανακλά τις περιβαλλοντικές συνθήκες με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο σιγμοειδής μετασχηματισμός είναι μια μαθηματική συνάρτηση που μετατρέπει οποιοδήποτε εισερχόμενο σήμα σε μια τιμή μεταξύ 0 και 1. Είναι δημοφιλής στην επιστήμη των δεδομένων και τη μηχανική μάθηση για την κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων. Η βασική μορφή της αποτυπώνεται στην εξίσωση 14. Ουσιαστικά, "συμπιέζει" τις τιμές ενός συνεχούς εύρους σε ένα πεπερασμένο εύρος,

καθιστώντας τον ιδανικό μετασχηματισμό για κανονικοποίηση σε προβλήματα πιθανότητας.

$$S(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (14)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι στο μοντέλο Alexandridis δεν καθορίζεται εάν η  $P_s$  υπολογίζεται με τη χρήση μοιρών ή ακτινίων. Επιλέχθηκε να μετατραπούν τα ακτίνια από την έξοδο της  $\tan^{-1}$  σε μοίρες, καθώς η κατεύθυνση του ανέμου υπολογίζεται επίσης σε μοίρες. Αυτή η επιλογή, ωστόσο, δεν βασίζεται σε σαφείς αποδείξεις και δεν υπάρχει τρόπος να διασταυρωθεί η εγκυρότητά της. Οι παραπάνω τροποποιήσεις μπορούν να διακριθούν στο απόσπασμα C.14 του κώδικα. Με πειραματικό τρόπο ορίστηκε και η σταθερά  $\alpha = 0.1$ .

---

Listing C.14: Τροποποιημένος υπολογισμός της πιθανότητας  $P_s$ .

---

```

1
2 def calculatePburn(self, cell_from, cell_to, position):
3
4     a = 0.1
5     # cell altitudes
6     E1 = Cell.getAltitude(cell_from)
7     E2 = Cell.getAltitude(cell_to)
8     height_diff = E2-E1
9     l = 25.0
10    if position == 0:
11        theta_s = atan(height_diff / l)
12    elif position == 1:
13        theta_s = atan(height_diff / (l * sqrt(2)))
14
15    theta_s = theta_s * 180/pi
16
17    P_s = exp(a*theta_s)/2
18
19    # Clip the values to [0, 1]
20    P_s = 1 / (1 + exp(-a * theta_s))
21
22    P_burn = P_s
23
24    return P_burn

```

---

### C.3.2 Υπολογισμός της πιθανότητας $P_w$ . Η επιρροή του αέρα.

Έπειτα από την μελέτη του τοπογραφικού παράγοντα, ακολούθησε η προσομοίωση της διάδοσης, υπό συνθήκες ανέμου, διαφορετικών κατευθύνσεων. Η μελέτη αυτού του παράγοντα επέτρεψε την καλύτερη κατανόηση των συνθηκών υπό τις οποίες μπορεί να εξαπλωθεί ή να περιοριστεί η φωτιά, καθώς και την αποτίμηση της αξιοπιστίας του μοντέλου, όπως θα αναλυθεί στο κεφάλαιο ??, όπου γίνεται η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Η κατεύθυνση του ανέμου αποδείχθηκε κρίσιμη στη διαμόρφωση της πορείας διάδοσης της φωτιάς, επιδεικνύοντας πώς οι παράμετροι που σχετίζονται με τον αέρα μπορούν να έχουν σημαντικές επιπτώσεις στην ακρίβεια των προβλέψεων. Αυτή η προσθήκη, σε συμβολή με την τοπογραφική επιρροή, συμβάλλει στην ολοκλήρωση ενός πιο σφαιρικού και αξιόπιστου μοντέλου διάδοσης φωτιάς. Ωστόσο, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν, οι παράγοντες αρχικά μελετώνται ξεχωριστά.

Για την υλοποίηση του μοντέλου που περιγράφει την επίδραση του αέρα στην διάδοση της φωτιάς, όπως μελετήθηκε κατά την περιγραφή του μοντέλου Alexandridis στην ενότητα B.2, η μεγαλύτερη πρόκληση, ήταν ο ορισμός της γωνίας  $\theta$ , μεταξύ της διάδοσης της φωτιάς και της κατεύθυνσης του ανέμου. Για τον σκοπό της λύσης αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιήθηκαν πράξεις διανυσμάτων, και συγκεκριμένα τον τύπο για το εσωτερικό γινόμενο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση 15. Από την εξίσωση αυτή, προκύπτει η εξίσωση 16, για τον υπολογισμό της γωνίας  $\theta$ .

$$A * B = \|A\| * \|B\| * \cos(\theta) \quad (15)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{A * B}{\|A\| * \|B\|}\right) \quad (16)$$

Η χρήση του εσωτερικού γινομένου για τον υπολογισμό της γωνίας μεταξύ δύο διανυσμάτων είναι ένας τρόπος που συνδυάζει ακρίβεια, ικανότητα γενίκευσης και υπολογιστική αποδοτικότητα. Η μέθοδος είναι ακριβής, δεδομένου ότι βασίζεται στη γεωμετρική ιδιότητα των διανυσμάτων χωρίς να χρειάζεται καμία προσέγγιση ή κανονικοποίηση. Αυτό απλοποιεί τον υπολογισμό, ιδιαίτερα εξαλείφοντας την πολυπλοκότητα του προβλήματος που προέρχεται από το γεγονός της ύπαρξης πρόσημων, αλλά και συμπληρωματικών γωνιών, που θα προέκυπτε στην απόπειρα πράξεων μεταξύ των γωνιών σε μοίρες. Η μέθοδος είναι, επίσης, γενικεύσιμη και μπορεί να εφαρμοστεί σε διανύσματα σε οποιαδήποτε διάσταση, κάτι που την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη σε ευρύ φάσμα εφαρμογών. Επιπλέον, διατηρεί την ιδιότητα της εξίσωσης 6, να ορίζεται σε συνεχές πεδίο για την κατεύθυνση του αέρα, σε αντίθεση με άλλα

μοντέλα που την περιορίζουν σε διακριτό πεδίο ορισμού [1]. Τα διανύσματα  $A$  και  $B$ , στην περίπτωση αυτού του μοντέλου, ορίζονται με διακριτό τρόπο ωστόσο, για την διευκόλυνση των πειραματικών παρατηρήσεων. Η μετατροπή σε συνεχή διανύσματα είναι απλή διαδικασία, η οποία θα έχει σκοπιμότητα, στην αξιολόγηση σε σύγκριση με δεδομένα του πραγματικού κόσμου, δεδομένου πως και αυτά παρέχονται σε συνεχή, και όχι διακριτή, μορφή. Για τον ορισμό τους χρησιμοποιείται ακόμα μια δομή `Enum`, με τις 8 διαθέσιμες κατευθύνσεις, όπως φαίνεται στο απόσπασμα C.15.

Listing C.15: Ορισμός των 8 διακριτών κατευθύνσεων του ανέμου

---

```

1
2 class WindDirection(Enum):
3     E = (1,0) #East
4     NE = (sqrt(2)/2,sqrt(2)/2) # Northeast
5     N = (0,1) # North
6     NW = (-sqrt(2)/2,sqrt(2)/2) # Northwest
7     W = (-1,0) # West
8     SW = (-sqrt(2)/2,-sqrt(2)/2) #Southwest
9     S = (0,-1) #South
10    SE = (sqrt(2)/2,-sqrt(2)/2) #SouthEast

```

---

Επιπρόσθετα, η πράξη αυτή, του εσωτερικού γινομένου, δεν απαιτεί υψηλή υπολογιστική ισχύ, καθώς αποτελείται από βασικές αριθμητικές πράξεις, σε αντίθεση με εναλλακτικές, πιο περίπλοκες λύσεις, που περιλαμβάνουν δομές επιλογής.

Για τον υπολογισμό της  $P_{burn}$ , αυτή τη φορά σε σχέση με την επίδραση του αέρα, εξαλείφονται όπως και προηγουμένως, όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες. Σε αυτή την περίπτωση, η  $P_{burn}$  ορίζεται ως ίση με την  $P_w$ , η οποία κατά σειρά είναι ίση με την εξίσωση 6, που αναλύθηκε στο κεφάλαιο B. Σε αντίθεση με την περίπτωση της τοπογραφίας, η χρήση των σταθερών που προτείνονται από το μοντέλο Alexandridis, στην εφαρμογή του στην πυρκαγιά στις Σπέτσες [1], φαίνεται να δίνουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Ο ορισμός των σταθερών και ο υπολογισμός της  $P_w$ , γίνεται όπως και προηγουμένως εντός την συνάρτησης `calculatePburn()`, της οποίας ο νέος ορισμός φαίνεται στο απόσπασμα C.16.

Listing C.16: Υπολογισμός της πιθανότητας  $P_w$ 


---

```

1
2 def calculatePburn(self, cell_from, cell_to, position, V, theta):
3
4     c1 = 0.045
5     c2 = 0.131
6     ft = exp(V*c2*(cos(theta)-1))
7     P_w = exp(c1*V)*ft
8
9     P_burn = P_w
10
11     return P_burn

```

---

Παρατηρείται ότι σε σχέση με την υλοποίηση του υπολογισμού της  $P_s$ , στο απόσπασμα C.14, αλλάζουν οι παράμετροι εισόδου, και πλέον απαιτούνται δύο συμπληρωματικές εισοδοί: η ταχύτητα  $V$  του αέρα και η γωνία  $\theta$  μεταξύ της κατεύθυνσης διάδοσης της φωτιάς και της κατεύθυνσης του ανέμου. Εφόσον γίνει ο υπολογισμός της  $P_{burn}$ , το μόνο βήμα που απομένει για την ολοκλήρωση της υλοποίησης, είναι ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης διάδοσης της φωτιάς. Για τον σκοπό αυτό, προστίθεται στην συνάρτηση `check_neighbours()`, τμήμα κωδικά που διαπιστώνει την κατεύθυνση, και ανάλογα με αυτήν αποδίδει την κατάλληλη τιμή στη μεταβλητή `dir_p`, που αντιπροσωπεύει την κατεύθυνση της διάδοσης. Οι τιμές αποδίδονται στο ίδιο διακριτό σύνολο με την κατεύθυνση του ανέμου, καθώς το γεγονός ότι η διάδοση πραγματοποιείται πάνω σε πλέγμα καθιστά αδύνατη την ύπαρξη συνεχούς πεδίου ορισμού. Η φωτιά μπορεί να διαδοθεί στο επόμενο βήμα σε μία ή περισσότερες από μόνο 8 διαθέσιμες κατευθύνσεις, δηλαδή προς έναν ή περισσότερους από τους γείτονες του κελιού το οποίο εξετάζεται. Έτσι, γίνεται χρήση της ίδιας δομής `Enum`, για την απόδοση των τιμών. Αφού οριστεί και το διάνυσμα της κατεύθυνσης της διάδοσης, γίνεται η πράξη του εσωτερικού γινομένου για τον υπολογισμό της  $\theta$ , και το αποτέλεσμα μετατρέπεται από ακτίνια σε μοίρες, για να δοθεί ως είσοδος στην συνάρτηση `calculatePburn()`. Μόλις επιστραφεί η πιθανότητα  $P_{burn}$ , με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγουμένως, διαπιστώνεται αν θα κληθεί η συνάρτηση `ignite()`, με την χρήση της `np.random.choice()`. Το σύνολο της διαδικασίας που περιγράφηκε παραπάνω για την προσομοίωση της επίδρασης του ανέμου στην πορεία της πυρκαγιάς, υλοποιείται όπως φαίνεται στο απόσπασμα C.17.

Listing C.17: Τροποποίηση της μεθόδου για τον έλεγχο των γειτονικών κελιών στην επίδραση του αέρα.

---

```

1
2 def check_neighbours(self, center_x, center_y, time_step):
3     x = center_x
4     y = center_y
5
6     window = self.window(x,y)
7     for i in range(len(window)):
8         for j in range(len(window[i])):
9             if window[i][j] == 1:
10                if self.grid[x+i-1][y+j-1].state == State.NOT_BURNING:
11                    # wind velocity
12                    V = 15
13                    # wind direction vector
14                    dir_w = WindDirection.S.value
15
16                    # propagation direction vector
17                    match (i,j):
18                        case (1,2):
19                            dir_p = WindDirection.E.value
20                        case (0,2):
21                            dir_p = WindDirection.NE.value
22                        case (0,1):
23                            dir_p = WindDirection.N.value
24                        case (0,0):
25                            dir_p = WindDirection.NW.value
26                        case (1,0):
27                            dir_p = WindDirection.W.value
28                        case (2,0):
29                            dir_p = WindDirection.SW.value
30                        case (2,1):
31                            dir_p = WindDirection.S.value
32                        case (2,2):
33                            dir_p = WindDirection.SE.value
34
35                    theta = np.arccos(np.dot(dir_w, dir_p) / (np.linalg.↵
                        norm(dir_w) * np.linalg.norm(dir_p)))

```

```
36         print(theta)
37         theta = theta * (180 / pi)
38
39         p_burn = Grid.calculatePburn(self, self.grid[x][y], ←
        self.grid[x+i-1][y+j-1], position, V, theta)
40
41         print("burning cell: {},{} with p_burn = {}".format(x←
        ,y,p_burn))
42
43         rand = np.random.choice(2,1,p=[p_burn,1-p_burn])
44
45         if rand == 0:
46             self.ignite(x+i-1,y+j-1)
```

---

## Κεφάλαιο D

### Αποτελέσματα

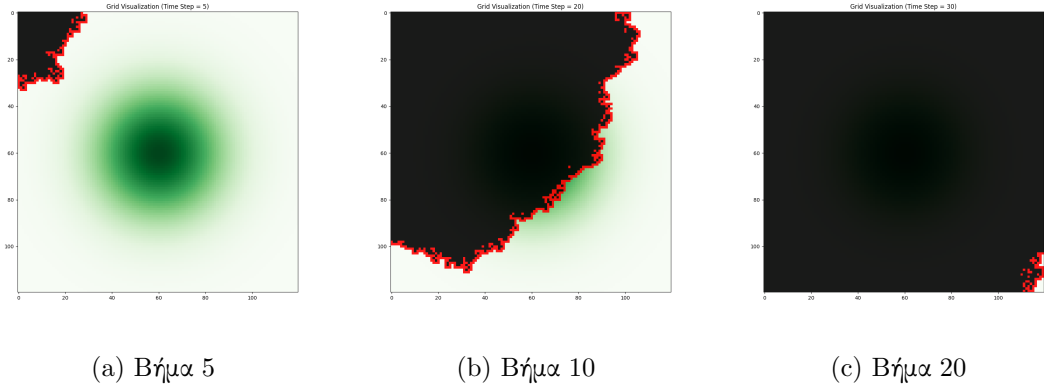
Το κεφάλαιο που ακολουθεί είναι αφιερωμένο στην παρουσίαση και την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου Alexandridis για την πρόβλεψη της διάδοσης των δασικών πυρκαγιών. Σε αυτό το σημείο εξετάζεται η απόδοση του μοντέλου σε διάφορες συνθήκες και τοπογραφικά χαρακτηριστικά, με ιδιαίτερη έμφαση στην επιρροή των παραμέτρων και την ακρίβεια των προβλέψεων. Καταδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο οι τροποποιήσεις και οι βελτιώσεις που εφαρμόστηκαν επέφεραν αισθητές αλλαγές στην αποτελεσματικότητα του μοντέλου. Για την καλύτερη αξιολόγηση και προσφορά κριτικής άποψης για τις παραλείψεις και τις προκλήσεις που αντιμετωπίστηκαν, αλλά και για τον εντοπισμό υποδείξεων για μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις, τα αποτελέσματα αξιολογούνται σε δύο επίπεδα. Αρχικά με την εμπειρική αξιολόγηση των οπτικών αποτελεσμάτων, που αποτελεί τον τρόπο αξιολόγησης κατά την ανάπτυξη του μοντέλου, και την πηγή των αποφάσεων τροποποίησης, και έπειτα με τον εντοπισμό χαρακτηριστικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μετατροπή των οπτικών αποτελεσμάτων σε αριθμητικά, για την εφαρμογή κοινών μεθόδων αξιολόγησης αλγορίθμων. Ο πίνακας D.1 περιγράφει τα δεδομένα εισόδου και εξόδου για το μοντέλο τοπογραφικής επιρροής, στην εφαρμογή του αλγορίθμου Alexandridis στην τροποποιημένη και μη τροποποιημένη μορφή του. Η κάθε γραμμή του πίνακα περιγράφει μία εκτέλεση του αλγορίθμου, του οποίου το όνομα εμφανίζεται στην πρώτη στήλη. Οι στήλες του πίνακα που περιγράφουν τις τιμές εισόδου του μοντέλου περιλαμβάνουν την τυπική απόκλιση, την τιμή βελτιστοποίησης  $\alpha$ , το μήκος του κελιού στον χάρτη (σε μέτρα) και το σημείο έναρξης της πυρκαγιάς στην προσομοίωση. Η τελευταία στήλη του πίνακα αφορά την έξοδο του αλγορίθμου, αναφέρεται στις εικόνες που παράγονται από την προσομοίωση, και περιλ-

αμβάνει τις αναφορές για τα αντίστοιχα σχήματα. Στόχος του πίνακα είναι να παρέχει μια συνοπτική αλλά πλήρη επισκόπηση των διάφορων παραμέτρων και εξόδων που εμπλέκονται στην προσομοίωση.

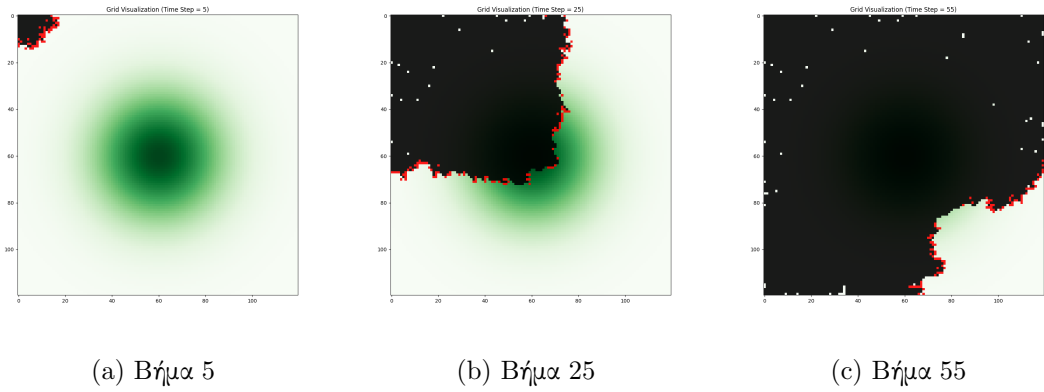
Πίνακας D.1: Δεδομένα εισόδου-εξόδου μοντέλου τοπογραφικής επιρροής.

| Αλγόριθμος               | $\sigma_x = \sigma_y$ | A    | $\alpha$ | Μήκος κελιού | Εκκίνηση | Έξοδος (Σχήμα)          |
|--------------------------|-----------------------|------|----------|--------------|----------|-------------------------|
| Alexandridis(unmodified) | 20                    | 1000 | 0.078    | 25           | (1,1)    | Σχήμα D.6a,D.6b,D.6c    |
| Alexandridis(modified)   | 20                    | 1000 | 0.078    | 25           | (1,1)    | Σχήμα D.7a,D.7b,D.7c    |
| Alexandridis(modified)   | 12                    | 1000 | 0.078    | 25           | (1,1)    | Σχήμα D.8a,D.8b,D.8c    |
| Alexandridis(modified)   | 60                    | 1000 | 0.078    | 25           | (1,1)    | Σχήμα D.9a,D.9b,D.9c    |
| Alexandridis(modified)   | 20                    | 100  | 0.078    | 25           | (1,1)    | Σχήμα D.10a,D.10b,D.10c |
| Alexandridis(modified)   | 20                    | 1000 | 0.1      | 25           | (1,1)    | Σχήμα D.11a,D.11b,D.11c |
| Alexandridis(modified)   | 20                    | 1000 | 0.2      | 25           | (1,1)    | Σχήμα D.12a,D.12b,D.12c |
| Alexandridis(modified)   | 20                    | 1000 | 1.0      | 25           | (1,1)    | Σχήμα D.13a,D.13b,D.13c |
| Alexandridis(modified)   | 20                    | 1000 | 0.1      | 100          | (1,1)    | Σχήμα D.14a,D.14b,D.14c |
| Alexandridis(modified)   | 20                    | 1000 | 0.1      | 100          | (60,60)  | Σχήμα D.15a,D.15b,D.15c |

Στο Σχήμα D.6 φαίνεται η πρώτη υλοποίηση του αλγόριθμου, πριν τις απαραίτητες τροποποιήσεις. Η εικόνα αυτή ήταν η προτροπή για την εξέταση των τιμών της  $P_s$ , όπου και διαπιστώθηκε πως, η πλειοψηφία τους ήταν τιμές άνω του ενός. Αυτό φαίνεται και από την ταχύτητα με την οποία η πυρκαγιά κάλυψε σχεδόν ολόκληρη την επιφάνεια του πλέγματος μέχρι το εικοστό βήμα, πράγμα που δεν παρατηρείται, για παράδειγμα, στο σχήμα D.7. Αυτό φυσικά είναι αναμενόμενο, καθώς για τιμές  $P_s > 1$ , τα κελιά σε κάθε βήμα καίγονται με βεβαιότητα. Εκτός λοιπόν από το σχήμα της διάδοσης, που αναμένονταν να δυσκολεύεται στην κατάβαση, δημιουργώντας ένα "πέταλο", ήταν και η ταχύτητα της διάδοσης που αποτέλεσε ένδειξη λάθους στην υλοποίηση του αλγόριθμου.



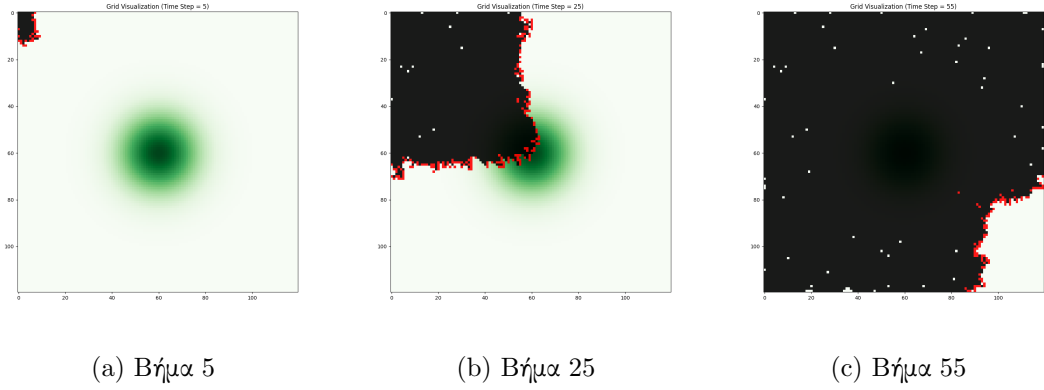
Σχήμα D.6: Έξοδος του μη τροποποιημένου αλγόριθμου.



Σχήμα D.7: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για τις ίδιες εισόδους με το σχήμα D.6.

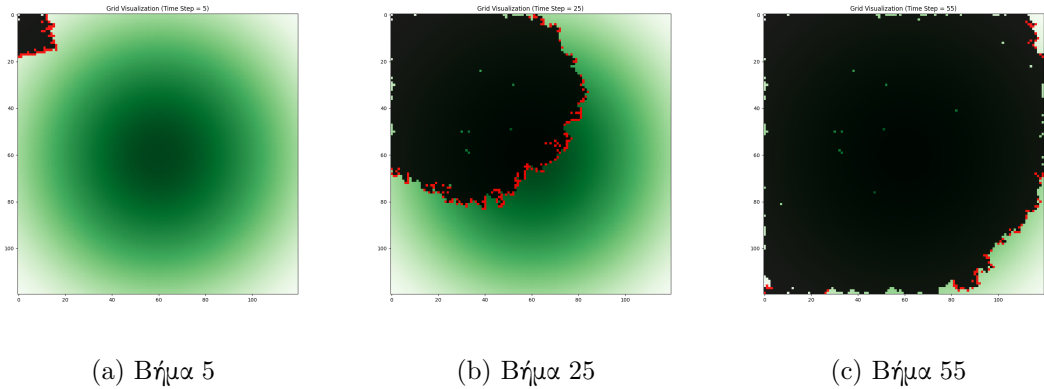
Για τα παραδείγματα D.7, D.8 και D.9, όπου κυμαίνεται μόνο η τυπική απόκλιση, φαίνεται πως το σχήμα της διάδοσης σχηματίζει πιο αιχμηρή γωνία στο μέτωπο της φωτιάς, τη στιγμή που συναντά τους πρόποδες του "βουνού" στο πλέγμα. Στο σχήμα D.9 για παράδειγμα, η αιχμηρή αυτή γωνία δεν παρατηρείται καθόλου, καθώς η υψηλή τιμή της τυπικής απόκλισης σημαίνει πως το βουνό είναι πιο λείο, και δεν έχει απότομες μεταβολές υψόμετρου.

Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και διατηρώντας το  $\sigma = 20$ , όπως στο Σχήμα D.7, αλλά μειώνοντας το  $A$ , το οποίο ορίζει το ύψος του κελιού με το μεγαλύτερο υψόμετρο, δηλαδή το κεντρικό κελί. Χαμηλώνοντας το υψηλότερο σημείο του βουνού, επιτυγχάνεται λείανση της κυρτότητας, όπως και στο σχήμα D.9. Έτσι, ούτε στο Σχήμα D.10 παρατηρείται η αιχμηρή γωνία που εμφανίζεται στα άλλα σχήματα. Η πυρκαγιά μάλιστα καλύπτει όλη την έκταση του πλέγματος



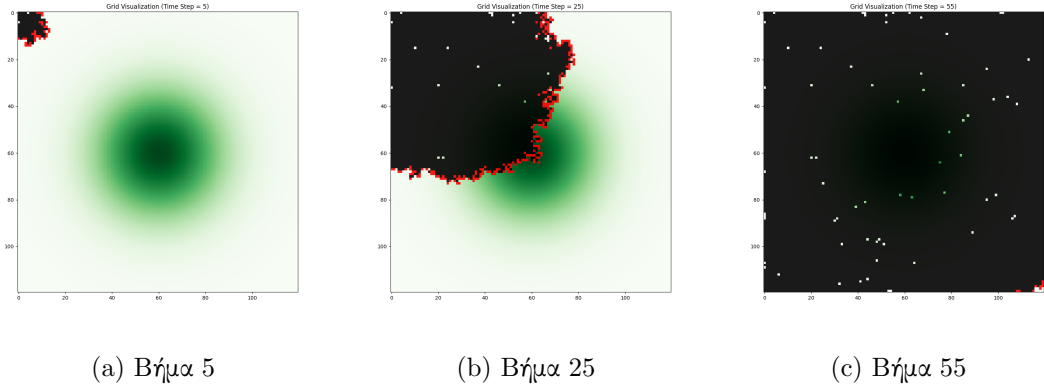
Σχήμα D.8: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για  $\sigma = 12$ .

ταχύτερα από ότι στα προηγούμενα παραδείγματα, επειδή συνολικά, όπως φαίνεται και από την απεικόνιση του DEM (με πράσινο χρώμα), υπάρχουν λιγότερα υπερυψωμένα κελιά στην επιφάνεια διάδοσης.



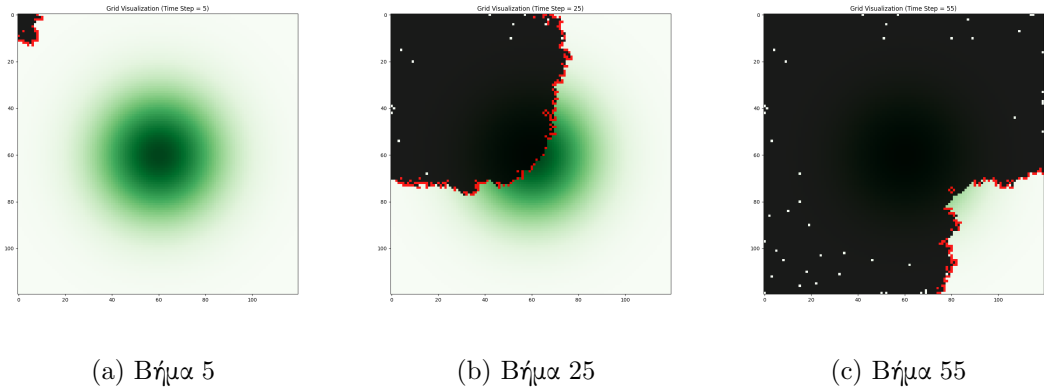
Σχήμα D.9: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για  $\sigma = 60$ .

Οι μεταβλητές  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  και  $A$  είναι παράμετροι που επηρεάζουν την τοπογραφία, και έτσι η επίδραση της τοπογραφίας στην διάδοση της φωτιάς παρατηρείται και ερμηνεύεται εύκολα. Η παράμετρος  $\alpha$  ωστόσο, επιδρά στην εξίσωση που υπολογίζει την πιθανότητα  $P_s$ , και έτσι ο ορισμός της γίνεται εμπειρικά, χωρίς να μελετάται η συσχέτισή της με τον φυσικό κόσμο. Οι μεταβλητές βελτιστοποίησης είναι παράμετροι που προσαρμόζονται για να βελτιώσουν την απόδοση ενός μοντέλου σύμφωνα με κάποια κριτήρια. Στο πλαίσιο της προσομοίωσης της διάδοσης πυρκαγιάς, η επιλογή των σωστών τιμών για αυτές τις μεταβλητές μπορεί να οδηγή-



Σχήμα D.10: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για  $A = 100$ .

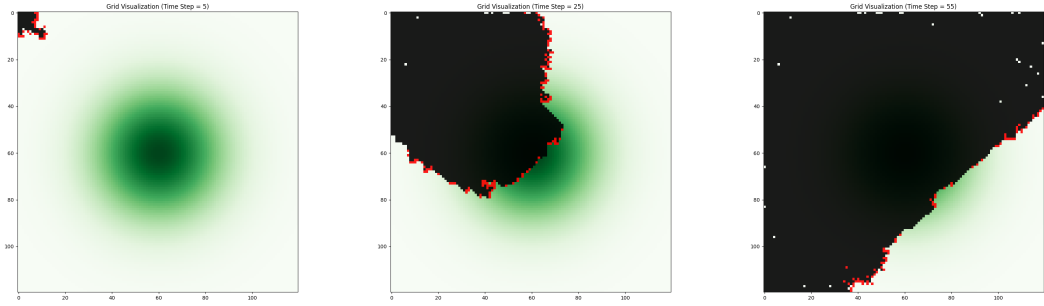
σει σε πιο ακριβείς και αξιόπιστες προβλέψεις. Στην εξίσωση 9, η μεταβλητή  $\alpha$  λειτουργεί ως συντελεστής κλίμακας που διέπει τον τρόπο με τον οποίο η  $P_s$  ανταποκρίνεται στις αλλαγές της γωνίας  $\theta_s$ . Πιο συγκεκριμένα, η  $\alpha$  επηρεάζει το "βάρος" της στην τελική τιμή της  $P_s$ .



Σχήμα D.11: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για  $\alpha = 0.1$ .

Όπως φαίνεται στο Σχήμα D.11, η αύξηση της παραμέτρου  $\alpha$  από 0.078 σε 0.1 αυξάνει την επιρροή της γωνίας  $\theta_s$  στην τιμή  $P_s$ . Αυτό παρατηρείται από το γεγονός ότι περισσότερα κελιά έχουν καεί στο βήμα 25 του Σχήματος D.11, σε σύγκριση με το βήμα 25 του Σχήματος D.7, καθώς η φωτιά έχει εξελιχθεί γρηγορότερα χάρη στην ευνοϊκή ανηφορική κλίση. Αντίστοιχα, παρατηρείται το αντίθετο φαινόμενο στην σύγκριση των βημάτων 55, καθώς η διάδοση επιβραδύνεται περισσότερο στην περίπτωση του σχήματος D.11c, εφόσον η επιρροή της κατηφορικής κλίσης αυξήθηκε. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται ακόμα πιο έντονα στο

Σχήμα D.12, ιδιαίτερα κατά την κάθοδο η οποία καθίσταται ακόμα πιο δύσκολη, εξ αιτίας της επιρροής της τιμής της  $\theta_s$  στην πιθανότητα  $P_s$ .



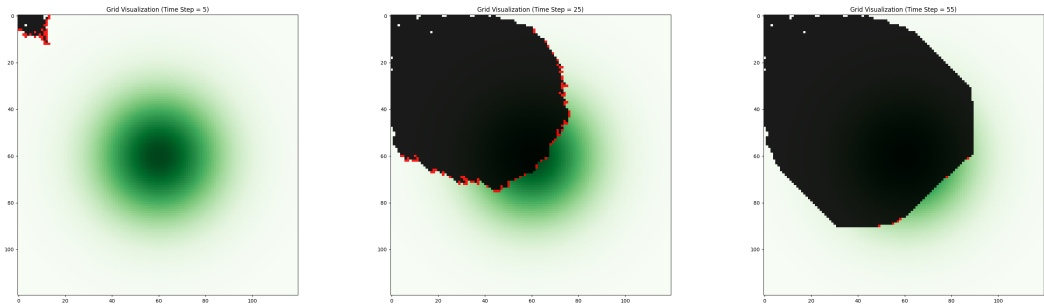
(a) Βήμα 5

(b) Βήμα 25

(c) Βήμα 55

Σχήμα D.12: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για  $\alpha = 0.2$ .

Στο Σχήμα D.13 διακρίνεται πως για  $\alpha = 1$ , η κáθοδος της διάδοσης καθίσταται τόσο δύσκολη, δηλαδή η πιθανότητα να καεί ένα κελί που βρίσκεται χαμηλότερα από αυτό από το οποίο διαδίδεται η φωτιά, είναι το χαμηλή, που τα κελιά περνούν στην Κατάσταση 4 (BURNED) πρόωρα, και η διάδοση της φωτιάς σταματάει σε συγκεκριμένες κατευθύνσεις. Το σχήμα που δημιουργείται, όπως φαίνεται στο Σχήμα D.13, δεν φαίνεται να αντιστοιχεί σε πραγματικές συνθήκες, πράγμα που καταδεικνύει την ανάγκη ύπαρξης της  $\alpha$ , και του ορισμού της σε τιμές μικρότερες του ενός.



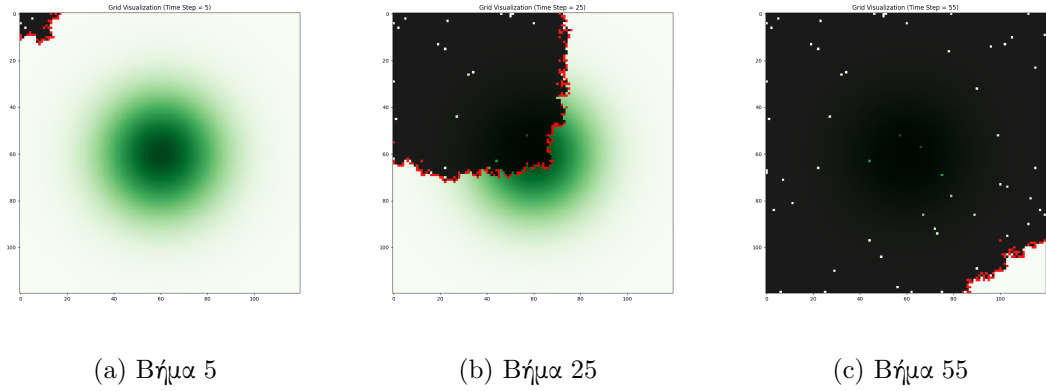
(a) Βήμα 5

(b) Βήμα 25

(c) Βήμα 55

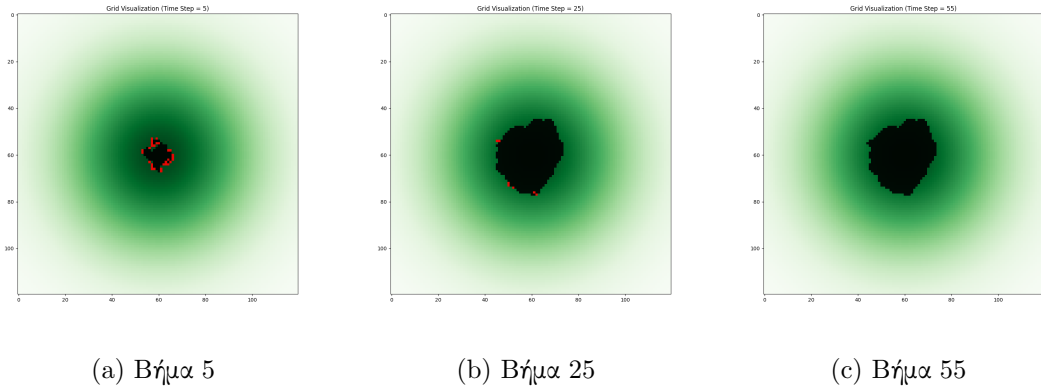
Σχήμα D.13: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για  $\alpha = 1$ .

Η αύξηση της τιμής  $l$  του μήκους του κελιού, έχει σημαντικές επιπτώσεις στην προσομοίωση της διάδοσης φωτιάς. Σε επίπεδο χωρικής ανάλυσης, με την αύξηση της τιμής  $l$  μειώνεται η λεπτομέρεια του μοντέλου, επειδή τα κελιά καλύπτουν μεγαλύτερες περιοχές. Αυτό ενδέχεται να περιορίσει την ακρίβεια της προσομοίωσης, ιδιαίτερα σε τοπογραφικά περίπλοκες περιοχές. Με την αλλαγή της τιμής  $l$  επηρεάζονται και οι παράγοντες που συμβάλλουν στην πυρκαγιά, όπως η κλίση του εδάφους. Τα μεγαλύτερα κελιά έχουν ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό της κλίσης ως μέση τιμή, καθώς το υψόμετρο μπορεί να διαφέρει σε διαφορετικά σημεία του ίδιου διακριτού κελιού, γεγονός που συμβάλει σε ένα λιγότερο ακριβές αλλά υπολογιστικά αποδοτικότερο μοντέλο. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα D.14, καθώς με την αύξηση του  $l$  σε σύγκριση με αυτό του Σχήματος D.11 (όπου όλες οι άλλες παράμετροι έχουν ίσες τιμές), μειώνεται η επιρροή της γωνίας κλίσης  $\theta_s$ , γεγονός που φαίνεται από την πιο αιχμηρή γωνία στην άνοδο (D.14b), και το αντίθετο φαινόμενο στην κάθοδο (D.14c).



Σχήμα D.14: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για  $\alpha = 0.1$  και  $l = 100$ .

Η μετατόπιση του σημείου εκκίνησης είχε σημαντικές επιπτώσεις στην διαδικασία της φωτιάς, όπως αποδεικνύεται από το Σχήμα D.15. Συγκεκριμένα, η διάδοση της φωτιάς διαπιστώθηκε ότι είναι πολύ πιο δύσκολη στην εκκίνηση από την κορυφή του λόφου. Για να επιτευχθεί επαρκής διάδοση που διατηρείται για τουλάχιστον 25 χρονικά βήματα, ήταν απαραίτητο να αυξηθεί η τιμή της τυπικής απόκλισης στο μοντέλο.



Σχήμα D.15: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για  $\sigma = 30$  και σημείο εκκίνησης το (60,60).

Η διαδικασία καταγραφής των αποτελεσμάτων εφαρμόστηκε αναλόγως και για το μοντέλο όταν λαμβάνεται υπόψη μόνο η επιρροή του αέρα. Κατά την ανάλυση αυτής της προσομοίωσης, λαμβάνουμε υπόψη μόνο τη φυσική επίδραση του ανέμου στη διαδικασία διάδοσης της φωτιάς, γεγονός που επιτρέπει την αξιολόγηση του αντίκτυπου των ατμοσφαιρικών συνθηκών και της κατεύθυνσης του ανέμου στην διάδοση της φωτιάς. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να εξετάσουμε τη συμπεριφορά του μοντέλου υπό την επίδραση των διάφορων κατευθύνσεων και ταχυτήτων του ανέμου. Τα δεδομένα αυτά καταγράφονται στον πίνακα D.2.

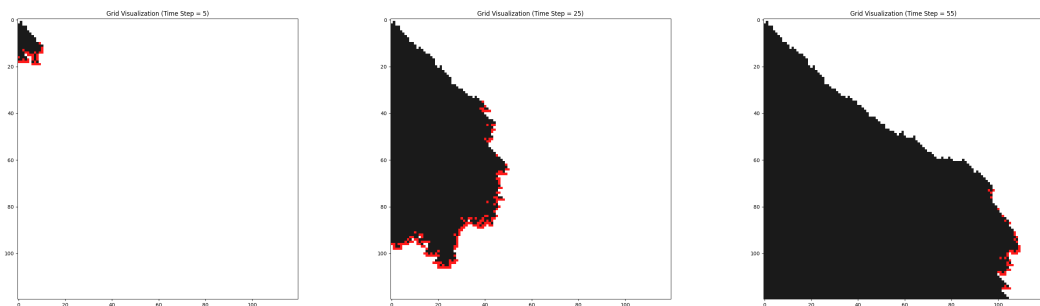
Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως το μοντέλο, όταν προσομοιώνει την επίδραση του ανέμου, είναι σημαντικά πιο γρήγορο στην εκτέλεση, από ότι το μοντέλο της τοπογραφικής επιρροής.

Πίνακας D.2: Δεδομένα εισόδου-εξόδου μοντέλου επίδρασης του αέρα.

| Αλγόριθμος   | Ταχύτητα (m/s) | Ταχύτητα (Beaufort) | Κατεύθυνση | Εκκίνηση  | Έξοδος (Σχήμα)          |
|--------------|----------------|---------------------|------------|-----------|-------------------------|
| Alexandridis | 15             | $\approx 7$         | South      | (1,1)     | Σχήμα D.16a,D.16b,D.16c |
| Alexandridis | 15             | $\approx 7$         | North      | (119,1)   | Σχήμα D.17a,D.17b,D.17c |
| Alexandridis | 15             | $\approx 7$         | East       | (1,1)     | Σχήμα D.18a,D.18b,D.18c |
| Alexandridis | 15             | $\approx 7$         | West       | (119,119) | Σχήμα D.19a,D.19b,D.19c |
| Alexandridis | 30             | $\approx 11$        | South      | (1,1)     | Σχήμα D.20a,D.20b,D.20c |
| Alexandridis | 10             | $\approx 5$         | Southeast  | (1,1)     | Σχήμα D.21a,D.21b,D.21c |
| Alexandridis | 15             | $\approx 7$         | Northwest  | (1,1)     | Σχήμα D.22a,D.22b,D.22c |

Όπως φαίνεται στις προσομοιώσεις των οποίων τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα Σχήματα D.16, D.17,D.18 και D.19, η κατεύθυνση του ανέμου καθορίζει την πορεία την οποία θα

ακολουθήσει η διάδοση της φωτιάς, με τις ευνοϊκότερες συνθήκες να συναντώνται όταν η κατεύθυνση της διάδοσης συμφωνεί με την κατεύθυνση του ανέμου. Φυσικά, αυξάνοντας την ταχύτητα του ανέμου, όπως φαίνεται στο σχήμα ??, το αποτέλεσμα παρατηρείται ακόμα πιο έντονα, ωστόσο τέτοιες τιμές στην ταχύτητα του αέρα δεν αντιστοιχούν σε συνθήκες που συναντώνται συχνά στον πραγματικό κόσμο.

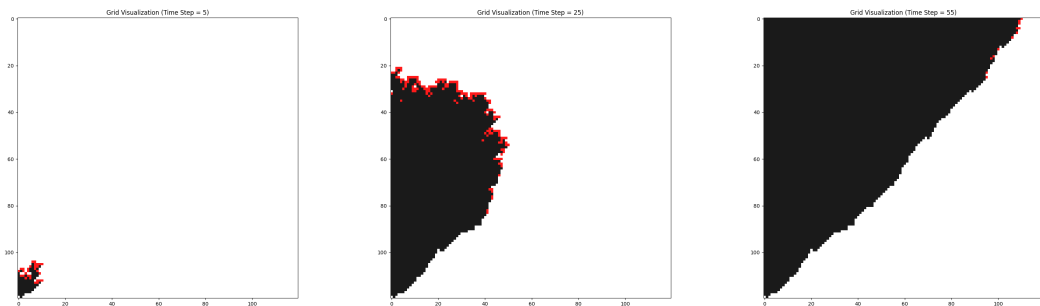


(a) Βήμα 5

(b) Βήμα 25

(c) Βήμα 55

Σχήμα D.16: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 15(m/s) και κατεύθυνση Νότια.

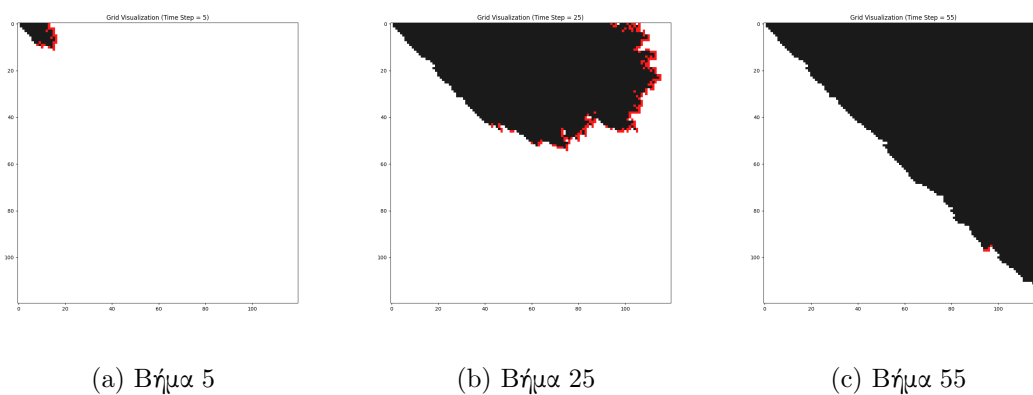


(a) Βήμα 5

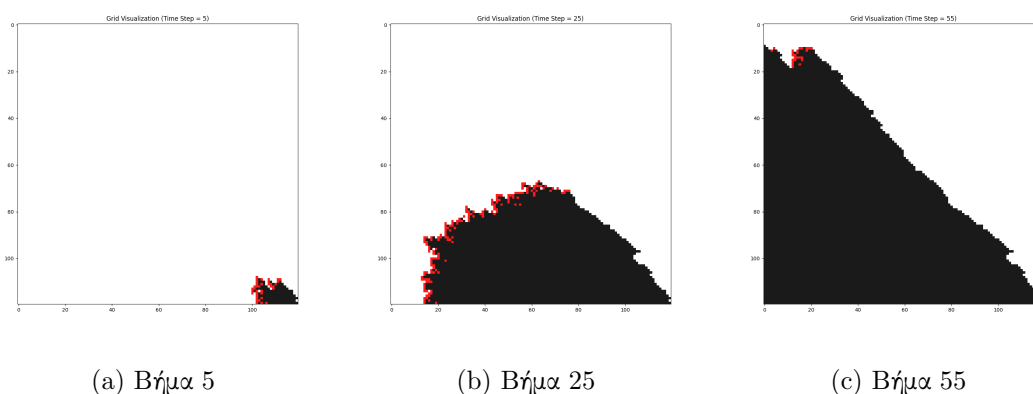
(b) Βήμα 25

(c) Βήμα 55

Σχήμα D.17: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 15(m/s) και κατεύθυνση Βόρεια.

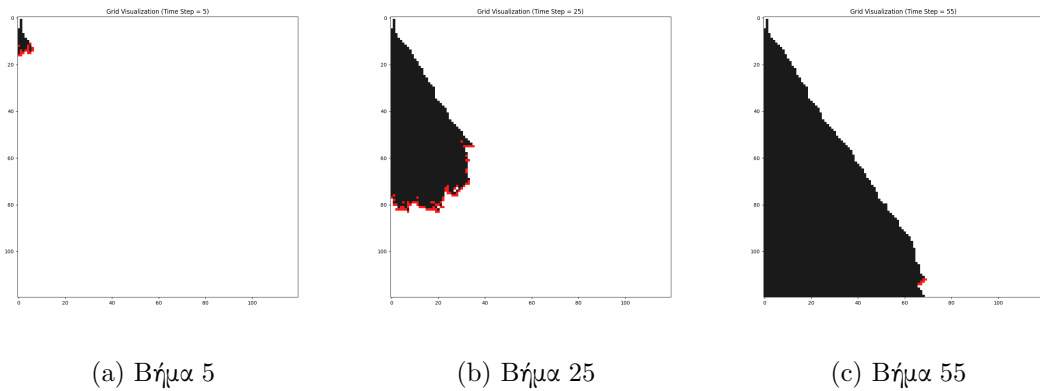


Σχήμα D.18: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 15(m/s) και κατεύθυνση Ανατολικά.

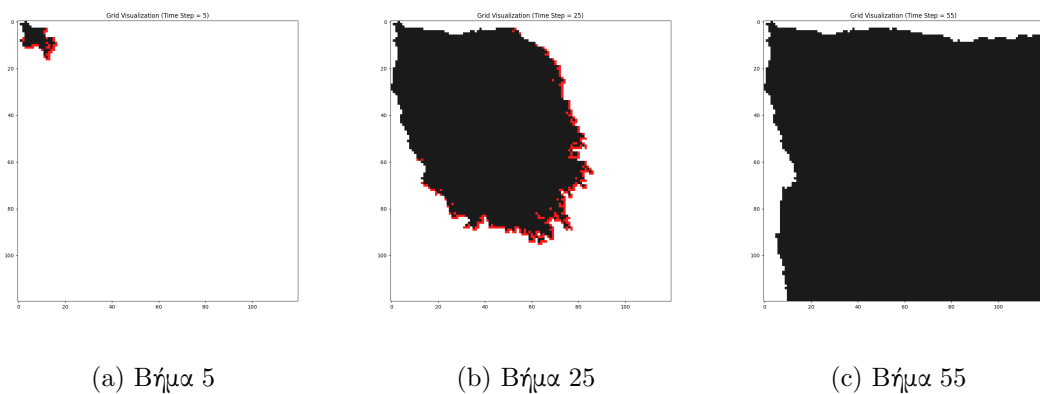


Σχήμα D.19: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 15(m/s) και κατεύθυνση Δυτικά.

Η αποκλιμάκωση στην εξέλιξη των σχημάτων διαφορετικών κατευθύνσεων, παρά των αμετάβλητων υπολοίπων συνθηκών, πηγάζει από το γεγονός ότι το μοντέλο φωτιάς είναι στοχαστικό. Έτσι, διαφορετικές προσομοιώσεις με τα ίδια αρχικά δεδομένα μπορεί να έχουν διαφορετικά αποτελέσματα λόγω της τυχαιότητας που είναι ενσωματωμένη στο μοντέλο. Αυτό το αποτέλεσμα είναι επιθυμητό, καθώς όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χρήση στοχαστικών μοντέλων στην προσομοίωση της διάδοσης των πυρκαγιών είναι κατάλληλη, λόγω της απρόβλεπτης και πολύπλοκης συμπεριφοράς της.

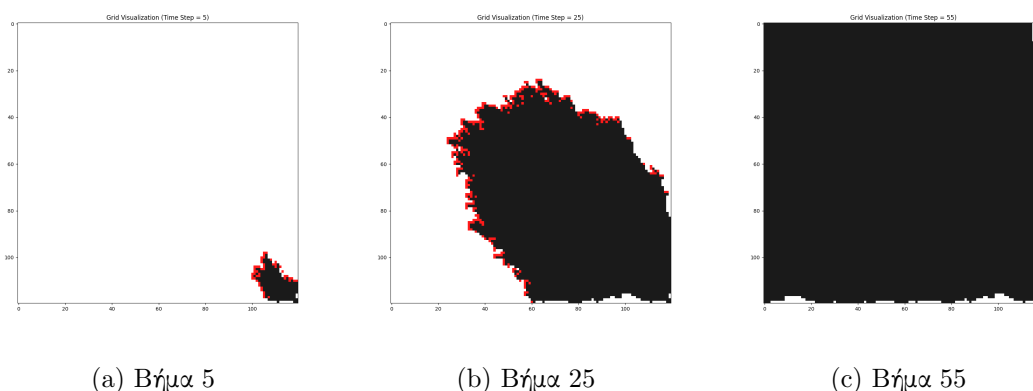


Σχήμα D.20: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 30(m/s) και κατεύθυνση Νότια.



Σχήμα D.21: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 10(m/s) και κατεύθυνση Νότιο-ανατολικά.

Μια ακόμη πειραματική διαδικασία που επιτρέπει την εξερεύνηση της διαδικασίας εξάπλωσης φωτιάς είναι η μεταβολή της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτή η πειραματική προσέγγιση είναι σημαντική για γιατί επιτρέπει την αξιολόγηση της ευαισθησίας του μοντέλου σε σχέση με τις αλλαγές στην κατεύθυνση και την ένταση του ανέμου. Για την αλλαγή επιλέχθηκε το χρονικό βήμα 26, αφού σε αυτό το χρονικό βήμα συνήθως η διάδοση της φωτιάς έχει φτάσει στο κέντρο του πλέγματος.

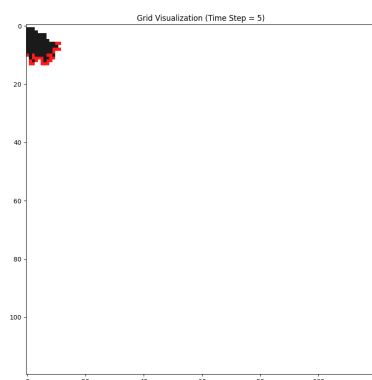


Σχήμα D.22: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για ταχύτητα ανέμου 15(m/s) και κατεύθυνση Βόρειο-δυτικά.

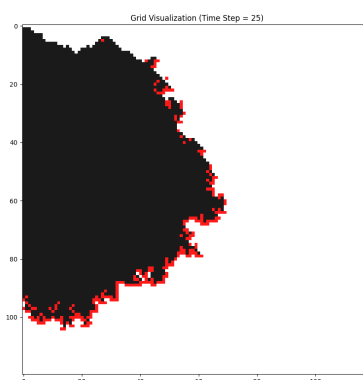
Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου αυτής της πειραματικής διαδικασίας, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα D.3. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν δείχνουν πώς μεταβάλλεται η διάδοση με τις διαφορετικές συνθήκες στην ταχύτητα, την κατεύθυνση του ανέμου ή και στον συνδυασμό των δύο. Για την αναπαράσταση αυτών των αποτελεσμάτων επιλέχθηκαν τέσσερα χρονικά βήματα, για να αναπαρασταθεί καλύτερα η εξέλιξη υπό την επιρροή των αλλαγών. Έτσι, τα δύο πρώτα

Πίνακας D.3: Δεδομένα εισόδου-εξόδου μοντέλου επίδρασης του αέρα με αλλαγές στο βήμα 26.

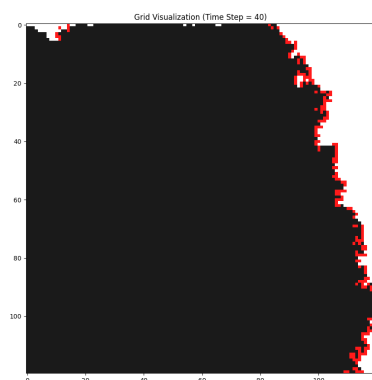
| Αλγόριθμος   | Ταχύτητα |      | Κατεύθυνση |           | Εκκίνηση | Έξοδος (Σχήμα)                |
|--------------|----------|------|------------|-----------|----------|-------------------------------|
|              | πριν     | μετά | πριν       | μετά      |          |                               |
| Alexandridis | 10       | 5    | South      | South     | (1,1)    | Σχήμα D.23a,D.23b,D.23c,D.23d |
| Alexandridis | 10       | 10   | South      | East      | (1,1)    | Σχήμα D.24a,D.24b,D.24c,D.24d |
| Alexandridis | 20       | 20   | South      | East      | (1,1)    | Σχήμα D.25a,D.25b,D.25c,D.25d |
| Alexandridis | 10       | 10   | South      | North     | (1,1)    | Σχήμα D.26a,D.26b,D.26c,D.26d |
| Alexandridis | 3        | 15   | Southeast  | Northwest | (1,1)    | Σχήμα D.27a,D.27b,D.27c,D.27d |



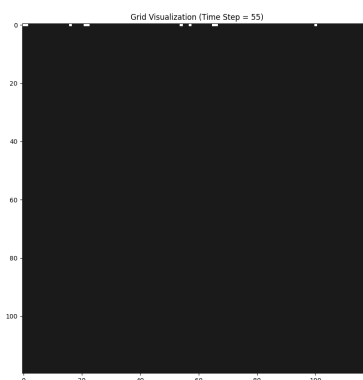
(a) Βήμα 5



(b) Βήμα 25



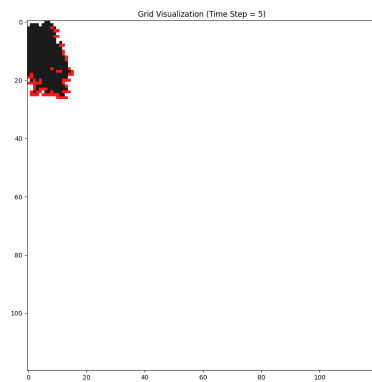
(c) Βήμα 45



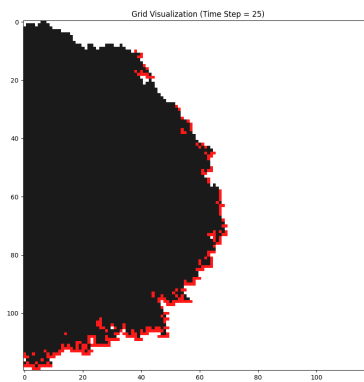
(d) Βήμα 55

Σχήμα D.23: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για αλλαγή ταχύτητας ανέμου από 10(m/s) σε 5(m/s).

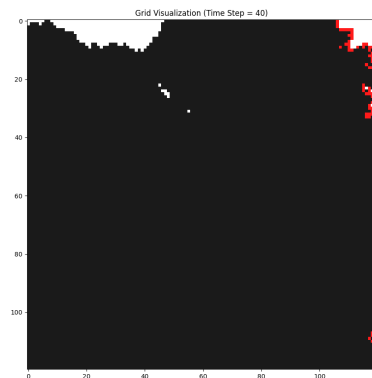
Στο Σχήμα D.23 γίνεται εμφανές, πως η μείωση της έντασης του ανέμου, από ταχύτητα περίπου ίση με 5 Beaufort, σε ταχύτητα ίση με 3 Beaufort, έχει ως αποτέλεσμα την λιγότερο "κατευθυνόμενη" διάδοση της φωτιάς. Αυτό συμβαίνει επειδή η επίδραση του ανέμου στην διάδοση μειώνεται, όταν η ταχύτητα του είναι χαμηλή, αποτέλεσμα το οποίο είναι αναμενόμενο και αντιστοιχεί στον πραγματικό κόσμο. Αντίστοιχα, στο Σχήμα D.24, παρατηρείται πως η επίδραση παραμένει σταθερή, και η κατεύθυνση μεταβάλλεται από νότια προς ανατολικά. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί και στο σχήμα D.25 πιο έντονα, λόγω αύξησης της ταχύτητας του ανέμου, ώστε η αλλαγή κατεύθυνσης να είναι πιο αισθητή.



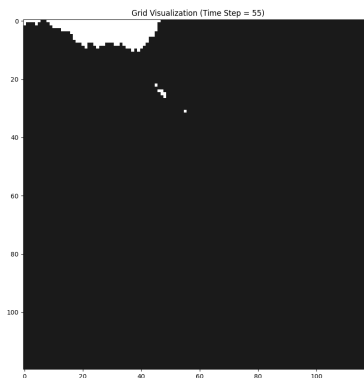
(a) Βήμα 5



(b) Βήμα 25



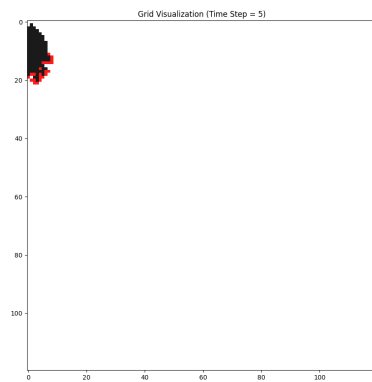
(c) Βήμα 40



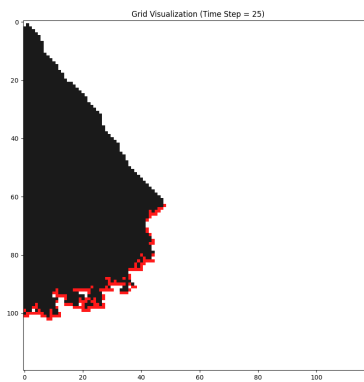
(d) Βήμα 55

Σχήμα D.24: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου από Νότια σε Ανατολικά.

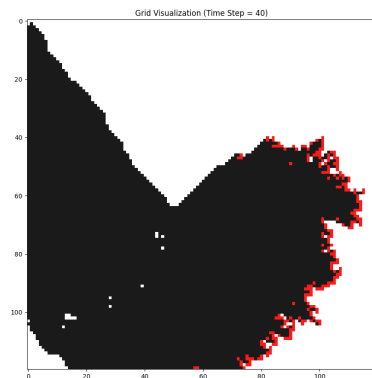
Στο Σχήμα D.26, φαίνεται η αρνητική συμβολή της κατεύθυνσης διάδοσης με την κατεύθυνση του ανέμου μετά το 26ο βήμα. Η απότομη αλλαγή του ανέμου προς την αντίθετη κατεύθυνση, παρεμποδίζει σημαντικά την εξέλιξη της φωτιάς, καθώς τα κελιά που βρίσκονται στην κατεύθυνση που συμφωνεί με αυτήν του ανέμου, είναι ήδη σε Κατάσταση 4 (BURNED), και δεν μπορούν να καούν. Ως αποτέλεσμα, υπάρχει κατάσβεση της φωτιάς νωρίτερα από ότι αν ο άνεμος είχε διατηρήσει την νότια κατεύθυνσή του, όπως για παράδειγμα στο Σχήμα D.16.



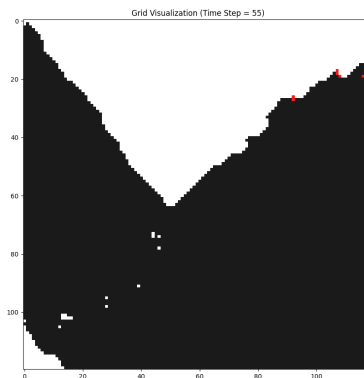
(a) Βήμα 5



(b) Βήμα 25



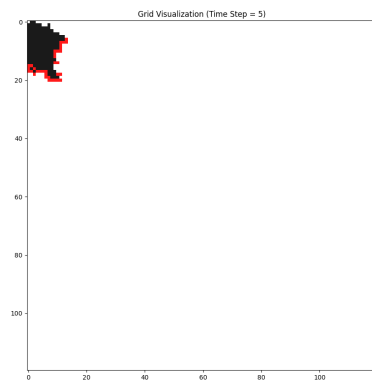
(c) Βήμα 40



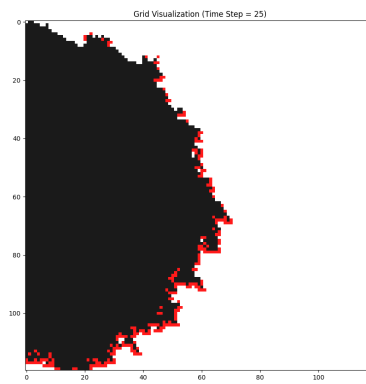
(d) Βήμα 55

Σχήμα D.25: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου από Νότια σε Ανατολικά με ταχύτητα 20 (m/s).

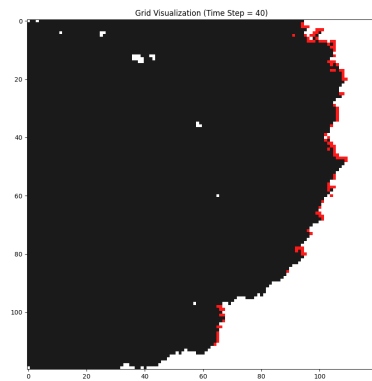
Τέλος, μπορεί να παρατηρηθεί η συμβολή της αλλαγής κατεύθυνσης και ταχύτητας, όπως φαίνεται στο Σχήμα D.27. Η απότομη αύξηση της έντασης του ανέμου, σε συνδυασμό με την αλλαγή κατεύθυνσης προς την αντίθετη φορά, έχει ως αποτέλεσμα την διάδοση της φωτιάς με πιο κατευθυνόμενο τρόπο, μετά το 25ο βήμα, και κατά συνέπεια η αλλαγή κατεύθυνσης να γίνεται πιο αισθητή.



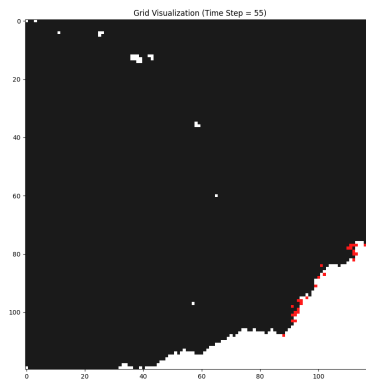
(a) Βήμα 5



(b) Βήμα 25

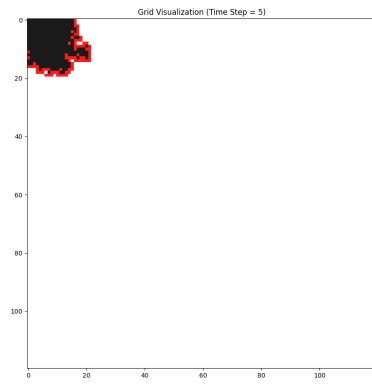


(c) Βήμα 40

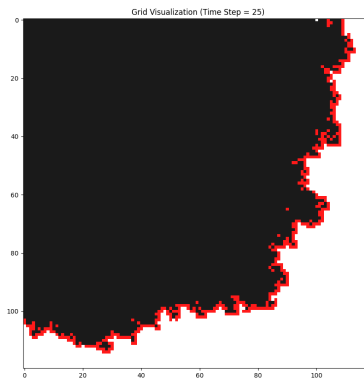


(d) Βήμα 55

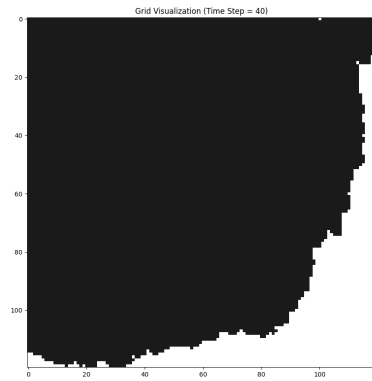
Σχήμα D.26: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου από Νότια σε Βόρεια.



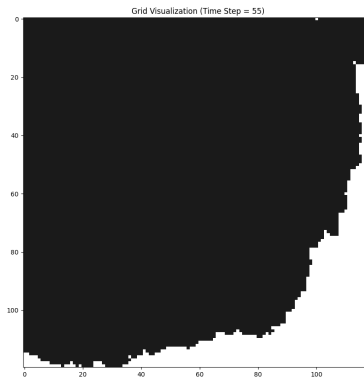
(a) Βήμα 5



(b) Βήμα 25



(c) Βήμα 40



(d) Βήμα 55

Σχήμα D.27: Έξοδος του τροποποιημένου αλγόριθμου για αλλαγή κατεύθυνσης ανέμου από Νότιο-ανατολικά σε Βόρειο-δυτικά και αλλαγή ταχύτητας ανέμου από 3 (m/s) σε 15 (m/s).

## Κεφάλαιο Ε

### Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκτεταμένη μελέτη και έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της πτυχιακής εργασίας. Τα συμπεράσματα προσφέρουν μια επισκόπηση των βασικών ευρημάτων και των διδαγμάτων που προέκυψαν από αυτή την επιστημονική διαδικασία.

Η χρήση στοχαστικών μοντέλων αποδεικνύεται κρίσιμη στην ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης για φαινόμενα με την πολυπλοκότητα της διάδοσης των δασικών πυρκαγιών. Η ενσωμάτωση της τυχαιότητας στα μοντέλα επιτρέπει την αντιμετώπιση αβεβαιοτήτων και την προσομοίωση πιο ρεαλιστικών σεναρίων. Αυτό επιτρέπει στους ερευνητές και τους αναλυτές να λαμβάνουν υπόψη παράγοντες που δεν είναι πάντα προβλέψιμοι ή σταθεροί, βελτιώνοντας την ακρίβεια και την προβλεψιμότητα των αποτελεσμάτων. Με την εκτεταμένη χρήση των στοχαστικών μοντέλων, είναι δυνατόν να εξερευνηθούν διάφορα σενάρια και πιθανές εξελίξεις, κάτι που είναι απαραίτητο για την ανάλυση και την αντιμετώπιση πολύπλοκων φυσικών φαινομένων όπως οι δασικές πυρκαγιές.

Μέσω της βιβλιογραφικής έρευνας έγινε εμφανές πως υπάρχει πληθώρα αποτελεσματικών φυσικών και στοχαστικών μοντέλων που περιγράφουν την επίδραση διαφόρων παραγόντων, στην διάδοση της φωτιάς σε δασικές πυρκαγιές. Χάρη σε αυτό το γεγονός, υπάρχουν πολλές υλοποιήσεις των μοντέλων αυτών, για διαφορετικές συνθήκες και περιπτώσεις χρήσης. Η προσαρμοστικότητα των μοντέλων στις ανάγκες της υλοποίησης φάνηκε κατά την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης, καθώς η τοπογραφική επιρροή του μοντέλου Alexandridis τροποποιήθηκε και προσαρμόστηκε στις ανάγκες ενός μοντέλου που λαμβάνει υπόψιν μόνο την τοπογραφική επιρροή στην διάδοση της φωτιάς, και όχι το σύνολο παραγόντων που μελετά το

αρχικό μοντέλο. Συμπερασματικά, η προσαρμογή των αλγορίθμων Cellular Automata απαιτεί τροποποιήσεις που συνδέονται με τον αριθμό και τη φύση των μεταβλητών που λαμβάνονται υπόψη. Έγινε επίσης αισθητή η ανάγκη διατήρησης μεταβλητών βελτιστοποίησης στα μοντέλα, καθώς είναι κρίσιμη για την δυνατότητα προσαρμογής τους στις ανάγκες κάθε περιοχής και περίπτωσης. Αυτή η ευελιξία είναι καίρια για την ακρίβεια και την αξιοπιστία των προβλέψεων. Τέλος, η παρούσα εργασία ανοίγει τον δρόμο για μελλοντικές επεκτάσεις καθώς το μεγαλύτερο μέρος του αλγόριθμου που αναπτύχθηκε, μπορεί να αποτελέσει πλαίσιο για ένα πιο πλήρες μοντέλο, περιλαμβάνοντας επιπλέον παράγοντες και συμβάλλοντας στην ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια των προβλέψεων.

Συνολικά, αυτή η πτυχιακή εργασία επιβεβαιώνει την αξία των στοχαστικών μοντέλων στην προσομοίωση δασικών πυρκαγιών και προσφέρει πολύτιμες προτάσεις για την βελτίωση των μοντέλων Cellular Automata. Το πλαίσιο που αναπτύχθηκε ανοίγει προοπτικές για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα αυτόν, προκειμένου να ενισχυθεί η προστασία από δασικές πυρκαγιές και να μειωθούν οι κίνδυνοι για το περιβάλλον και την ανθρώπινη ζωή.

## Βιβλιογραφία

- [1] A. Alexandridis et al. “A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990”. In: *Applied Mathematics and Computation* 204.1 (2008), pp. 191–201. ISSN: 0096-3003. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.amc.2008.06.046>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0096300308004943>.
- [2] Alex Alexandridis et al. “Wildland fire spread modelling using cellular automata: Evolution in large-scale spatially heterogeneous environments under fire suppression tactics”. In: *International Journal of Wildland Fire* 20 (Aug. 2011), pp. 633–647. DOI: 10.1071/WF09119.
- [3] Ross A. Bradstock et al. “Spatial factors influencing the likelihood of house impact in a large wildfire”. In: *PLOS ONE* 9.11 (2014). URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111414>.
- [4] Saeedeh Eskandari. “Application of a CA-based model to predict the fire front in Hyrcanian forests of Iran”. In: *Arabian Journal of Geosciences* 9 (Nov. 2016), pp. 1–12. DOI: 10.1007/s12517-016-2717-y.
- [5] Mark Finney. “Design of Regular Landscape Fuel Treatment Patterns for Modifying Fire Growth and Behavior”. In: *Forest Science* 47 (May 2001).
- [6] J. G. Freire and C. C. DaCamara. “Using cellular automata to simulate wildfire propagation and to assist in fire management”. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19.1 (2019), pp. 169–179. DOI: 10.5194/nhess-19-169-2019. URL: <https://nhess.copernicus.org/articles/19/169/2019/>.
- [7] Piyush Jain et al. “A review of machine learning applications in wildfire science and management”. In: *Environmental Reviews* 28.4 (2020), pp. 478–505. DOI: 10.

- 1139/er-2020-0019. eprint: <https://doi.org/10.1139/er-2020-0019>. URL: <https://doi.org/10.1139/er-2020-0019>.
- [8] O. Jellouli et al. “Forest fire modelling using cellular automata: application to the watershed Oued Laou (Morocco)”. In: *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems* 22.5 (2016), pp. 493–507. DOI: 10.1080/13873954.2016.1204321. URL: <https://doi.org/10.1080/13873954.2016.1204321>.
  - [9] W. Matt Jolly et al. “How Rocky Mountain forest types differ in ignition potential”. In: *Canadian Journal of Forest Research* 42.2 (2012), pp. 356–369.
  - [10] J. E. Keeley et al. *Fire in Mediterranean Ecosystems: Ecology, Evolution and Management*. Cambridge University Press, 2012, p. 515. URL: <https://doi.org/10.4000/mediterranee.6936>.
  - [11] Rodman R. Linn et al. “A numerical study of slope and fuel structure effects on coupled wildfire behaviour”. In: *International Journal of Wildland Fire* 19 (2 2010), pp. 179–201. URL: <https://doi.org/10.1071/WF07120>.
  - [12] Jonathan Martin and Thomas Hillen. “The Spotting Distribution of Wildfires”. In: *Applied Sciences* 6.6 (2016). ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app6060177. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/6/6/177>.
  - [13] Max A. Moritz et al. “Climate change and disruptions to global fire activity”. In: *Ecosphere* 3.6 (2012), pp. 1–22.
  - [14] K. Mutthulakshmi et al. “Simulating forest fire spread and fire-fighting using cellular automata”. In: *Chinese Journal of Physics* 65 (2020), pp. 642–650. ISSN: 0577-9073. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjph.2020.04.001>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0577907320300873>.
  - [15] Vu Nguyen and Michael Blumenstein. “An Application of the 2D Gaussian Filter for Enhancing Feature Extraction in Off-line Signature Verification”. In: *2011 International Conference on Document Analysis and Recognition*. 2011, pp. 339–343. DOI: 10.1109/ICDAR.2011.76.
  - [16] Stephen J. Pyne, Patricia L. Andrews, and Richard D. Laven. *Introduction to Wildland Fire*. John Wiley & Sons, 1996.
  - [17] Xiaoping Rui et al. “Forest fire spread simulation algorithm based on cellular automata”. In: *Natural Hazards* 91 (1 2018), pp. 309–319. ISSN: 1573-0840. DOI: 10.1007/s11069-017-3127-5. URL: <https://doi.org/10.1007/s11069-017-3127-5>.

- [18] Liyang Sun et al. “Adaptive Forest Fire Spread Simulation Algorithm Based on Cellular Automata”. In: *Forests* 12.11 (2021). ISSN: 1999-4907. DOI: 10.3390/f12111431. URL: <https://www.mdpi.com/1999-4907/12/11/1431>.
- [19] E. E. Tan and A. J. Vicente. “FIRE SPREAD PREDICTION USING PROBABILISTIC CELLULAR AUTOMATA: THE CASE OF URBAN SETTLEMENTS IN THE PHILIPPINES”. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4/W19* (2019), pp. 415–420. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W19-415-2019. URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-4-W19/415/2019/>.
- [20] Kai Wang et al. “Copula-Based Joint Model of Injury Severity and Vehicle Damage in Two-Vehicle Crashes”. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2514 (Nov. 2015), pp. 158–166. DOI: 10.3141/2514-17.
- [21] David Weise and Gregory Biging. “Effects of wind velocity and slope on flame properties”. In: *Canadian Journal of Forest Research-revue Canadienne De Recherche Forestiere - CAN J FOREST RES* 26 (Oct. 1996), pp. 1849–1858. DOI: 10.1139/x26-210.
- [22] Eric W. Weisstein. *Moore Neighborhood*. URL: <https://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html> (visited on 08/10/2023).
- [23] Claire Wolters. *CLIMATE 101: WILDFIRES*. 2019. URL: <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/wildfires> (visited on 03/21/2023).
- [24] Maciej K. Wozniak and Philippe J. Giabbanelli. “Comparing Implementations of Cellular Automata as Images: A Novel Approach to Verification by Combining Image Processing and Machine Learning”. In: *Proceedings of the 2021 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*. SIGSIM-PADS ’21. Virtual Event, USA: Association for Computing Machinery, 2021, pp. 13–25. ISBN: 9781450382960. DOI: 10.1145/3437959.3459256. URL: <https://doi.org/10.1145/3437959.3459256>.
- [25] Qiu Yingxiong et al. “Phylogeography of East Asia’s Tertiary relict plants: current progress and future prospects”. In: *Biodiversity Science* 25.2, 136 (2017), p. 136. DOI: 10.17520/biods.2016292. URL: [https://www.biodiversity-science.net/EN/abstract/article\\_8958.shtml](https://www.biodiversity-science.net/EN/abstract/article_8958.shtml).

- [26] Zhang Yongzhong et al. “Simulating wildfire spreading processes in a spatially heterogeneous landscapes using an improved cellular automaton model”. In: vol. 5. Oct. 2004, 3371–3374 vol.5. DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1370427.
- [27] Yong Zou and Chao Zheng. “A Scientometric Analysis of Predicting Methods for Identifying the Environmental Risks Caused by Landslides”. In: *Applied Sciences* 12.9 (2022). ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app12094333. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/9/4333>.

# Συντμήσεις

CA

Cellular Automata

PCA

Probabilistic Cellular Automata

## Γλωσσάρι Ξενικών Όρων

|                         |                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Crown fire              | Μια κατάσταση φυσικής πυρκαγιάς όπου η φλόγα εξαπλώνεται στο ανώτερο κοίλωμα των δέντρων και δημιουργεί μια εκρηκτική πυρκαγιά σε υψηλά ύψη.                                                                                                |
| Raster                  | Μια γραφική αναπαράσταση χωρικών δεδομένων με τη χρήση πλέγματος, το οποίο καλύπτει ομοιόμορφα την επιφάνεια και αποτελείται από κελιά με σταθερό μέγεθος.                                                                                  |
| Μοντέλο time correction | Μια διορθωτική διαδικασία που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του χρόνου σε ένα μοντέλο ή σύστημα με ακρίβεια. Ο σκοπός είναι να διορθωθεί η ακρίβεια του μοντέλου για να ανταποκρίνεται στην πραγματική χρονική εξέλιξη των φαινομένων. |
| Random Forest           | Ένας αλγόριθμος μηχανικής μάθησης που βασίζεται στην αρχή της συνδυασμένης απόφασης από πολλά απλά δέντρα αποφάσεων, χρησιμοποιώντας τυχαία δεδομένα για την κατασκευή τους.                                                                |
| Deep Learning           | Ένα υποσύνολο της μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιεί βαθιά νευρωνικά δίκτυα για την ανάλυση και την εξαγωγή πληροφοριών από δεδομένα.                                                                                                       |
| Overlay                 | Η διαδικασία της τοποθέτησης ενός γραφικού ή εικονικού επιπέδου πάνω σε ένα άλλο, συνήθως με σκοπό την προβολή ή την επεξεργασία των πληροφοριών που περιέχονται σε αυτά τα δύο επίπεδα.                                                    |

Μέθοδος-κατασκευαστής

Ένας ειδικός τύπος μεθόδου σε προγραμματισμό που χρησιμοποιείται για την δημιουργία και αρχικοποίηση αντικειμένων σε μια κλάση.

Μεθόδοι `get-set`

Χρησιμοποιούνται στον προγραμματισμό για την ανάκτηση (`get`) και ρύθμιση (`set`) των τιμών μελών ενός αντικειμένου ή μιας κλάσης.