



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μοντελοποίηση και Υπολογιστική Προσομοίωση της
Δυναμικής Εξάπλωσης Πυρκαγιών σε Μεγάλης
Κλίμακας Ετερογενείς Εκτάσεις με χρήση Γεωγραφικών
Πληροφοριακών Συστημάτων και Κυτταρικά Αυτόματα**

ΖΩΗ ΠΑΣΧΑΛΙΔΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Σιέττος Κωνσταντίνος
Τομέας Μηχανικής ΕΜΠ

Αθήνα
Οκτώβριος 2008

Στον πατέρα μου

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο «Μοντελοποίηση και Υπολογιστική Προσομοίωση της Δυναμικής Εξάπλωσης Πυρκαγιών σε Μεγάλης Κλίμακας Ετερογενείς Εκτάσεις με χρήση Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων και Κυτταρικά Αυτόματα» εκπονήθηκε στα πλαίσια της προπτυχιακής εκπαίδευσής μου στη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός της Εργασίας είναι καταρχάς η γνωριμία και η μελέτη της υπολογιστικής μεθόδου των Κυτταρικών Αυτόματων, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή τους σε μοντέλα προσομοίωσης της διάδοσης μιας φωτιάς σε δάσος και συγκρίνοντάς τα ως προς τη συμπεριφορά τους κατά τη διαδικασία αυτή. Επιπλέον βασικό στόχο αποτελεί η προσομοίωση της δυναμικής της εξάπλωσης μιας φωτιάς σε μεγάλης κλίμακας ετερογενές περιβάλλον συνδυάζοντας δεδομένα από Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (GIS data) και τη διαδικασία της επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας (Image Processing) ώστε να λαμβάνονται υπ' όψη πλήθος παραγόντων που την επηρεάζουν, όπως η κλίση του εδάφους, τα χαρακτηριστικά του ανέμου και της βλάστησης στην περιοχή διάδοσης. Για το σκοπό αυτό επιχειρείται η κατασκευή ενός μοντέλου Κυτταρικού Αυτόματου για την προσομοίωση ενός πραγματικού γεγονότος, την πυρκαγιά που ξέσπασε στις Σπέτσες τον Αύγουστο του 1990 καταστρέφοντας ένα μεγάλο μέρος της βλάστησης του νησιού. Τέλος, αυτή η εφαρμογή του μοντέλου σε μια περίπτωση πραγματικής πυρκαγιάς δίνει τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πραγματικά και προβάλλει την επάρκεια της μεθόδου στην πρόβλεψη της διάδοσης της φωτιάς, γεγονός που θα μπορούσε να ωφελήσει στις προσπάθειες αντιμετώπισης μιας τέτοιας κατάστασης.

ABSTRACT

This Diploma Thesis entitled «Modeling and Computational Simulation of Dynamic Fire Spread in Large Scale Heterogeneous Environments using Geographical Information Systems and Cellular Automata» was produced as part of my undergraduate education at the School of Applied Mathematics and Physical Sciences of The National Technical University of Athens. The purpose of the Thesis is, initially, the familiarity in the use of the computational method of Cellular Automata, emphasizing on their application to models that simulate the spread of a fire in forests and comparing them to their behaviour during this process. Moreover the basic objective is to simulate the dynamics of the spread of fire in large scale heterogeneous environment combining theory from combustion, fluid mechanics, data from Geographic Information Systems (GIS data) and digital image processing techniques. Key-factors that affect the fire spread, such as the slope of the ground, the wind's velocity and direction and the type and the density of the vegetation in the area of dissemination were also taken into account. Towards this aim a model of Cellular Automata is constructed for the simulation of a real wildland fire incident: the wild fire that broke up on the Greek island Spetses in August of 1990 and destroyed a major part of the island's forest. Finally, this model's application on a real incident gives the opportunity to compare the simulation's results with the real ones. This comparison points out the adequacy of the method to predict the spread of the fire, which could be very important and beneficial when dealing with similar situations.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο ρόλος του Δάσκαλου είναι από τους πλέον σημαντικούς ιδιαίτερα μέσα στο σύγχρονο Πανεπιστήμιο, για την ολόπλευρη διαπαιδαγώγηση φοιτητών ώστε να γίνουν άρτιοι επιστήμονες προς όφελος των λαϊκών αναγκών. Στη διαδρομή μου μέσα στη Σχολή των Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών στάθηκα ιδιαίτερα τυχερή καθώς είχα την ευκαιρία να γνωρίσω και να δεχτώ απλόχερα οποιαδήποτε βοήθεια από διακεκριμένους επιστήμονες και κυρίως αξιόλογους ανθρώπους, που θα ήθελα μέσα από αυτή εδώ την Εργασία να τους ευχαριστήσω. Πρώτα και κύρια τον Δάσκαλο, με την πιο γεμάτη έννοια του όρου, και επιβλέποντα Καθηγητή μου κύριο Κωνσταντίνο Σιέττο, για την επιστημονική βοήθεια και αμέριστη κατανόηση που μου έδειξε καθ'όλη τη διάρκεια της συνεργασία μας αλλά και για την ενθάρρυνση, στήριξη και εμπιστοσύνη του στο επόμενο μου βήμα προς τον κόσμο της Έρευνας. Επιπλέον, χρωστώ ένα μεγάλο ευχαριστώ από καρδιάς στον υπογύφιο Διδάκτορα του Τομέα Μηχανικής Ανδρέα Ρέππα, όπου χωρίς την πάντα πρόθυμη και επίμονη βοήθειά του η Εργασία αυτή δεν θα είχε ολοκληρωθεί. Λίγο πέρα από τα όρια του Πολυτεχνείου, ευχαριστώ την αδερφική μου φίλη και φιλόλογο Αφροδίτη Σκεύη για την επιμέλεια της Διπλωματικής μου Εργασίας και για την συμπαράσταση σε όλη τη διάρκεια εκπόνησής της και όχι μόνο. Η αγάπη, βοήθεια και στήριξη από την οικογένεια πάντα θεωρείται αυτονόητη, αλλά δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω για όλα, με αφορμή αυτή την ολοκλήρωση των προπτυχιακών σπουδών μου, τους δικούς μου ανθρώπους, τη μητέρα μου Ζαχαρούλα Πασχαλίδη και τον αδερφό μου Μιλτιάδη Πασχαλίδη.

Τέλος, σε όλη αυτή την πορεία μέχρι την ολοκλήρωση των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο είναι σημαντικό για μένα να αναφέρω πως η φυσιογνωμία του Κομμουνιστή Δάσκαλου Δημοσθένη Μπαρτζώκα αποτέλεσε παράδειγμα. Όντας από τους τυχερούς φοιτητές που ήμουν μαθήτριά του, θα έχω πάντα ως φάρο το επιστημονικό και κοινωνικό του έργο και την ολοκληρωμένη αντίληψή του για τον κοινωνικό ρόλο του επιστήμονα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα αποτελούν οι εκδηλώσεις πυρκαγιών και οι συνέπειές τους στη φύση και στη ζωή του ανθρώπου. Για το λόγο αυτό έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα η μελέτη των χαρακτηριστικών τους ώστε να μπορούν να προβλέπονται και να αντιμετωπίζονται τα πύρινα μέτωπα που ξεσπούν, αλλά και να γίνεται χρήση ελεγχόμενων πυρκαγιών σε περιπτώσεις όπου υπάρχει ανάγκη. Σε αυτή τη διαδικασία η ανάπτυξη της υπολογιστικής μεθόδου των Κυτταρικών Αυτόματων έχει συμβάλει τα μέγιστα δίνοντας την ευκαιρία για την υπολογιστική ανάλυση και προσομοίωση της δυναμικής της φωτιάς. Επιπλέον σε συνδυασμό με τα τοπογραφικά δεδομένα που παρέχουν τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα μπορούν να δημιουργηθούν ισχυρά μοντέλα που να προσομοιώνουν την διάδοση της φωτιάς σε μεγάλης κλίμακας ορεινά και ετερογενή περιβάλλοντα.

Αρχικά ασχολούμαστε με τη διαδικασία εξάπλωσης πυρκαγιάς σε ένα εικονικό επίπεδο περιβάλλον, στο οποίο θεωρούμε ότι η φωτιά διαδίδεται από ένα δένδρο στα γειτονικά του με στοχαστικό τρόπο. Σε αυτή την περίπτωση αναπτύσσουμε δύο μοντέλα και μελετάμε πώς η πιθανότητα μετάδοσης της φωτιάς από το ένα δέντρο στο άλλο επηρεάζει την εξάπλωση της σε όλο το περιβάλλον. Δείχνουμε πως απλοί μικροσκοπικοί-διακριτικοί κανόνες σε επίπεδο κελιού μπορούν να δώσουν «ζωή» σε πολύπλοκες (complex) μη γραμμικές δυναμικές σε μακροσκοπικό επίπεδο οι οποίες είναι αδύνατον να προβλεφτούν από τους μικροσκοπικούς-δακρυτούς κανόνες per-se. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι άλλωστε και ο «ορισμός» των πολύπλοκων συστημάτων.

Στη συνέχεια, εφαρμόζουμε ένα μοντέλο Κυτταρικού Αυτόματου σε συνδυασμό με Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα για την προσομοίωση της διάδοσης της φωτιάς σε ένα ετερογενές περιβάλλον μεγάλης κλίμακας, αυτό των Σπετσών. Το μοντέλο το οποίο εμπεριέχει στοιχεία και θεωρίες από την θεωρία της καύσης και της ρευστομηχανικής εμπερικλείει κύριους παράγοντες που επηρεάζουν τη διάδοση: την κλίση του εδάφους, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου, την πυκνότητα και το είδος της βλάστησης. Τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά λαμβάνονται από τα καταγεγραμμένα δεδομένα μέσω του προγράμματος Google Earth (<http://www.google.com/earth/index.html>) σε συνδυασμό με ένα πρόγραμμα Γεωγραφικού Πληροφοριακού Συστήματος (GIS), το Google Mapper (<http://www.globalmapper.com/>). Τα χαρακτηριστικά του ανέμου στην περιοχή όταν ξέσπασε η φωτιά αντλούνται από βάσεις δεδομένων Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία και τα στοιχεία βλάστησης λαμβάνονται ύστερα από τη ψηφιακή επεξεργασία της φωτογραφίας του νησιού (Image Processing). Τα αποτελέσματα από την παραπάνω προσομοίωση συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα για τη διάδοση της φωτιάς όπως είναι καταγεγραμμένα από τις Αρχές, δίνοντας μας τη

δυνατότητα εξαγωγής χρήσιμων συμπερασμάτων για την επάρκεια της μεθόδου και τις προοπτικές χρήσης της στον τομέα της πρόβλεψης και αντιμετώπισης αντίστοιχων γεγονότων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	10
Εισαγωγή	10
1.1. Τα δάση και η σημασία τους στη Ζωή του Ανθρώπου.	10
1.2. Μοντέλα περιγραφής εξάπλωσης φωτιάς	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	19
Κυτταρικά Αυτόματα – Cellular Automata	19
2.1. Εισαγωγή	19
2.2. Ιστορική αναδρομή	20
2.3. Εφαρμογές και δυνατότητες	21
2.4. Ανάπτυξη και εφαρμογή της μεθόδου	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	24
Κυτταρικά Αυτόματα και μοντέλα επέκτασης φωτιάς	24
3.1. Εισαγωγή	24
3.2. Το Κυτταρικό Αυτόματο στο σύστημα δάσος-φωτιά	25
3.3. Εφαρμογή Μοντέλων	27
3.3.1. Ένα Μοντέλο Κυτταρικού Αυτόματου για τη μετάδοση της Φωτιάς με αλληλεπίδραση «στοιχείου» προς «στοιχείο»: από τους μικροσκοπικούς κανόνες στην πολύπλοκη μακροσκοπική συμπεριφορά	28
3.3.2. Ένα Μοντέλο Κυτταρικού Αυτόματου για τη μετάδοση της Φωτιάς με μη γραμμική αλληλεπίδραση των στοιχείων	34
3.3.3. Συμπεράσματα από τη σύγκριση των 2 μοντέλων	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	41
Εφαρμογή των Κυτταρικών Αυτομάτων σε μία πραγματική κατάσταση: η περίπτωση των Σπετσών	41
4.1. Το Κυτταρικό Αυτόματο	41
4.2. Ανάκτηση και επεξεργασία των Γεωλογικών – Γεωγραφικών δεδομένων για τις Σπέτσες	48
4.3. Επεξεργασία εικόνας (Image Processing) για την ανάκτηση των πληροφοριών βλάστησης	51
4.3.1. Τύποι ψηφιακής εικόνας: RGB και Gray scale	52

4.3.2.	Επεξεργασία εικόνας μέσω του Διακριτού Συνημιτονοειδούς Μετασχηματισμού	53
4.4.	Εφαρμογή του μοντέλου Κυτταρικού Αυτόματου για τις Σπέτσες	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο		63
Επίλογος - Μελλοντική Εργασία		63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Εισαγωγή

1.1. Τα δάση και η σημασία τους στη Ζωή του Ανθρώπου.

Σε όλους τους λαούς το δέντρο έχει εξέχουσα σημασία και αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της παράδοσής τους. Υπάρχει το ιερό δέντρο, το δέντρο της ζωής και του θανάτου, του καλού και του κακού, το δέντρο του κόσμου και της γνώσης, το δέντρο του πεπρωμένου, το στοιχειωμένο δέντρο. Η ιδέα της συγγένειας ανθρώπου και δέντρου αντικατοπτρίζεται σε κοσμογονικούς μύθους. Το δέντρο αντιπροσωπεύει την αστείρευτη πηγή ζωής. Το έθιμο να φυτεύουν ένα δέντρο, όταν γεννιέται ένα παιδί, προδίδει την άμεση συσχέτιση της ανθρώπινης ζωής και υγείας με τη μακροζωία και την αντοχή των δέντρων. Οι Δρυάδες, οι Νύμφες των δέντρων, γεννιούνται, όταν φύτευε ένα δέντρο, σύμφωνα με την παράδοση, έτσι όπως αυτή συναντιέται σε διάφορους λαούς. Αποτελεί επίσης έμπνευση για τη λογοτεχνία, την τέχνη, τη μουσική. Γίνεται σύμβολο, τραγούδι, παραμύθι, έργο τέχνης.

Η αξία του δέντρου και κατ' επέκταση του δάσους δεν εστιάζεται μόνο στην αισθητική, λατρευτική ή συμβολική του ιδιότητα, αλλά στη ζωτική για τους ανθρώπους σημασία του. Είναι τόσο σημαντικό για την ύπαρξή μας όσο και για την συνέχιση της ζωής.



Σχήμα 1.1: Δάσος: ένα πολύπλοκο οικοσύστημα με φυτά και ζώα που χαρακτηρίζεται από μεγάλη πυκνότητα δέντρων.

Το δάσος παρέχει προστασία και τροφή σε όλα τα είδη της πανίδας, προσφέρει πολύτιμα προϊόντα – ξυλεία, τροφή, φάρμακα – βοηθώντας στην οικονομική ανάπτυξη, αποτελεί μια από τις βασικές πηγές παραγωγής οξυγόνου, συγκρατεί τα νερά της βροχής, ώστε να αποφευχθούν διαβρώσεις του εδάφους, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη διατήρηση του κλίματος περιορίζοντας τις ακραίες θερμοκρασίες. Το δάσος διαδραματίζει ζωτικής σημασίας ρόλο στον κύκλο του

νερού, του άνθρακα και του οξυγόνου. Συμβάλλει στη δημιουργία, τον εμπλουτισμό και την προστασία του εδάφους. Εκατοντάδες χιλιάδες άνθρωποι εξαρτώνται από τα δάση για να ζήσουν. Επί αιώνες, η ανθρωπότητα εκμεταλλεύεται τα δάση, τους πόρους τους και τα εδάφη τους για τις δικές της ανάγκες. Είναι ένας ανανεώσιμος φυσικός πόρος με τεράστιες και ανεξάντλητες δυνατότητες στην περιβαλλοντική, οικονομική και πολιτιστική ανάπτυξη ενός τόπου, που συντελεί στη δημιουργία καλύτερων συνθηκών ζωής.

Ωστόσο, η αλόγιστη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων από την όλο και αυξανόμενη ανθρώπινη δραστηριότητα και η εμπορευματοποίηση και κακή διαχείριση του φυσικού πλούτου μαζί με τις καταστροφικές πυρκαγιές αποτελούν τις κύριες αιτίες καταστροφής του δάσους. Όταν όμως ένα δάσος καταστρέφεται, έχουμε τεράστιες, ανεπανόρθωτες, ανυπολόγιστες συνέπειες στο περιβάλλον, στην οικονομία, στη ζωή μας. Υποβαθμίζεται γενικά το περιβάλλον, οι οικολογικές συνθήκες χειροτερεύουν και μπορούν να κάνουν δύσκολη τη αναδημιουργία δασών και να επιφέρουν ανεπανόρθωτη και επικίνδυνη διατάραξη της βιολογικής ισορροπίας. Εγκαταλείπονται τα εδάφη στη διαβρωτική δράση των βροχών και στον κίνδυνο να παρασυρθούν προς τη θάλασσα. Δημιουργούνται χείμαρροι και ενισχύονται οι πλημμύρες. Μειώνεται η δυνατότητα των εδαφών να συγκρατήσουν τα νερά των βροχών και να εμπλουτίσουν τα υπόγεια νερά, τις πηγές και τα ποτάμια, με αποτέλεσμα τη λειψυδρία. Στερούμαστε την πολύτιμη ξυλεία και τα άλλα δασικά προϊόντα για πολλά χρόνια, μέχρι να ξαναγίνει – αν ξαναγίνει – το δάσος όπως ήταν, πριν καεί. Δημιουργούνται διάφορα προβλήματα κοινωνικά, υγείας, εργασίας, αναψυχής κ.λ.π. Επιβαρύνεται η οικονομία με τις τεράστιες δαπάνες κατάσβεσης και τις ανυπολόγιστες επίσης δαπάνες που απαιτούνται για την αποκατάσταση των ζημιών – όσων είναι δυνατόν. Ασφαλώς η πρόληψη είναι ο καλύτερος τρόπος για την αντιμετώπιση του μεγαλύτερου κινδύνου που απειλεί τα δάση μας – των πυρκαγιών.



Σχήμα 1.2: Φωτιά σε δάσος, καταστροφικές η συνέπειές της για την ισορροπία του οικοσυστήματος.

Η Ελλάδα κάθε χρόνο πλήττεται από δεκάδες πύρινα μέτωπα με αποτέλεσμα την καταστροφή μεγάλου μέρους του εγχώριου δασικού πλούτου. Το καλοκαίρι του 2007, συνέβη μία από τις μεγαλύτερες φυσικές καταστροφές στην ιστορία της σύγχρονης Ελλάδας. Εκτεταμένες πυρκαγιές σε πολλά μέρη της χώρας, αλλά κυρίως στην Πελοπόννησο, έκαψαν μέσα σε λίγες μέρες περισσότερα από 1.772.654 στρέμματα δάσους και αγροτικών καλλιεργειών, κυρίως ελαιοδέντρων, με αποτέλεσμα το θάνατο 76 ανθρώπων (*Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης – WWF Hellas*).



Σχήμα 1.3: Δορυφορική φωτογραφία κατά τη διάρκεια των πυρκαγιών στην Πελοπόννησο τον Αύγουστο του 2007, απεικονίζει τα μέτωπα της φωτιάς (Πηγή NASA satellite images, <http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/view.php?id=18939>).

1.2. Μοντέλα περιγραφής εξάπλωσης φωτιάς

Είναι εύκολα κατανοητό ότι η ανάγκη για σχεδιασμό και ανάπτυξη επαρκών μεθόδων για την αντιμετώπιση των πυρκαγιών είναι συνεχώς αυξανόμενη, όσο τέτοια φαινόμενα εμφανίζονται συχνότερα. Η επεξεργασία παραγόντων όπως οι καιρικές και κλιματολογικές συνθήκες (άνεμος, υγρασία, θερμοκρασία), χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης (τύπος, κατανομή και πυκνότητα της βλάστησης), χαρακτηριστικά του εδάφους (κλίση και φυσικά σύνορα) καθώς και η ανθρώπινη παρέμβαση και δραστηριότητα αποτελούν το κλειδί για αυτή τη διαδικασία (Johnson, 1992; Fons, 1946; Albini & Brown, 1996; Flannigan & Wotton, 2001). Οι μέθοδοι για την καταστολή των πυρκαγιών μπορούν γενικά να κατηγοριοποιηθούν στις προληπτικές και στις πρακτικές επιχειρήσεις. Οι προληπτικές μέθοδοι έχουν στρατηγική σημασία, καθώς προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν την πιθανότητα έξαρσης μιας πυρκαγιάς, οργανώνοντας τα διαθέσιμα μέσα και δημιουργώντας αντιπυρικές ζώνες, ώστε να εμποδιστεί η εξάπλωση μιας πιθανής πυρκαγιάς. Όταν όμως μια φωτιά ξεσπάσει, χρειάζονται δραστικές επιχειρήσεις, μεγάλης τακτικής σημασίας, όπως είναι η επαρκής κατανομή των μηχανισμών άμυνας και γρήγορες εκκενώσεις οικισμών. Σε κάθε περίπτωση ο συνδυασμός στρατηγικής και τακτικής έχει πολλά να επωφεληθεί από τα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πρόβλεψη της χωροχρονικής εξάπλωσης της φωτιάς. Επιπλέον, τέτοιου είδους μοντέλα μπορούν να είναι πολύ χρήσιμα και σε περιπτώσεις ελεγχόμενων πυρκαγιών – οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά ως ένα σημαντικό εργαλείο διαχείρισης βοσκοτόπων, π.χ. στην Αυστραλία.

Είναι εύλογο επομένως πως ποικίλα μαθηματικά μοντέλα έχουν προταθεί για αυτό τον σκοπό, τα οποία μπορούν να χωριστούν βάσει των μεθόδων που χρησιμοποιούν σε τρεις κατηγορίες (Sullivan, 2009):

- Τα εμπειρικά και ημι-εμπειρικά μοντέλα: κάνουν χρήση κυρίως των στατιστικών αποτελεσμάτων από την ανάλυση πραγματικών συμβάντων. Μια μορφή γενικής φυσικής περιγραφής του προβλήματος

αρκεί ώστε να βασιστούν τα στατιστικά μοντέλα, χωρίς να μελετώνται πραιτέρω τα φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα.

- Τα μακροσκοπικά – αιτιοκρατικά (ντετερμινιστικά) μοντέλα: χρησιμοποιούν τεχνικές υπολογιστικής ρευστομηχανικής συνδυασμένες με αντίστοιχες για την μεταφορά θερμότητας στο σύστημα δάσος – φωτιά καθώς και για τις μεθόδους καύσης σε αυτό.
- Τα μικροσκοπικά μοντέλα: είναι μοντέλα σε μορφή πλέγματος όπου περιγράφουν το φαινόμενο σε διακριτό χρόνο χρησιμοποιώντας τοπικούς κανόνες εξέλιξης για τη διάδοση της φωτιάς στις γειτονικές περιοχές.

Σε καθεμία από αυτές τις τρεις κατηγορίες μοντέλων επιστήμονες από όλο τον κόσμο έχουν κάνει σημαντικές μελέτες, που έχουν ανοίξει δρόμους για την πρόβλεψη και αντιμετώπιση των πυρκαγιών.

Επικεφαλής της πρώτης κατηγορίας μοντέλων – (ημί)εμπειρικά – μπορεί αναμφίβολα να θεωρηθεί το περίφημο μοντέλο του Rothermel, όπου υπολογίζει το ποσοστό εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς βάσει στοιχείων από κατάλληλα σχεδιασμένα πειράματα (Rothermel, 1972; Rothermel, 1983). Περιλαμβάνει πλήθος χαρακτηριστικών από τα οποία εξαρτάται η διάδοση της φωτιάς, όπως το πεδίο του ανέμου – υπολογισμένο σε 2 διαστάσεις, η κλίση του εδάφους, η πυκνότητα και το είδος της βλάστησης. Μια επέκταση του μοντέλου του Rothermel πραγματοποιείται το 1991 όπου περιγράφεται ο ρυθμός της ραγδαίας εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς από κορυφή σε κορυφή ορεινού πεδίου συναρτήσεως του ρυθμού εξάπλωσής της σε επιφανειακές εκτάσεις. Δεδομένης της πληρότητάς του, το μοντέλο του Rothermel και η επέκτασή του έχουν χρησιμοποιηθεί από διάφορους οργανισμούς – όπως το Ελβετικό Εθνικό Πάρκο και Εθνικό Πυροσβεστικό Σώμα των Η.Π.Α. (Wagner, 1977; Wagner, 1997; Cruz, 2005). Τα εμπειρικά αποτελέσματα της δουλειάς του Rothermel ενσωματώνονται στο μοντέλο που προτείνεται από τους Letelier et al. (Letelier et al., 1988). Λαμβάνοντας επιπλέον υπ’ όψη το πεδίο του ανέμου και την κατανάλωση της καύσιμης ύλης, η εξέλιξη του μετώπου σε αυτό το μοντέλο φωτιάς περιγράφεται από ένα σύστημα μη γραμμικών συνήθων διαφορικών εξισώσεων. Στη συνέχεια πραγματοποιείται μια από τις πιο σημαντικές μελέτες στην πρόβλεψη της εξάπλωσης μιας φωτιάς από τους Stocks et al. (Stocks et al., 2004). Το συγκεκριμένο μοντέλο βασίζεται σε πειραματικές πυρκαγιές που πραγματοποιήθηκαν το διάστημα 1995-2001 στις βόρειες περιοχές του Καναδά. Στην ίδια βάση των πειραματικών πυρκαγιών βρίσκεται και η δουλειά των Catchpole et al. (Catchpole et al., 1998). Εδώ κατασκευάζεται ένα σύστημα από εμπειρικές εξισώσεις για την πρόβλεψη της εξάπλωσης πειραματικής φωτιάς σε χαμηλή – θαμνώδη βλάστηση στις περιοχές της Νέας Ζηλανδίας και της Αυστραλίας. Δεδομένα από την ανάλυση 64 πραγματικών συμβάντων σε θαμνώδεις εκτάσεις της Τανζανίας χρησιμοποιούνται στο μοντέλο που σχεδιάστηκε από τους Marsden-Smedley και Catchpole (Marsden-Smedley & Catchpole, 1995). Για την μεγαλύτερη ακρίβεια του μοντέλου οι ερευνητές χρησιμοποίησαν επιπλέον δεδομένα από 5 φωτιές σε δασικές εκτάσεις και το αποτέλεσμα δίνει πιο ολοκληρωμένα την πρόβλεψη για την επέκταση τελικά της φωτιάς. Παρόμοια ήταν και η διαδικασία ανάπτυξης ενός μαθηματικού μοντέλου για την πρόβλεψη της επέκτασης της φωτιάς σε ένα θαμνώδες επίπεδο περιβάλλον από

τον Fernandes (*Fernades, 2001*). Μετά από μια σειρά από πειράματα με εκδήλωση πυρκαγιάς σε τέσσερα διαφορετικά είδη θαμνώδους βλάστησης που εντοπίζονται στην Πορτογαλία, συμπεραίνεται ότι υπάρχει η δυνατότητα ακριβούς πρόβλεψης της διάδοσης της φωτιάς, γνωρίζοντας την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή, το ύψος της βλάστησης καθώς και τα ποσοστά υγρασίας της.

Όλες οι προηγούμενες εργασίες βασίζονται σε εμπειρικά μοντέλα, τα οποία όπως έχει αποδειχτεί είναι απλά στη χρήση, έχουν μικρό υπολογιστικό κόστος καθώς «τρέχουν» γρήγορα στους υπολογιστές χωρίς ιδιαίτερες προγραμματιστικές απαιτήσεις και δίνουν επαρκή αποτελέσματα πρόβλεψης της εξάπλωσης μιας φωτιάς κάτω από τους συγκεκριμένους περιορισμούς του εκάστοτε προβλήματος. Μπορούν όμως τα δεδομένα αυτά να γενικευτούν το ίδιο εύκολα σε οποιαδήποτε πραγματική φωτιά σε τυχαία περιοχή; Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι αρνητική. Τα εμπειρικά μοντέλα που βασίζονται σε εργαστηριακές προσομοιώσεις πυρκαγιών έχουν περιορισμένο εύρος περιπτώσεων που καλύπτουν. Το ίδιο συμβαίνει και σε αυτά που βασίζονται σε πειράματα που λαμβάνουν χώρα σε ανοιχτές περιορισμένες εκτάσεις – δεν μπορεί να προβλεφθεί από ένα τέτοιο μοντέλο η διαφορετικότητα της βλάστησης και οι ετερογένειες σε μια ορεινή ή βραχώδη περιοχή.

Ωστόσο η ανάγκη για μεγαλύτερη ακρίβεια στην πρόβλεψη επέκταση μιας φωτιάς σε οποιοδήποτε φυσικό περιβάλλον είναι γεγονός. Έτσι η επιστημονική έρευνα οδηγείται στην ανάπτυξη μακροσκοπικών – αιτιοκρατικών μοντέλων φωτιάς, τα οποία βασίζονται σε θεμελιώδεις αρχές. Τα μοντέλα αυτά έχουν στόχο να περιγράψουν την εξάπλωση της φωτιάς ως μια φυσική διεργασία, με βάση τις αρχές διατήρησης της ενέργειας, της μάζας και της ορμής. (*Sullivan, 2009; Pastor et al., 2003*). Πρωτοπόρος αυτών των προσπαθειών που ξεκινούν το 1926 γίνεται ο Hawley, με την μελέτη του στην ανάλυση των φυσικών μηχανισμών που εμπλέκονται στην εξάπλωση μιας πυρκαγιάς (*Hawley, 1926*). Είκοσι περίπου χρόνια αργότερα ο Fons παρουσιάζει το πρώτο μοντέλο διάδοσης φωτιάς όπου οι παράμετροί του δεν βασίζονται σε απλές παρατηρήσεις αλλά στα βασικά φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Αυτή η προσέγγιση μοντελοποίησης απαιτεί την περιγραφή περισσότερων χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την διάδοση της φωτιάς: των χημικών διεργασιών με βάση και τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης, της μεταφοράς θερμότητας, της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας της φλόγας, των αεροδυναμικών φαινομένων μέσα στο πεδίο φωτιάς (*Fons, 1946*). Μια πιο εμπειριστατωμένη μελέτη σχετικά με τη συσχέτιση του ποσοστού εξάπλωσης της φωτιάς με βάση τη διατήρηση της ενέργειας στο σύστημα δάσος – φωτιά πραγματοποιείται από τον Frandsen (*Frandsen, 1971*). Παρουσιάζονται οι μηχανισμοί με τους οποίους μεταφέρεται η θερμότητα στο σύστημα και προτείνεται μια θεωρητική προσέγγιση για την επίδραση του ανέμου. Ο Cekirge (*Cekirge, 1978*) αντιμετωπίζει το πρόβλημα της διάδοσης μιας πυρκαγιάς ως ένα κινούμενο πρόβλημα συνοριακών συνθηκών βασισμένο στην αρχή διατήρησης της ενέργειας. Επιπλέον εισάγεται για πρώτη φορά το χαρακτηριστικό της ακτινικής διάδοσης του μετώπου της φωτιάς. Αργότερα ο Grishin (*Grishin, 1984*) καθορίζει μια μεθοδολογία για τον υπολογισμό βασικών χαρακτηριστικών κοντά στο μέτωπο της φωτιάς – θερμοκρασία, ταχύτητα, πυκνότητα, πίεση – η οποία βασίζεται σε ένα μοντέλο τύρβης. Παράλληλα ο Albini (*Albini, 1985; Albini, 1986*) προτείνει ένα μοντέλο που ως κύριο μηχανισμό για την διάδοση της φωτιάς έχει την ακτινοβολία. Ο αλγόριθμος που εφαρμόζεται υπολογίζει τη θερμοκρασία της καύσιμης ύλης σε οποιοδήποτε σημείο της

φλεγόμενης περιοχής και δίνει το ποσοστό εξάπλωσης της φωτιάς καθώς και το σχήμα του μετώπου. Σημαντικό για την ακρίβεια του μοντέλου είναι ότι αυτά τα αποτελέσματα συμφωνούν με αντίστοιχες μετρήσεις από πυρκαγιές σε πειραματικό επίπεδο. Σε ίδια περίπου βάση κυμαίνεται και η εργασία του Weber (*Weber, 1989*) στην οποία προτείνει μια μονοδιάστατη μερική διαφορική εξίσωση στην οποία περιγράφεται το ποσοστό θερμότητας που απαιτείται να μεταφερθεί από μια περιοχή καύσης ώστε να έχουμε την ανάφλεξη μιας περιοχής βλάστησης – χωρίς να μελετάται η συμβολή του αέρα ως μέσο μεταφοράς θερμότητας. Στη συνέχεια ο Baines (*Baines, 1990*) μελετά τις φυσικές διεργασίες που επηρεάζουν την εξάπλωση της φωτιάς. Ερμηνεύει τα αποτελέσματα ενός πειράματος με βάση τη σχέση ισορροπίας μεταξύ της ακτινοβολίας θέρμανσης της φλόγας και της συναγωγής της θερμότητας (convective cooling) της μη φλεγόμενης βλάστησης. Η διάδοση της φωτιάς από το έδαφος προς την κορυφή της βλάστησης αλλά και κατά μήκος του πεδίου καύσης μοντελοποιείται από ένα απλό δισδιάστατο μοντέλο. Η μελέτη των Wattetal et al. (*Wattetal et al., 1995*) δείχνει πώς μπορεί ένα τέτοιο μοντέλο να απλοποιηθεί σε μονοδιάστατο ώστε να μπορεί και ευκολότερα να υπολογιστεί το πεδίο ταχύτητας του μετώπου της φωτιάς και πώς αυτό εξελίσσεται στον χρόνο. Εξελίσσοντας τις μέχρι τώρα προσεγγίσεις του προβλήματος, οι Larini et al. (*Larini et al., 1998*) εξετάζουν τις σχέσεις των φυσικών μηχανισμών της φωτιάς συναρτήσει της μεταφοράς μάζας, ενέργειας και ορμής στο σύστημα δάσος – φωτιά. Στο δισδιάστατο μοντέλο που αναπτύσσεται βασικοί παράγοντες που χρησιμοποιούνται για την μελέτη της διάδοσης της φωτιάς είναι οι φυσικο-χημικές διαδικασίες κατά την καύση (πχ πυρόλυση), οι μετεωρολογικές συνθήκες, η κλίση του εδάφους, τα χαρακτηριστικά της βλάστησης. Είναι προφανές πως εδώ η αριθμητική επίλυση των μη γραμμικών εξισώσεων του συστήματος συνεισφέρει κυρίως στην πρόληψη παρά στις επεμβατικές πρακτικές για την αντιμετώπιση μιας πυρκαγιάς. Αργότερα οι Morvan και Dupuy (*Morvan & Dupuy, 2001*) στο μοντέλο φωτιάς που κατασκευάζουν ενσωματώνουν τις μεταβολές την ενέργειας, της μάζας και της ορμής του συστήματος. Θεωρώντας ως επίπεδη την περιοχή μετάδοσης της φωτιάς, μοντελοποιούν τη μεταφορά θερμότητας από την ακτινοβολία της φλόγας και από τα άλλα προϊόντα της καύσης, προσομοιώνοντας τους μηχανισμούς αφυδάτωσης και την πυρόλυση της καύσιμης ύλης. Η θερμική ισορροπία του συστήματος είναι το βασικό χαρακτηριστικό στο μοντέλο των Morandini et al. (*Morandini et al., 2001*). Στο δισδιάστατο αυτό μοντέλο που λαμβάνει υπ’όψη την επίδραση του ανέμου και της κλίσης του εδάφους στην διαδικασία της μετάδοσης της φωτιάς, περιγράφονται οι θερμικές απώλειες στο πεδίο της καύσης, η μεταφορά θερμότητας σε αυτό μελετώντας την επίδραση της ακτινοβολίας της φλόγας. Οι Sèro-Guillaume και Margerit (*Sèro-Guillaume & Margerit, 2002*) δημιουργούν ένα τρισδιάστατο μοντέλο φωτιάς με βάση τους κύριους μηχανισμούς καύσης. Εδώ το δάσος χαρακτηρίζεται ως διφασικό γιατί τα υλικά καύσης βρίσκονται σε αέρια και στερεή κατάσταση. Έτσι το σύστημα δάσος – φωτιά αναπαρίσταται με ένα πλήρες σύνολο συζευγμένων μη-γραμμικών εξισώσεων. Απλοποιώντας μερικές αρχικές συνθήκες και κυρίως αν εισαχθεί ένας γενικευμένος και όχι τοπικός παράγοντας που να περιγράφει την μεταφορά θερμότητας λόγω της ακτινοβολίας, λαμβάνουμε την τρισδιάστατη εξίσωση διάχυσης για την διάδοση της φωτιάς. Λίγο αργότερα οι Asensio et al. (*Asensio et al., 2005*) παρατηρούν πως στη διαδικασία της επέκτασης μιας φωτιάς διακρίνονται σημαντικές διαφορές στο επίπεδο κίνησης της φωτιάς και στο επίπεδο

κίνησης του αέρα. Επομένως οδηγούνται στην προσέγγιση της ροής του αέρα με ένα τρισδιάστατο πεδίο ταχύτητας. Έτσι σε συνδυασμό με την προσομοίωση των υπόλοιπων παραγόντων που επηρεάζουν την εξάπλωση της φωτιάς δημιουργείται ένα ολοκληρωμένο μοντέλο πρόβλεψης. Οι Lin και Cunningham (*Lin & Cunningham, 2005*) μελετούν τη σύζευξη φωτιάς και ατμόσφαιρας. Ερευνώνται οι βασικές πλευρές της συμπεριφοράς της φωτιάς και κυρίως η εξάρτησή της από τον άνεμο και το αρχικό μήκος του μετώπου της. Το συγκεκριμένο μοντέλο που κατασκευάζεται βασίζεται σε μια πολύπλευρη προσέγγιση για την διάδοση της φωτιάς και προσομοιώνει τους φυσικούς νόμους που κυβερνούν το σύστημα – καύσης, ακτινοβολίας, μεταφοράς θερμότητας – συμπεριλαμβάνοντας παράγοντες όπως η κλίση του εδάφους και το είδος της καύσιμης ύλης.

Είναι σαφές πως αυτή η έρευνα και η μελέτη των μακροσκοπικών – αιτιοκρατικών μοντέλων οδήγησε στην ανάπτυξη των μεθόδων μοντελοποίησης καθώς ανέδειξε τους παράγοντες που επηρεάζουν την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς και τα χαρακτηριστικά τους. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας και της στοχαστικής φύσης τους προβλήματος, εγείρονται ερωτήματα σχετικά με την ακρίβεια πρόβλεψης που παρέχουν τα συγκεκριμένα μοντέλα. Επιπλέον, τα περισσότερα από αυτά τα μοντέλα έχουν υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, ειδικά για προσομοιώσεις μεγάλων περιοχών με ετερογενή χαρακτηριστικά. Ένα άλλο πολύ σημαντικό μειονέκτημα είναι η αδυναμία τους να ενσωματώσουν τις ανθρώπινες προσπάθειες κατάσβεσης μιας φωτιάς, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να εφαρμοστούν σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς καθώς ούτε και στον σχεδιασμό πολιτικών διαχείρισης κινδύνου.

Με την ανάπτυξη λοιπόν των μικροσκοπικών/στοχαστικών τεχνικών μοντελοποίησης γίνεται η προσπάθεια να καλυφθεί το κενό ανάμεσα στις δυο προηγούμενες κατηγορίες – αιτιοκρατικά και (ημί)εμπειρικά μοντέλα. Σε αυτή την περίπτωση μοντέλου η φυσική του προβλήματος ορίζεται σε μικροσκοπική κλίμακα. Προσεγγίζοντας με αυτόν τον τρόπο την πολύπλοκη και στοχαστική δυναμική των μηχανισμών εξάπλωσης της φωτιάς συμπεραίνουμε πως η συμπεριφορά της σε μακροσκοπικό επίπεδο είναι αποτέλεσμα των κανόνων λειτουργίας στο μικροσκοπικό/τοπικό επίπεδο. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της κατηγορίας μοντέλων είναι ότι έχουν πλατύ φάσμα δυνατοτήτων:

- συνδυάζουν τις θεωρητικές αρχές και τα εμπειρικά μοντέλα συμπεριφοράς πυρκαγιάς συμπεριλαμβάνοντας ποικίλα διαφορετικά χαρακτηριστικά καύσιμης ύλης αλλά και εδάφους,
- συνδυάζονται με Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS),
- δέχονται ως μεταβλητές μετεωρολογικά δεδομένα – ακόμη και σε πραγματικό χρόνο,
- εισάγουν και μελετούν σύνθετους μηχανισμούς μετάδοσης, όπως τυχαία φαινόμενα – κεραυνοί, εκρήξεις, φλεγόμενα αντικείμενα κτλ.
- χρησιμοποιούν ατομικούς χρονο-εξαρτώμενους κανόνες για την ένταση και το πεδίο του ανέμου και τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης.

Όπως ήταν αναμενόμενο, πολλές ερευνητικές προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη τέτοιων μικροσκοπικών μοντέλων για την πρόβλεψη της εξάπλωσης των πυρκαγιών. Ο κύριος εκπρόσωπος αυτής της ομάδας μοντέλων είναι τα Κυτταρικά Αυτόματα (*Neumann, 1966; Wolfram, 1984*). Στην έρευνά τους οι El Yacoubi και El Jai (*El Yacoubi & El Jai, 2002*) παρουσιάζουν ένα πλαίσιο για τη μοντελοποίηση περιβαλλοντικών συστημάτων μέσω των Κυτταρικών Αυτόματων. Δίνεται έτσι η δυνατότητα επιλογής παραμέτρων στο πρόβλημα και μελέτης της γεωγραφικής εξάπλωσης, γεγονός όπου προηγουμένως δεν ήταν εφικτό λόγω της δυσκολίας στην κατασκευή των αντίστοιχων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η μελέτη των Clar et al. (*Clar et al., 1997*) προτείνει ένα μοντέλο Κυτταρικού Αυτόματου με μη γραμμική συμπεριφορά και συμπεριλαμβάνει αλλαγές φάσεων από την προσπάθεια κατάσβεσης της φωτιάς και σχηματισμούς σπειροειδών κυμάτων και συσσωματωμάτων του πύρινου μετώπου. Ένα σύστημα μοντελοποίησης πυρκαγιάς για διάφορα είδη καύσιμης ύλης παρουσιάζεται από τους Green και Tridgell (*Green & Tridgell, 1990*). Το περιβάλλον του προβλήματος αναπαρίσταται ως ένα Κυτταρικό Αυτόματο (πλέγμα κελιών) και η φωτιά μοντελοποιείται ως επιδημική διαδικασία. Επιπλέον χρησιμοποιείται ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) για την εισαγωγή και επεξεργασία χαρτών από συμβατές πηγές, όπως οι ψηφιακές εικόνες δορυφόρου. Οι Karafyllidis και Thainailakis (*Karafyllidis & Thainailakis, 1997*) εισάγουν ένα μοντέλο κυτταρικού αυτόματου που μπορεί να προβλέψει την εξάπλωση τη φωτιάς σε ομογενή και ετερογενή περιβάλλοντα, συνδυάζοντας τις καιρικές συνθήκες και τη μορφολογία του εδάφους. Μια βελτίωση αυτού του μοντέλου παρουσιάζεται από τους Encinas et al. (*Encinas et al., 2007*) εισάγονται οι διαγώνιου γείτονες στη διαδικασία διάδοσης, κάνοντας το μοντέλο πιο ακριβές, δίνεται μια λεπτομερής μελέτη για το ρυθμό εξάπλωσης της φωτιάς. Μεγάλο πλήθος περιβαλλοντικών παραγόντων περιέχει το μοντέλο κυτταρικού αυτόματου που αναπτύσσουν οι Li και Magill (*Li & Magill, 2001*) : την πυκνότητα της βλάστησης, την τοπολογία του εδάφους, το πεδίο του ανέμου. Μια ενδιαφέρουσα προέκταση του μοντέλου των Karafyllidis και Thanailakis αποτελεί η δουλειά των Berjac και Hearne (*Berjac & Hearne, 2002*), η οποία προβλέπει τη διάδοση της φωτιάς σε ετερογενή περιβάλλοντα, τύπου Σαβάννα. Παράλληλα, από τους Yongzhong et al. (*Yongzhong et al., 2005*) προτείνεται μια προέκταση της δουλειάς του Rothermel σχετικά με τη συμπεριφορά του μετώπου της φωτιάς ως προς τις διαστάσεις και τη δυναμική της φωτιάς για την πρόβλεψη της εξέλιξης της πυρκαγιάς σε ετερογενή πεδία. Σε αυτή την κατεύθυνση, συνδυάζοντας τεχνικές κυτταρικών αυτόματων και γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, κινείται και η εργασία των Yasemi et al. (*Yasemi et al., 2008*). Αναπτύσσεται ένα μοντέλο προσομοίωσης της συμπεριφοράς της φωτιάς σε ένα περιβάλλον ευέλικτο και φιλικό προς το χρήστη, το οποίο δέχεται ως μεταβλητές τις τοπικές συνθήκες βλάστησης και καιρού καθώς και τη μορφολογία του εδάφους. Με αυτή την εργασία αναδεικνύονται οι μεγάλες δυνατότητες του συνδυασμού GIS και κυτταρικών αυτομάτων, για προσομοιώσεις πραγματικών συμβάντων φωτιάς καθώς και για την εικονική τους αναπαράσταση στο περιβάλλον του συστήματος των γεωγραφικών πληροφοριών. Μια διαφορετική προσέγγιση του ίδιου προβλήματος παρουσιάζεται από τους Vakakis et al. (*Vakalis et al., 2004*). Στόχος είναι η αντιμετώπιση των προβλημάτων που επιφέρουν οι μεγάλες δασικές πυρκαγιές. Έτσι αναπτύσσεται ένα νέο λειτουργικό σύστημα για τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών μεγάλης κλίμακας το οποίο συνδυάζει μεθόδους ασαφούς

λογικής (Fuzzy Logic), σε ένα περιβάλλον με μορφή πλέγματος, με τις πληροφορίες που παρέχουν τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών. Στην εργασία των Alexandridis et al. (Alexandridis et al., 2008) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός μοντέλου κυτταρικού αυτόματου που περιγράφει τη δυναμική της εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς σε ορεινό ετερογενές έδαφος, λαμβάνοντας υπ' όψη διάφορους παράγοντες που την επηρεάζουν, όπως το είδος και την πυκνότητα της βλάστησης, την ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου καθώς και τυχαία φαινόμενα που εμφανίζονται – όπως την εκτίναξη φλεγόμενων κουκουναριών στην περίπτωση του πευκοδάσους. Το συγκεκριμένο μοντέλο προσομοιώνει μια πραγματική περίπτωση πυρκαγιάς, στο νησί των Σπεισών, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων του με τα πραγματικά δεδομένα και ελέγχου της επάρκειάς τους. Λίγο αργότερα κι από τους ίδιους συγγραφείς (Alexandridis et al., 2011) δίνεται μια επέκταση του προηγούμενου μοντέλου, όπου πέρα από όλα τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά, γίνεται προσπάθεια για την μοντελοποίηση και των τακτικών καταστολής της πυρκαγιάς – τόσο των εναέριων επιχειρήσεων, με βάση τις τεχνικές δυνατότητες των αεροσκαφών που επιχειρούν και την ακτίνα κάλυψης των ρίψεων νερού, όσο και των επίγειων, βάσει του ποσοστού κάλυψης που παρέχουν στο πεδίο της φωτιάς.

Παρακολουθώντας επομένως την εξέλιξη των σχετικών μελετών, είναι εμφανές πως η έρευνα στο χώρο της φωτιάς σε παγκόσμιο επίπεδο έχει στρέψει όλη της την προσοχή και μελέτη στην πρόβλεψη της εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς καθώς και στους παράγοντες που την ευνοούν. Για τη διεξαγωγή της πλέον σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως συστήματα προσομοίωσης μέσω υπολογιστών, τα οποία εφαρμόζουν ευρύτατα τη μέθοδο των Κυτταρικών Αυτόματων (Cellular Automata). Αυτό συμβαίνει λόγω του ότι η μέθοδος αυτή μπορεί να αποφανθεί με σχετική ακρίβεια για την εξέλιξη μιας φωτιάς σε δάσος, το οποίο απεικονίζεται επακριβώς στον υπολογιστή, καθώς κατά την πραγματοποίηση της μελέτης της πρόβλεψης συνδυάζει διαφορετικές παραμέτρους. Επίσης, συνδυαστικά με αποτελέσματα πραγματικών πυρκαγιών, μπορεί να αξιοποιηθεί μελλοντικά με σκοπό την αποφυγή παγίδευσης ανθρώπων στο χώρο της φωτιάς. Από την άλλη, σε συνδυασμό με εργαστηριακές μετρήσεις έχει εφαρμοστεί για να επιβεβαιώσει το σχήμα της φωτιάς κατά την ανάπτυξή της.

Σε ορισμένες χώρες κατάλληλα υπολογιστικά συστήματα, συνδυάζοντας την πρόβλεψη με τη διάδοση της πυρκαγιάς τόσο σε επίπεδο εργαστηρίου όσο και κατά τη διάρκεια της φωτιάς, καταγράφουν το ανάγλυφο της γης μέσω του δορυφόρου, διαμορφώνουν υπολογιστικά προγράμματα τα οποία λαμβάνουν ως παραμέτρους τις μετρήσεις των κλιματολογικών χαρακτηριστικών της ευρύτερης περιοχής (θερμοκρασία, ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου) και εγκαθιστούν τέλος ειδικούς αισθητήρες, που – αν ξεσπάσει φωτιά – εκπέμπουν σήμα δηλώνοντας την κατεύθυνσή της. Η αξιοποίηση όλων αυτών των στοιχείων από κατάλληλα υπολογιστικά προγράμματα μας βοηθά προς τη μελέτη της πιθανής πορείας της φωτιάς, ώστε τελικά να αποφασιστεί το κατάλληλο σχέδιο κατάσβεσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Κυτταρικά Αυτόματα – Cellular Automata

2.1. Εισαγωγή

Τα κυτταρικά αυτόματα είναι μια δυναμική υπολογιστική μέθοδος, με αναδυόμενη πολυπλοκότητα, η οποία χρησιμοποιεί απλούς κανόνες που εφαρμόζονται κάνοντας χρήση μόνο τοπικών πληροφοριών. Πρόκειται για δομές που μοντελοποιούν τη συμπεριφορά καταναμημένων συστημάτων με συγκεκριμένη χωρική διάταξη. Ονομάζονται «κυτταρικά», επειδή είναι εμπνευσμένα από κυτταρικές διατάξεις, όπου κάθε κύτταρο αλληλεπιδρά με τα γειτονικά στο χώρο του και είναι «αυτόματα», επειδή η συμπεριφορά κάθε κυττάρου είναι πλήρως καθορισμένη από τους αντίστοιχους κανόνες, άρα αυτόματα. Τα κυτταρικά αυτόματα, λοιπόν, μπορούν να περιγραφούν ως διακριτά χωροχρονικά τοπικά συστήματα, στα οποία οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές.

Μελετώντας ένα κυτταρικό αυτόματο παρατηρούμε ότι δομείται βάσει 3 χαρακτηριστικών:

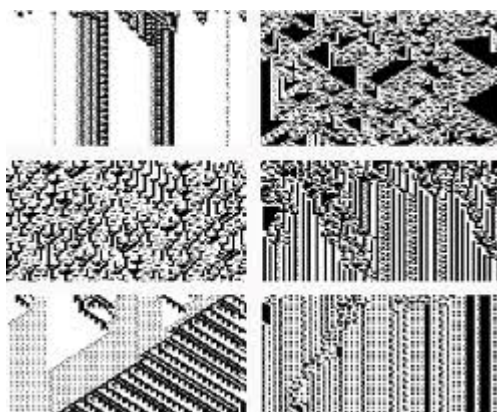
- το χρόνο
- το χώρο
- τους κανόνες που εφαρμόζονται.

Ο χρόνος είναι διακριτό μέγεθος, δηλαδή για κάθε χρονική στιγμή t ορίζεται η επόμενη $t+1$.

Ο χώρος αναπαρίσταται ως ένα πεπερασμένο πλέγμα κυττάρων-πίνακας κελιών. Κάθε κελί σε κάθε χρονική στιγμή βρίσκεται σε συγκεκριμένη κατάσταση, η οποία αλλάζει με το χρόνο και εξαρτάται από την κατάσταση τόσο των γειτονικών κελιών όσο και από του ίδιου την προηγούμενη χρονική στιγμή. Οι καταστάσεις των κελιών στην ουσία είναι διακριτές τιμές που αντιστοιχούν σε ένα πεπερασμένο σύνολο.

Οι κανόνες με τους οποίους μεταβάλλονται οι καταστάσεις των κελιών είναι τοπικοί και εξαρτώνται μόνο από ένα μικρό αριθμό γειτόνων. Οι κανόνες αυτοί καθορίζουν το πώς αλλάζει η κατάσταση ενός κελιού από τη μια χρονική στιγμή στην άλλη και καθορίζονται συναρτήσει της κατάστασης των γειτόνων του κελιού την προηγούμενη χρονική στιγμή. Αυτή η απλή δομή, όταν επαναλαμβάνεται,

δημιουργεί μια πιο σύνθετη συμπεριφορά των κελιών, η οποία στην πραγματικότητα παρατηρείται σε όλο το σύστημα.



Σχήμα 2. 1: Διάφοροι «τύποι» Κυτταρικών Αυτομάτων. «Τα Κυτταρικά Αυτόματα είναι αρκετά εύκολα, ώστε να επιδέχονται οποιαδήποτε λεπτομερή μαθηματική ανάλυση, αλλά και αρκετά περίπλοκα, ώστε να παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία περίπλοκων φαινομένων», Stephen Wolfram (1983) (Πηγή WolframMathWorld, <http://mathworld.wolfram.com/>).

2.2. Ιστορική αναδρομή

Η ιδέα των κυτταρικών αυτομάτων αναπτύχθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1950 από τους *John Von Neumann*, στο Πανεπιστήμιο του Πρίνστον (Princeton University), και *Stanislaw Ulam*, στα εργαστήρια του Λος Άλαμος (Los Alamos National Laboratory), οι οποίοι μελετούσαν την αλληλεπίδραση γειτονικών στοιχείων σε πλέγμα εφαρμόζοντας τοπικούς κανόνες. Ο Von Neumann απέδειξε ότι ένα κυτταρικό αυτόματο μπορεί να είναι καθολικό – να έχει δηλαδή γενική καθολική ισχύ για όλο το εξεταζόμενο σύστημα. Επινόησε ένα κυτταρικό αυτόματο, κάθε κελί του οποίου είχε 29 χωρικές καταστάσεις και απέδειξε ότι αυτό το κυτταρικό αυτόματο μπορεί να εκτελέσει οποιαδήποτε υπολογιστική λειτουργία. Ωστόσο, οι κανόνες του, λόγω της περιπλοκότητάς τους και της έλλειψης του απαραίτητου εξοπλισμού, δεν είχαν τη δυνατότητα να εφαρμοστούν ποτέ σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε να αποδειχθεί η καθολικότητά τους. Στη συνέχεια, βάσει της θεωρίας του Von Neumann, ερευνητές προσπάθησαν να αναπτύξουν απλούστερες και πιο πρακτικές δομές κυτταρικών αυτομάτων, οι οποίες να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μοντελοποίηση πολλών διαφορετικών εφαρμογών. Σε αυτή την κατεύθυνση υπάρχουν δύο αξιοσημείωτες ανακαλύψεις. Το 1970 ο μαθηματικός *John Conway*, στο Πανεπιστήμιο του Πρίνστον (Princeton University), πρότεινε το λεγόμενο «παιχνίδι της ζωής» (game of life), το οποίο δέχθηκε με εξαιρετικό ενδιαφέρον η επιστημονική κοινότητα. Στη συνέχεια, στις αρχές του 1980, ο *Stephen Wolfram* (μετέπειτα δημιουργός του μαθηματικού προγράμματος *Mathematica*) (<http://www.wolfram.com/mathematica/>) μελέτησε λεπτομερώς οικογένειες απλών μονοδιάστατων κυτταρικών αυτομάτων και διατύπωσε τους διάσημους «κανόνες

Wolfram», αποδεικνύοντας παράλληλα ότι ακόμη και αυτοί οι απλοί κανόνες είναι ικανοί να «μιμηθούν» σύνθετες συμπεριφορές.

2.3. Εφαρμογές και δυνατότητες

Τα κυτταρικά αυτόματα ως μέθοδος μοντελοποίησης έχουν χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιούνται από διάφορους κλάδους όλων των επιστημών.

Μια ευρέως διαδεδομένη εφαρμογή τους είναι η μοντελοποίηση πολλών διαφορετικών φυσικών συστημάτων. Η εξέλιξη στο χρόνο των φυσικών ποσοτήτων ενός συστήματος αναλύεται με τη βοήθεια μη γραμμικών μερικών διαφορικών εξισώσεων. Όμως λόγω της μη γραμμικότητας η επίλυση τέτοιων συστημάτων εξισώσεων είναι πολύ σύνθετη και συχνά οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα, ειδικά αν δεν οριστούν επαρκώς οι αρχικές συνθήκες που διέπουν το σύστημα. Από αυτή την άποψη τα κυτταρικά αυτόματα αποτελούν μια εναλλακτική προσέγγιση στη μελέτη της συμπεριφοράς δυναμικών συστημάτων. Αυτό συμβαίνει, καθώς χάρη στην απλότητά τους μπορούν να μελετηθούν και να αναλυθούν πολύ ευκολότερα σε σχέση με τις μερικές διαφορικές εξισώσεις. Επιπλέον, ένα πλεονέκτημα της μεθόδου σε σχέση με τις συνήθεις αλλά και τις μερικές διαφορικές εξισώσεις είναι η σταθερότητα της δυναμικής της – η πρόσθεση νέων χαρακτηριστικών ή αλληλεπιδράσεων δεν οδηγεί ποτέ σε αστάθεια. Οι ίδιες αρχές εφαρμόζονται επίσης και στις κοινωνικές επιστήμες για τη μοντελοποίηση κοινωνικών συστημάτων, λόγω χάρη για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατόμων μιας κοινωνίας.

Τέλος, σημαντική είναι η εφαρμογή των κυτταρικών αυτομάτων στη βιολογία καθώς και στην εμβιομηχανική: η ανάπτυξη και ο πολλαπλασιασμός των καρκινικών κυττάρων, η επέκταση μιας μόλυνσης στα ανθρώπινα κύτταρα, η αγγειολογική μελέτη και το κυκλοφορικό σύστημα, η κίνηση και καταπόνηση τενόντων και οστών προσομοιώνονται επιτυχώς με τη χρήση κυτταρικών αυτομάτων.

Σε κάθε περίπτωση συμπεραίνουμε πως το κύριο όφελος από την προσομοίωση των συστημάτων με τα κυτταρικά αυτόματα πηγάζει από την παρατήρηση του ότι μια πτυχή μόνο της αλληλεπίδρασης των ατόμων του συστήματος μπορεί να ενσωματωθεί στην προσομοίωση, χωρίς την ανάγκη εύρεσης μιας σύνθετης μαθηματικής έκφρασης που να περιγράφει επαρκώς πώς αυτή σχετίζεται με το σύστημα. Για την προσομοίωση όλου του συστήματος, δηλαδή, χρειάζεται να μοντελοποιηθούν μόνο οι αλληλεπιδράσεις των ατόμων μεταξύ τους και με το περιβάλλον.

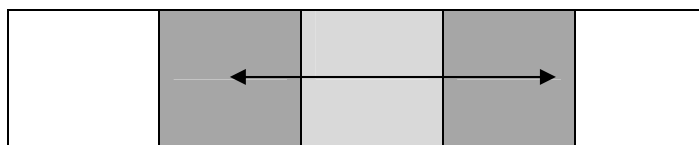
2.4. Ανάπτυξη και εφαρμογή της μεθόδου

Τα κυτταρικά αυτόματα συνήθως εφαρμόζονται σε ένα δισδιάστατο πλέγμα, αλλά μπορούν να έχουν οποιαδήποτε διάσταση.

Θα δούμε ειδικότερα τις περιπτώσεις της μίας και των δύο διαστάσεων.

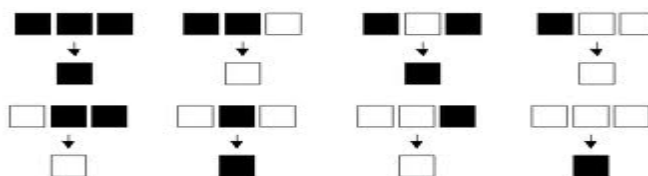
- 1 διάσταση:

εδώ έχουμε μια γραμμή από κελιά, το καθένα από τα οποία επικοινωνεί με τα δυο διπλανά του, δεξιά κι αριστερά.



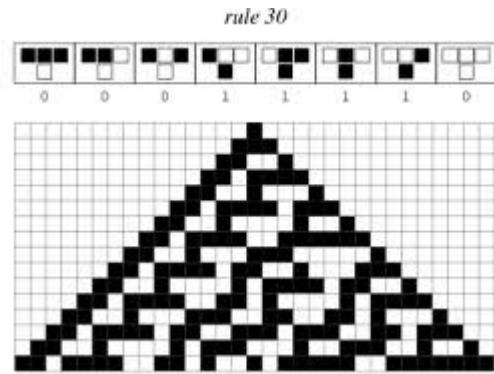
Σχήμα 2.2: Κυτταρικό Αυτόματο σε 1 διάσταση, γειτνίαση κελιών.

Κάθε κελί μπορεί να βρίσκεται σε μια από τις δύο καταστάσεις: «ενεργό» - κατάσταση «1» (μαύρο χρώμα), «ανενεργό» - κατάσταση «2» (λευκό χρώμα). Αν συμβολίσουμε με S_i^{t+1} την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το κελί την χρονική στιγμή t , τότε η κατάστασή του τη χρονική στιγμή $t+1$ δίνεται από μια συνάρτηση της μορφής: $S_i^{t+1} = F(S_{i-1}^t, S_{i+1}^t, S_i^t)$.



Σχήμα 2.3: Κυτταρικό Αυτόματο σε 1 διάσταση, περιπτώσεις μεταβολής του μεσαίου κελιού ανάλογα με την κατάσταση του ίδιου και των 2 γειτόνων του την προηγούμενη χρονική στιγμή.

Σε αυτή την περίπτωση ισχύει ο λεγόμενος «Κανόνας 30» του *Wolfram*. (*Stephen Wolfram, 1983*). Πρόκειται για 8 κανόνες οι οποίοι εφαρμόζονται αρχικά σε ένα μαύρο κελί το οποίο αλληλεπιδρά με τους δυο γείτονές του και εξελίσσεται στο χρόνο δημιουργώντας ένα αρκετά σύνθετο σχήμα με λευκά και μαύρα κελιά.

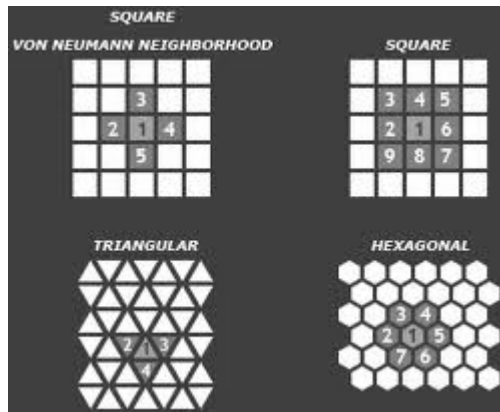


Σχήμα 2.4: Κυτταρικό αυτόματο σε 1 διάσταση, σχήμα από WolframMathworld, ο "Κανόνας 30".

-2 διαστάσεις:

αυτή η περίπτωση παρουσιάζει περισσότερο ενδιαφέρον στις εφαρμογές λόγω της διαφορετικότητας των γειτόνων, σε σχέση με την προηγούμενη. Εδώ κυριαρχούν δυο τύποι δισδιάστατου πλέγματος:

- 1) τετραγωνικό πλέγμα: κάθε στοιχείο-κελί συνορεύει με 4 γείτονες (δεξιά- αριστερά- πάνω- κάτω) ή με 8 (επιπλέον οι διαγώνιοι γείτονες).
- 2) εξαγωνικό πλέγμα: κάθε κελί έχει 6 γείτονες.



Σχήμα 2.5: Κυτταρικά Αυτόματα σε 2 διαστάσεις, τετραγωνικά (με 4 και με 8 γείτονες), τριγωνικό και εξαγωνικό (Πηγή: <http://mathworld.wolfram.com/CellularAutomaton.html>).

Στην πλειοψηφία των εφαρμογών χρησιμοποιούνται τα δισδιάστατα τετραγωνικά πλέγματα με 8 γείτονες, καθώς είναι ικανά να μοντελοποιήσουν απλούστερα πληθώρα συστημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Κυτταρικά Αυτόματα και μοντέλα επέκτασης φωτιάς

3.1. Εισαγωγή

Τα κυτταρικά αυτόματα έχουν αποδειχθεί ισχυρά στην πρόβλεψη της εξέλιξης σύνθετων συστημάτων, με απλούς κανόνες που εφαρμόζονται σε τοπικό επίπεδο. Επιπλέον, μπορούν εύκολα να συνδυαστούν με ψηφιακά δεδομένα γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών (GIS data) ή άλλες πηγές. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τα κυτταρικά αυτόματα ιδανικά στη μοντελοποίηση της σύνθετης συμπεριφοράς της επέκτασης πυρκαγιάς σε δάσος.

Σε ένα μοντέλο πρόβλεψης επέκτασης φωτιάς καθοριστικό ρόλο παίζει ο υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης της φωτιάς, καθώς και το σχήμα του μετώπου που δημιουργείται. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τόσο την ταχύτητα όσο και το σχήμα του μετώπου είναι εξωτερικοί, όπως οι περιβαλλοντικές και μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής, εδαφικά χαρακτηριστικά κ.ά. Πιο συγκεκριμένα, η επέκταση της πυρκαγιάς εξαρτάται από:

- το είδος της καύσιμης ύλης – το είδος της βλάστησης, καθώς δεν παρουσιάζουν την ίδια ευφλεκτότητα όλοι οι τύποι δέντρων. Για παράδειγμα, τα πεύκα σε σχέση με τις γεωργικές καλλιέργειες, όπως τα αμπέλια, παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στην ευκολία καύσης και στην μετάδοση της φωτιάς
- η υγρασία – όσο μεγαλύτερα τα ποσοστά υγρασίας σε μια περιοχή, τόσο πιο δύσκολη είναι εκεί η επέκταση της φωτιάς
- η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου
- η τοπολογία του εδάφους – δηλαδή, η κλίση του εδάφους και τα φυσικά σύνορα της περιοχής (σύνορα με πόλη, λίμνες, ποτάμια κλπ)
- τυχαία φαινόμενα στα οποία φλεγόμενα υλικά μεταφέρονται από τον αέρα, ή άλλο λόγο (π.χ. έκρηξη) – για παράδειγμα φλεγόμενα κουκουάρια – και δημιουργούν εστίες φωτιάς μακριά από το κυρίως μέτωπο.

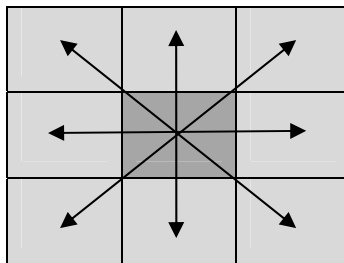
Μεταξύ όλων αυτών των παραγόντων υπάρχουν σύνθετες αλληλεπιδράσεις, συχνά ακόμη και δυσνόητες, γεγονός που κάνει τη μοντελοποίηση ενός τέτοιου προβλήματος μια επίπονη και περίπλοκη διαδικασία.

3.2. Το Κυτταρικό Αυτόματο στο σύστημα δάσος-φωτιά

Για τη μελέτη του μοντέλου επέκτασης πυρκαγιάς σε δάσος, πρέπει να προσδιοριστεί το περιβάλλον, οι μεταβλητές και οι κανόνες του προβλήματος.

- Το κυτταρικό αυτόματο:

Το περιβάλλον, το δάσος, είναι ένας επίπεδος πίνακας τετραγωνικών κελιών, διάστασης a , το καθένα από τα οποία έχει 8 γείτονες. Κάθε κελί αντιστοιχεί σε ένα μικρό τμήμα εδάφους και το τετραγωνικό σχήμα έχει επιλεγεί, γιατί προσφέρει 8 διαφορετικές πιθανές κατευθύνσεις διάδοσης της φωτιάς.



Σχήμα 3.1: Πιθανές κατευθύνσεις επέκτασης της φωτιάς στο διδιάστατο κυτταρικό αυτόματο με 8 γείτονες.

Είναι γεγονός πως αρκετοί ερευνητές χρησιμοποιούν μοντέλα με εξαγωνικό πλέγμα, καθώς είναι αδιαμφισβήτητο πως ένα τέτοιο πλέγμα μπορεί να περιγράψει με μεγαλύτερη ακρίβεια τη δυναμική της εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς. Ωστόσο, το κόστος στην πολυπλοκότητα του προγραμματισμού ενός τέτοιου μοντέλου είναι μεγάλο και υπερκαλύπτει το πιθανό όφελος σε ακρίβεια υπολογισμών, γι' αυτό και τα τετραγωνικά μοντέλα χρήζουν ευρείας αποδοχής.

- Η κατάσταση κάθε κελιού:

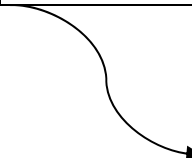
Κάθε κελί χαρακτηρίζεται από έναν ακέραιο αριθμό καταστάσεων, οι οποίες εξελίσσονται σε διακριτό χρόνο:

- i. Κατάσταση «2»: το κελί περιέχει δένδρο.
- ii. Κατάσταση «1»: το κελί περιέχει φλεγόμενο δένδρο.

- iii. Κατάσταση «0»: το κελί είναι κενό, είτε εξαρχής (ανάλογα με την πυκνότητα του δάσους), είτε γιατί στο κελί προϋπήρχε δένδρο που κάηκε.

Επομένως, δημιουργείται ένας «πίνακας κατάστασης», όπου κάθε στοιχείο του αντιστοιχεί σε μια κατάσταση των κελιών του πλέγματος.

Κατάσταση κενό (0)	Κατάσταση κενό (0)	Κατάσταση φλεγόμενο(1)	Κατάσταση δένδρο (2)
Κατάσταση κενό (0)	Κατάσταση φλεγόμενο(1)	Κατάσταση φλεγόμενο(1)	Κατάσταση δένδρο (2)
Κατάσταση φλεγόμενο(1)	Κατάσταση φλεγόμενο(1)	Κατάσταση δένδρο (2)	Κατάσταση δένδρο (2)
Κατάσταση δένδρο (2)	Κατάσταση δένδρο (2)	Κατάσταση δένδρο (2)	Κατάσταση κενό (0)



$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

Σχήμα 3.2: Πίνακας κατάστασης του κυτταρικού αυτόματου.

Η κατάσταση (S) ενός κελιού, λοιπόν, τη χρονική στιγμή $t+1$ εξαρτάται από την κατάσταση των γειτόνων του αλλά και του ίδιου την προηγούμενη χρονική στιγμή t . Επομένως, ο τοπικός κανόνας του κυτταρικού αυτόματου προσδιορίζεται από μια σχέση της μορφής:

$$S_{(i,j)}^{t+1} = f(S_{(i-1,j-1)}^t, S_{(i-1,j)}^t, S_{(i-1,j+1)}^t, S_{(i,j-1)}^t, S_{(i,j)}^t, S_{(i,j+1)}^t, S_{(i+1,j-1)}^t, S_{(i+1,j)}^t, S_{(i+1,j+1)}^t)$$

- Κανόνες εξέλιξης:

Κάθε χρονική στιγμή t της προσομοίωσης οι κανόνες του μοντέλου εφαρμόζονται στο στοιχείο (i, j) του πίνακα καταστάσεων – κι έτσι σε όλα τα κελιά. Οι κανόνες έχουν ως εξής:

- i. Κάθε κενό κελί παραμένει κενό και την επόμενη χρονική στιγμή, δηλαδή αν $S_{(i,j)}^t = 0$, τότε $S_{(i,j)}^{t+1} = 0$.
- ii. Κάθε κελί με φωτιά, φλεγόμενο δένδρο, την επόμενη χρονική στιγμή γίνεται κενό, δηλαδή αν $S_{(i,j)}^t = 1$, τότε $S_{(i,j)}^{t+1} = 0$.
- iii. Όταν ένα κελί καίγεται μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή t , τότε η φωτιά μπορεί να διαδοθεί στα γειτονικά κελιά την επόμενη χρονική στιγμή $t+1$ με πιθανότητα p , δηλαδή αν $S_{(i,j)}^t = 1$, τότε $S_{(i\pm 1, j\pm 1)}^{t+1} = 1$ με πιθανότητα p .

Η πιθανότητα p διάδοσης της φωτιάς σε γειτονικά κελιά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την εξάπλωση της φωτιάς. Οι αλληλεπιδράσεις αυτών των περιβαλλοντικών κυρίως παραγόντων περιγράφονται από ένα σύστημα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, το οποίο αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο της φωτιάς (μας δίνει το μέγιστο ποσοστό εξάπλωσης της φωτιάς και την κατεύθυνσή της).

3.3. Εφαρμογή Μοντέλων

Για τη μελέτη της διαδικασίας της επέκτασης μιας φωτιάς σε ένα δάσος και την επαρκή προσομοίωσή της έχουμε χρησιμοποιήσει 3 διαφορετικά μοντέλα. Τα δυο από αυτά σε εικονικό τετράγωνο δάσος και το ένα είναι εφαρμογή σε πραγματικές συνθήκες για το νησί των Σπετσών.

Αρχικά, το περιβάλλον μας αποτελείται από ένα επίπεδο, στοχαστικό κυτταρικό αυτόματο, διαστάσεων 200×200 με 8 γείτονες - εξαίρεση αποτελούν τα γωνιακά κελιά που έχουν 3 γείτονες καθώς και τα κελιά της πρώτης και τελευταίας γραμμής και της στήλης που έχουν 5 γείτονες. Εδώ τα δέντρα κατανέμονται τυχαία για συγκεκριμένη τιμή της πυκνότητας της βλάστησης και είναι όλα του ίδιου είδους. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η ομοιομορφία του περιβάλλοντος, καθώς όλα τα δένδρα έχουν την ίδια πιθανότητα να πάρουν φωτιά.

Οι καταστάσεις που μπορεί να πάρει κάθε κελί είναι τρεις και απεικονίζονται με τρία διαφορετικά χρώματα:

0 : το κύτταρο-κελί είναι κενό, δεν περιέχει δένδρο – **μαύρο χρώμα**

1 : το κύτταρο φλέγεται – **κόκκινο χρώμα**

2 : το κύτταρο περιέχει δένδρο – **πράσινο χρώμα**.

Οι τοπικοί κανόνες που ορίζουν τη διαδικασία μετάδοσης της φωτιάς από κελί σε κελί ανανεώνονται ταυτόχρονα σε όλα τα κελιά. Εδώ στην έννοια της πιθανότητας συμπεριλαμβάνονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν τις συνθήκες μετάδοσης της φωτιάς, και δεν είναι άλλες από τις συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας και ευφλεκτότητας του υλικού των δένδρων.

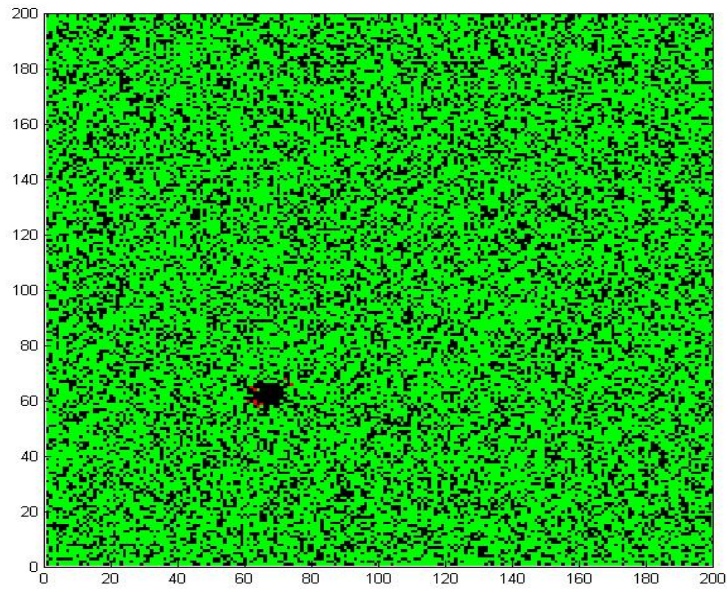
Έχοντας ορίσει, λοιπόν, πλήρως το περιβάλλον, τις μεταβλητές και τους κανόνες του προβλήματος, θα δούμε αναλυτικά 2 διαφορετικά μοντέλα για την προσομοίωσή του.

3.3.1. Ένα Μοντέλο Κυτταρικού Αυτόματου για τη μετάδοση της Φωτιάς με αλληλεπίδραση «στοιχείου» προς «στοιχείο»: από τους μικροσκοπικούς κανόνες στην πολύπλοκη μακροσκοπική συμπεριφορά

Θα περιγράψουμε ένα μοντέλο προσομοίωσης της επέκτασης της φωτιάς σε ένα δάσος στο οποίο θεωρούμε την άμεση αλληλεπίδραση ενός κελιού με τα γειτονικά του. Το μοντέλο περιγράφεται ως εξής:

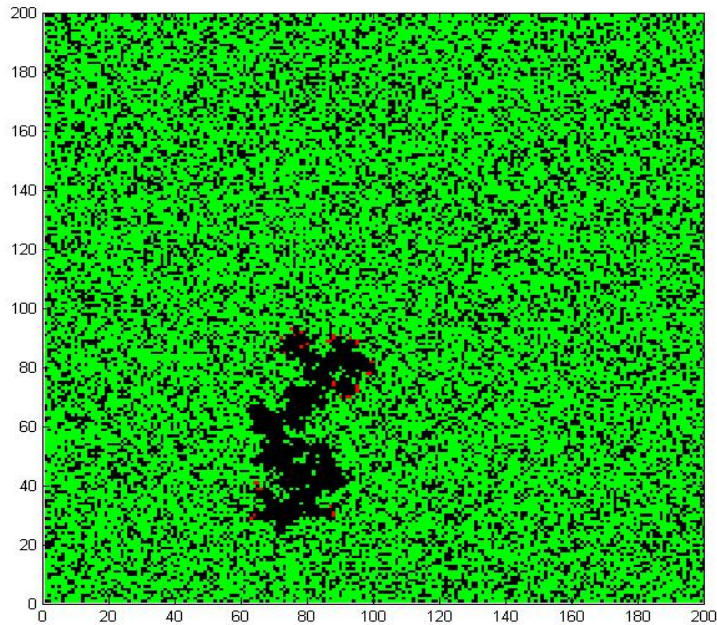
- i. Ένα δέντρο που καίγεται (κατάσταση «1») τη χρονική στιγμή t , μεταδίδει τη φωτιά σε ένα γειτονικό του δέντρο (κατάσταση «2») με πιθανότητα p , $p \in [0,1]$ την επόμενη χρονική στιγμή, $t+1$. Η τιμή της πιθανότητας εκφράζει τη δυνατότητα επέκτασης της φωτιάς στα γειτονικά κελιά και εξαρτάται από τις προαναφερθείσες συνθήκες μετάδοσης.
- ii. Ένα δέντρο που καίγεται (κατάσταση «1») τη χρονική στιγμή t , γίνεται κενό την επόμενη χρονική στιγμή $t+1$.

Παρακάτω μπορούμε να δούμε την απεικόνιση του κυτταρικού αυτόματου σε διάφορες φάσεις εξέλιξης του μοντέλου, για μια σταθερή πυκνότητα δάσους στο 70%. Με πράσινο χρώμα έχουμε την απεικόνιση των δένδρων του δάσους και με μαύρο τα κενά κελιά που υπάρχουν, δεδομένης της πυκνότητάς του. Καταρχάς, αρχικοποιούμε μια περιοχή όπου τα κύτταρα καίγονται, έτσι δημιουργούμε το αρχικό μέτωπο της φωτιάς (Σχήμα 3.3). Με κόκκινο χρώμα βλέπουμε τα κύτταρα που φλέγονται τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή.



Σχήμα 3.3: Αρχικοποίηση καμένης περιοχής – έναρξη φωτιάς.

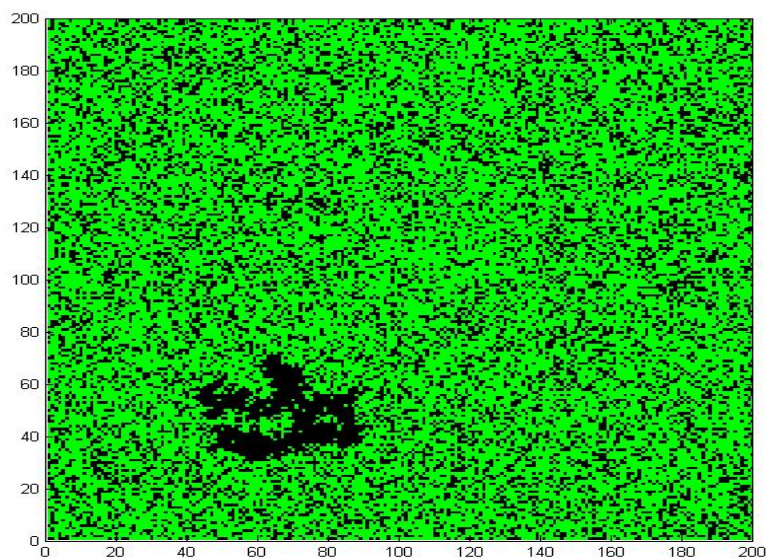
Στη συνέχεια η φωτιά εξελίσσεται στο χρόνο (Σχήμα 3.4). Μεταδίδεται από κελί σε κελί, με πιθανότητα p , εφόσον υπάρχει σε γειτονικό κελί του φλεγόμενο δένδρο. Τα κύτταρα με φωτιά, την επόμενη χρονική στιγμή γίνονται κενά.



Σχήμα 3.4: Διάδοση της φωτιάς σε εξέλιξη.

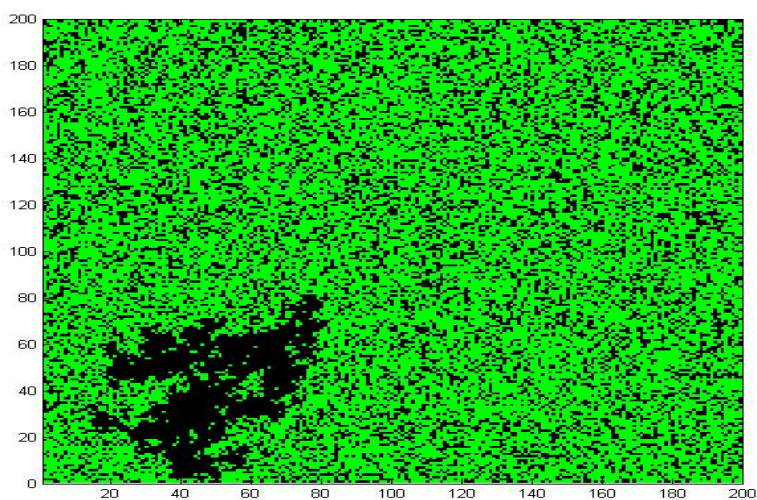
Για διαφορετικές τιμές της πιθανότητας επέκτασης καίγεται τελικά διαφορετικό ποσοστό του δάσους. Στα επόμενα απεικονίζονται μερικές περιπτώσεις.

Όταν η τιμή της πιθανότητας γίνει $p = 0.35$, παρατηρούμε πως η τελικώς καμένη έκταση είναι μικρή και περιορισμένη γύρω από το αρχικό μας μέτωπο, έχοντας κάψει ελάχιστο αριθμό κελιών (Σχήμα 3.5).



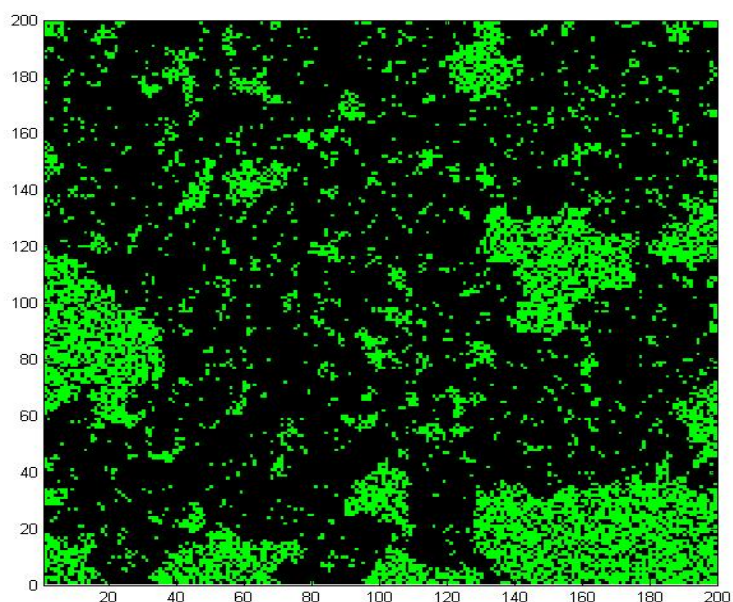
Σχήμα 3.5: Τελικά καμένη έκταση δάσους για πιθανότητα επέκτασης $p = 0.35$.

Για πιθανότητα επέκτασης $p = 0.40$, η καμένη περιοχή είναι ελάχιστα μεγαλύτερη από την προηγούμενη περίπτωση, αφήνοντας ανέπαφο το σύνολο του δάσους (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Τελικά καμένη έκταση δάσους για πιθανότητα επέκτασης $p = 0.40$.

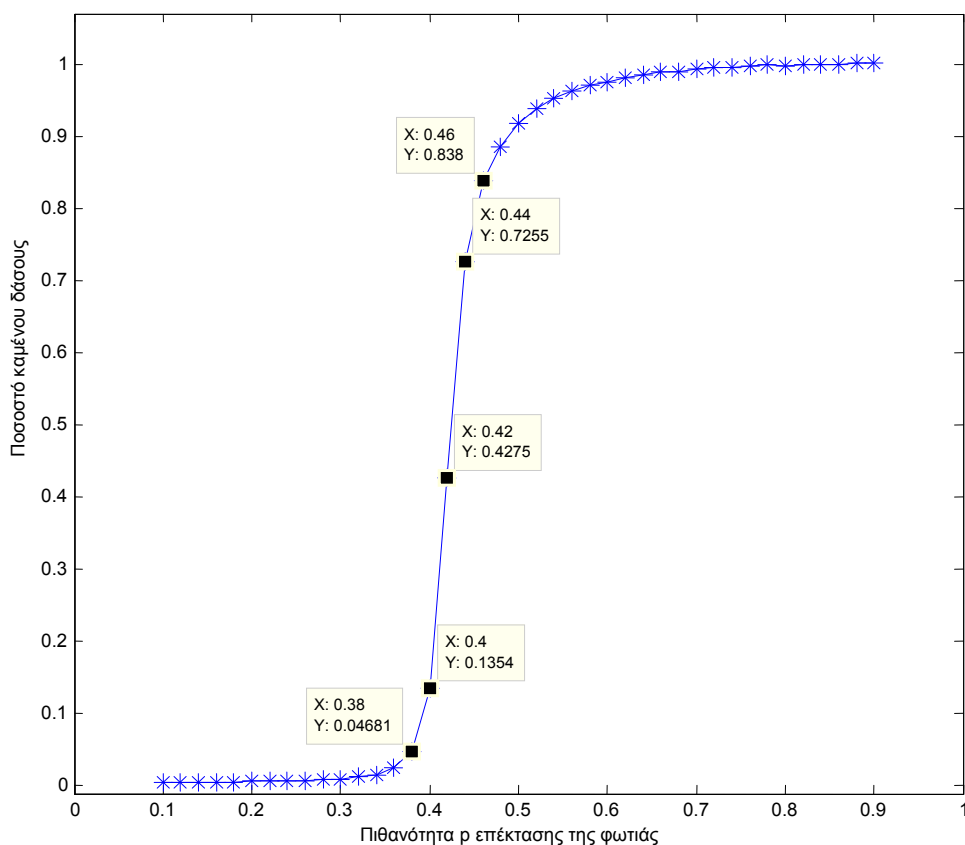
Χαρακτηριστική ως προς τη μελέτη του μοντέλου είναι η επόμενη εικόνα (Σχήμα 3.7). Για μικρή αύξηση της πιθανότητας σε σχέση με την προηγούμενη, στο $p = 0.44$, βλέπουμε πως η φωτιά επεκτείνεται σε όλο το δάσος, αφήνοντας πίσω της ελάχιστα κελιά με δένδρα.



Σχήμα 3.7: Τελικά καμένη έκταση δάσους για πιθανότητα επέκτασης $p = 0.44$.

Για να κατανοήσουμε καλύτερα αυτή τη συμπεριφορά του μοντέλου, μελετούμε τις σχέσεις που συνδέουν τις μεταβλητές του.

Στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 3.8 και Σχήμα 3.9) απεικονίζουμε το ποσοστό του καμένου δάσους ως συνάρτηση της πιθανότητας μετάδοσης της φωτιάς. Για κάθε τιμή της πιθανότητας μετάδοσης p , $p \in [0,1]$ πήραμε το μέσο όρο από 100 επαναλήψεις για διαφορετικές αρχικές καταστάσεις του δάσους, ώστε να έχουμε μια κανονικοποίηση της τελικά καμένης έκτασης.



Σχήμα 3.8: Γραφική παράσταση του ποσοστού του καμένου δάσους συναρτήσει της πιθανότητας επέκτασης της φωτιάς (για σταθερή πυκνότητα δάσους $d = 70\%$)

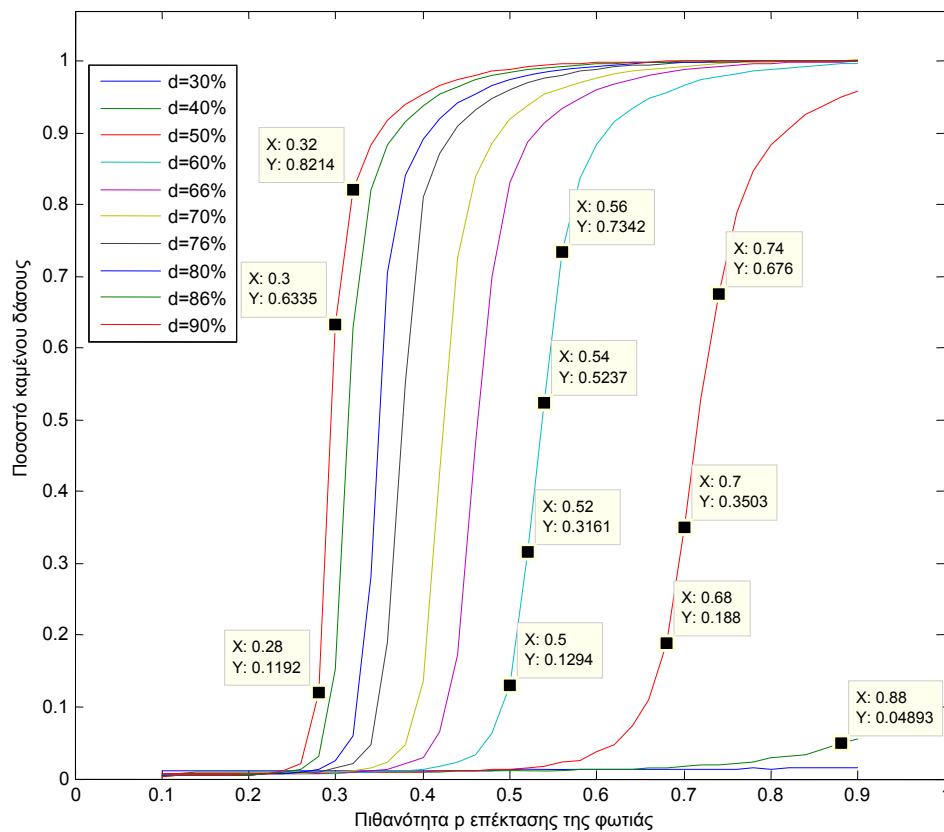
Σε αυτό το γράφημα (Σχήμα 3.8) αναπαρίσταται η σχέση μεταξύ πιθανότητας επέκτασης και καμένου δάσους, για μια σταθερή πυκνότητα του δάσους, στο $d = 70\%$, σε σχέση με τη συνολική επιφάνειά του.

Για μικρές τιμές της πιθανότητας, από $p = 0.10$ μέχρι $p = 0.40$, δεν παρατηρούνται σημαντικές μεταβολές στο ποσοστό του καμένου δάσους και μάλιστα αυτό διατηρείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, μικρότερα του 10% της αρχικής επιφάνειας δάσους.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται για τιμές της πιθανότητας από $p = 0.40$ έως $p = 0.46$. Εδώ, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα (Σχήμα 3.8), πραγματοποιείται μεγάλη μεταβολή, με αποτέλεσμα τη ραγδαία αύξηση της καμένης περιοχής. Υπάρχει, λοιπόν, μια κρίσιμη τιμή της πιθανότητας, p_{cr} , στην οποία παρατηρείται αλλαγή κατάστασης του συστήματος δάσους-φωτιάς, με αποτέλεσμα η φωτιά να εξαπλώνεται σε όλο το δάσος. Όπως παρατηρούμε και στο διάγραμμα, για πιθανότητα $p = 0.40$ η φωτιά έχει επεκταθεί σε λιγότερο από το 20% του δάσους ενώ για τιμή της πιθανότητας $p = 0.42$ καίγεται σχεδόν το 50% της δασικής έκτασης

και στο $p = 0.44$ έχουμε την καταστροφή περίπου του 80%. Είναι εμφανές, λοιπόν, ότι λόγω της μη γραμμικότητας του μοντέλου παρατηρείται η συγκεκριμένη συμπεριφορά, η αλλαγή κατάστασης του συστήματος (Phase Transition). Δηλαδή για μια σταθερή κατανομή δάσους το εάν η φωτιά θα εξαπλωθεί σε όλη την έκτασή του εξαρτάται από το εάν η πιθανότητα διάδοσής της θα φτάσει και θα ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή p_{cr} .

Στο παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.9) παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου για διαφορετικές τιμές της αρχικής πυκνότητας δάσους. Η πυκνότητα παίρνει τιμές $d \in [0,1]$, από αραιή σε πυκνή βλάστηση, και για καθεμιά από αυτές εφαρμόζουμε το μοντέλο με διαφορετικές τιμές της πιθανότητας μετάδοσης της φωτιάς $p, p \in [0,1]$, όπως προηγουμένως.



Σχήμα 3.9: Ποσοστό καμένου δάσους συναρτήσει της πιθανότητας p επέκτασης της φωτιάς.

Σε αυτό το γράφημα παρατηρείται μια μετατόπιση της γραφικής παράστασης της μη γραμμικής συνάρτησης, ανάλογα με την πυκνότητα του δάσους. Αυτό που φαίνεται να έχει ιδιαίτερη σημασία είναι η σχέση πυκνότητας – πιθανότητας, που παρατηρείται συγκρίνοντας τις γραφικές παραστάσεις. Όσο αυξάνεται η τιμή της πυκνότητας του δάσους, η ραγδαία μεταβολή στο ποσοστό της καμένης περιοχής του

πραγματοποιείται για όλο και μικρότερη τιμή της πιθανότητας διάδοσης της φωτιάς. Σε κάθε διαφορετική τιμή της πυκνότητας, δηλαδή, αντιστοιχεί και διαφορετική κρίσιμη τιμή της πιθανότητας, και μάλιστα όσο αυξάνεται η πυκνότητα, μικραίνει αυτή η κρίσιμη τιμή. Συγκεκριμένα, ισχύει ότι για πυκνότητα δάσους $d = 50\%$ η κρίσιμη τιμή της πιθανότητας είναι $p_{cr} \approx 0.70$, για πυκνότητα $d = 60\%$ γίνεται $p_{cr} \approx 0.52$, για $d = 70\%$ -όπως είδαμε και προηγουμένως- είναι $p_{cr} \approx 0.42$ και για $d = 80\%$ και $d = 90\%$ είναι $p_{cr} \approx 0.36$ και $p_{cr} \approx 0.29$ αντίστοιχα.

Χρήσιμα είναι τα συμπεράσματα που μπορούμε, επομένως, να εξάγουμε από τις παραπάνω παρατηρήσεις σε σχέση τόσο με τη συνάρτηση πυκνότητας - πιθανότητας στην επέκταση της πυρκαγιάς, όσο και γενικά για την όλη συμπεριφορά της διάδοσης της φωτιάς. Η μη γραμμικότητα χαρακτηρίζει το μοντέλο, ανεξάρτητα από την πυκνότητα του δάσους. Σε οποιαδήποτε τιμή της, δηλαδή, υπάρχει μια τιμή της πιθανότητας (p_{cr}), από την οποία κι έπειτα για ελάχιστη αύξηση της πιθανότητας, η φωτιά εξαπλώνεται στο σύνολο του δάσους. Η κρίσιμη αυτή τιμή εξαρτάται από την πυκνότητα, από την οποία μεταβάλλεται αντίστροφα: για αύξηση της d μειώνεται η p_{cr} . Τέλος, μπορούμε να πούμε ότι για μικρές τιμές της πιθανότητας επέκτασης της φωτιάς (μικρότερες του $p = 0.20$) όσο πυκνή και να είναι η κατανομή του δάσους, η φωτιά θα παραμείνει σε τοπικό επίπεδο και δε θα επηρεάσει το σύνολο του δάσους.

3.2.2. Ένα Μοντέλο Κυτταρικού Αυτόματου για τη μετάδοση της φωτιάς με μη γραμμική αλληλεπίδραση των στοιχείων

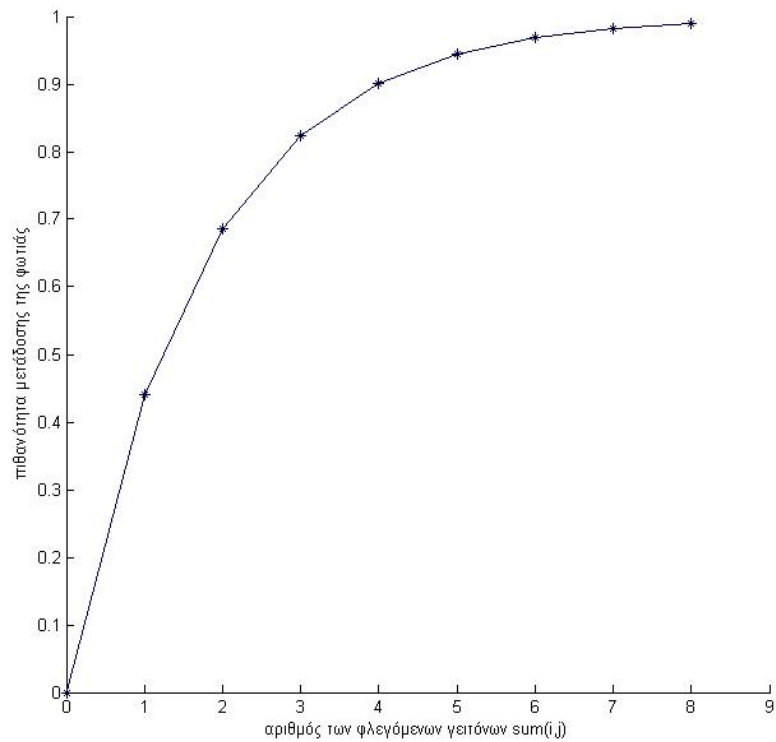
Στο μη γραμμικό μοντέλο επέκτασης της φωτιάς η κατάσταση κάθε κελιού υπολογίζεται από τη μη γραμμική σχέση:

$$y = 1 - (1 - p)^{sum(i, j)}$$

όπου p : η πιθανότητα επέκτασης, με $p \in [0,1]$

$sum(i, j)$: το άθροισμα των φλεγόμενων γειτόνων του κελιού (i, j) , με $sum(i, j) \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$.

Η παραπάνω εξίσωση απεικονίζεται γραφικά στο Σχήμα 3.10, όπου παρατηρούμε τη μη γραμμικότητα της σχέσης.

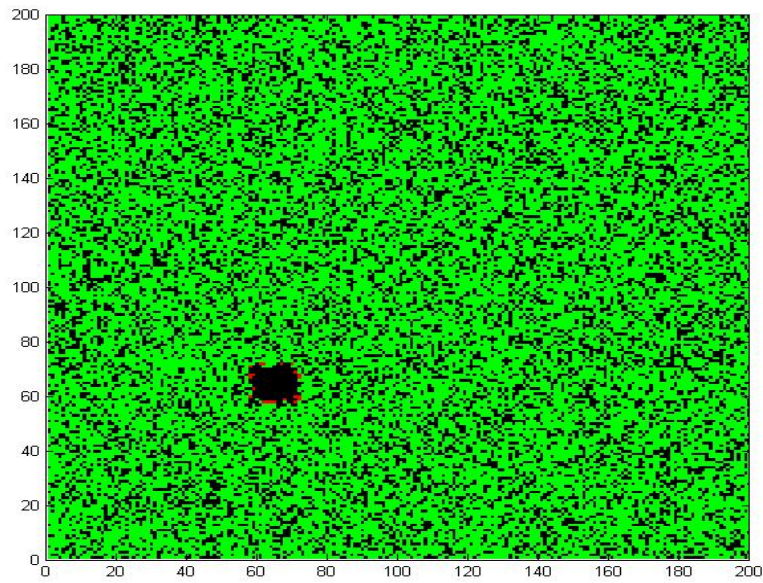


Σχήμα 3.10: Γραφική παράσταση της σχέσης $y = 1 - (1 - p)^{sum(i,j)}$ της μη γραμμικής εξίσωσης για μια σταθερή πιθανότητα διάδοσης $p = 0.44$ και $sum(i,j) \in \{0,1,2,3,4,5,6,7,8\}$.

Ο κανόνας λειτουργεί «παράλληλα», κάτι που σημαίνει πως για κάθε κελί εξετάζει ταυτόχρονα την κατάσταση των γειτόνων του, αθροίζει τους φλεγόμενους γείτονες και, αν το κελί έχει δένδρο, η κατάστασή του αλλάζει με πιθανότητα p , η οποία εξαρτάται από την παραπάνω μη γραμμική σχέση.

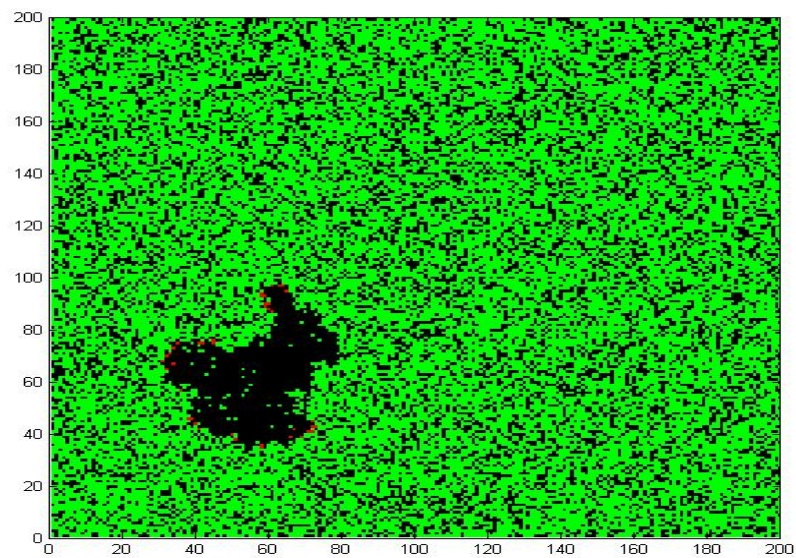
Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να δούμε την εξέλιξη του μοντέλου στο κυτταρικό αυτόματο.

Όμοια με το προηγούμενο μοντέλο, αρχικοποιούμε μια περιοχή φωτιάς για σταθερή πυκνότητα δάσους $d = 70\%$ (Σχήμα 3.11).



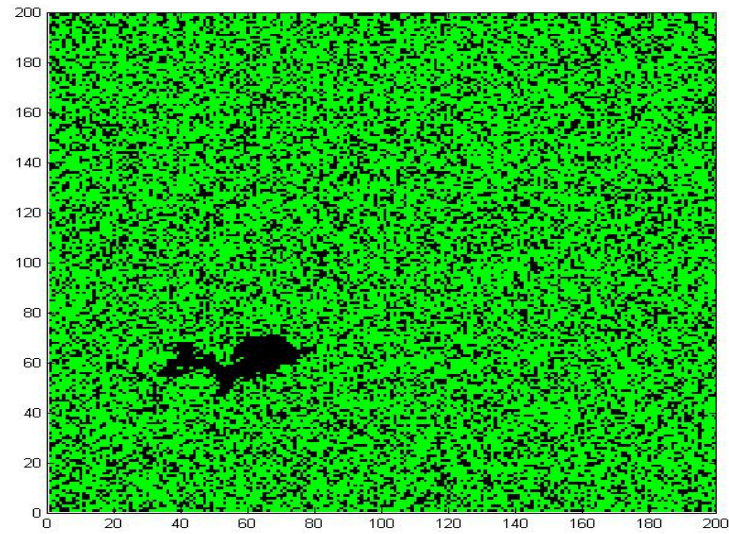
Σχήμα 3.11: Απεικόνιση δάσους πυκνότητας $d = 70\%$ κατά την έναρξη της φωτιάς.

Η φωτιά διαδίδεται και το μέτωπο εξελίσσεται στο χρόνο, δίνοντας τελικά ένα σχήμα για την καμένη περιοχή, ανάλογα με την πιθανότητα διάδοσης της φωτιάς (Σχήμα 3.12).



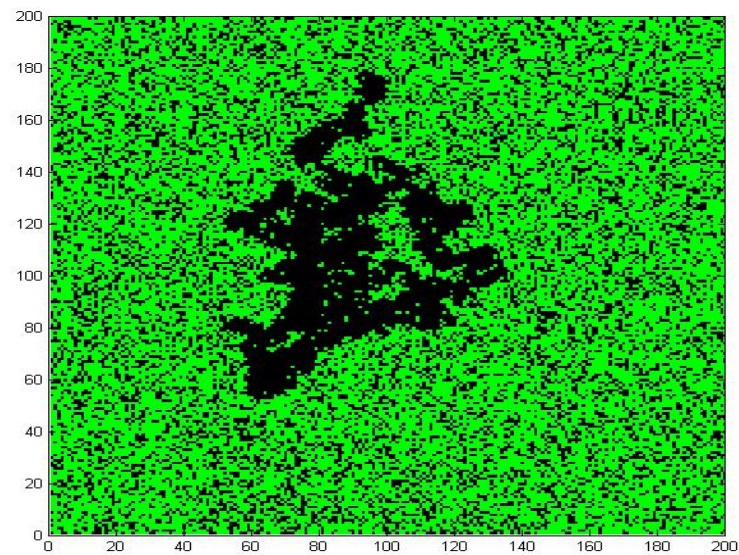
Σχήμα 3.12: Διάδοση της φωτιάς σε εξέλιξη.

Με δεδομένη τιμή της πιθανότητας την $p = 0.35$, η καμένη περιοχή παίρνει το σχήμα της παρακάτω εικόνας (Σχήμα 3.13), εντοπισμένη σε μικρή έκταση του δάσους.



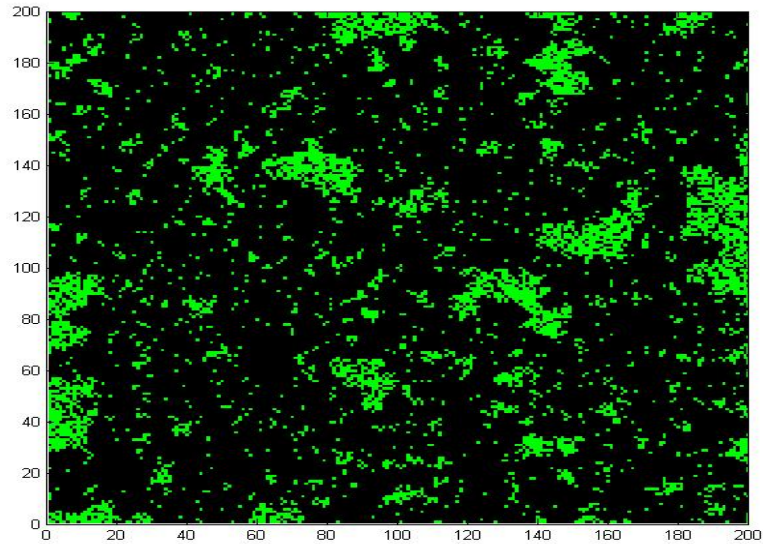
Σχήμα 3.13: Απεικόνιση καμένης έκτασης δάσους για πιθανότητα μετάδοσης φωτιάς $p = 0.35$.

Για $p = 0.40$, η φωτιά επεκτείνεται σε μεγαλύτερο μέρος της δασικής περιοχής καίγοντας περισσότερα κύτταρα σε σχέση με πριν (Σχήμα 3.14), αλλά και πάλι σε περιορισμένο ποσοστό του δάσους.



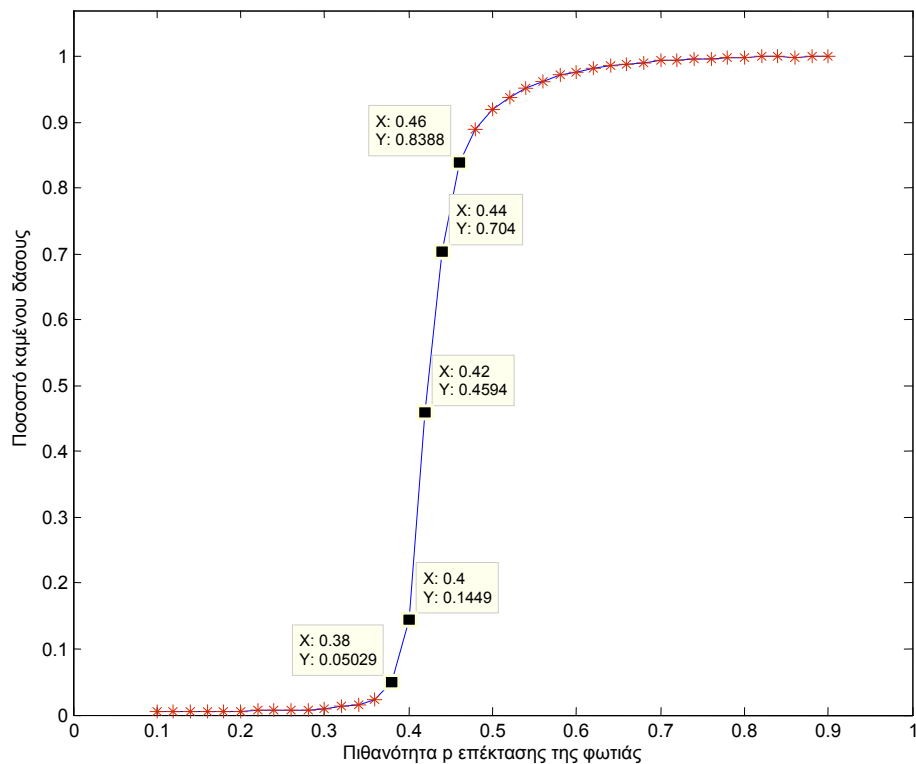
Σχήμα 3.14: Απεικόνιση καμένης έκτασης δάσους για πιθανότητα μετάδοσης φωτιάς $p = 0.40$.

Και σε αυτή την περίπτωση μοντέλου, όπως είναι εμφανές στην επόμενη εικόνα (Σχήμα 3.15), αυξάνοντας την τιμή της πιθανότητας ελάχιστα, στο $p = 0.45$, το δάσος καίγεται ολοσχερώς.



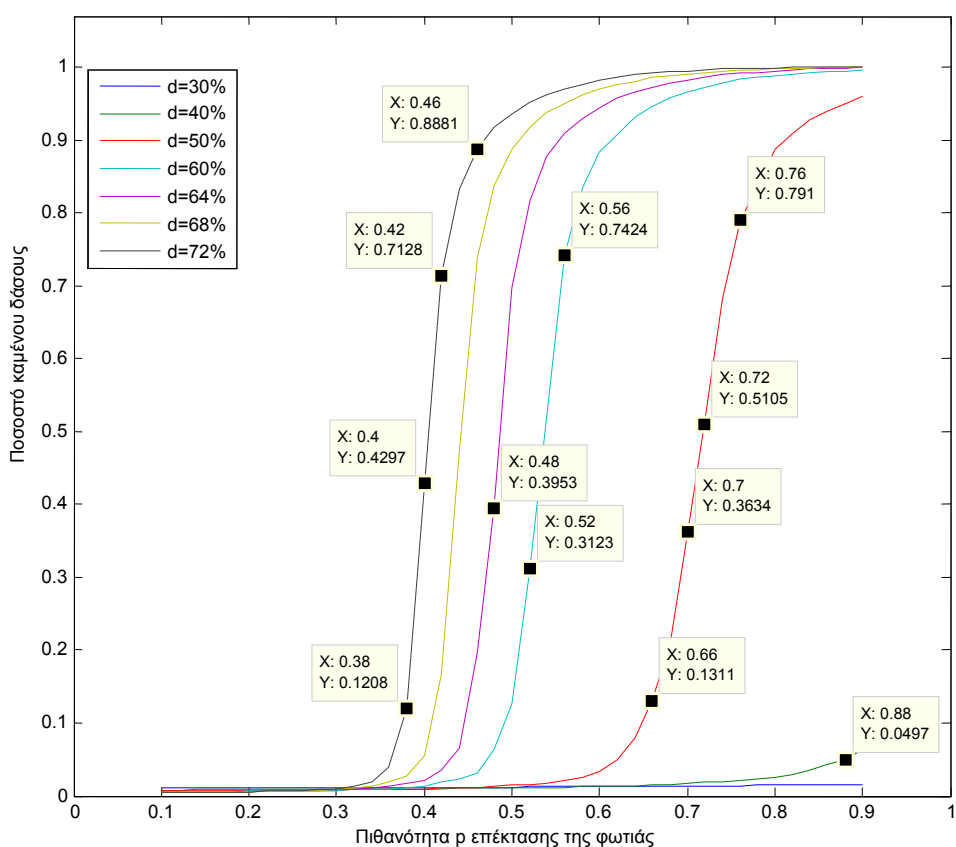
Σχήμα 3.15: Απεικόνιση καμένης έκτασης δάσους για πιθανότητα μετάδοσης φωτιάς $p = 0.45$.

Ας δούμε πιο αναλυτικά τη συμπεριφορά του μοντέλου, εξετάζοντας κι εδώ τις σχέσεις των μεταβλητών του.



Σχήμα 3.16: Γραφική παράσταση του ποσοστού του καμένου δάσους συναρτήσει της πιθανότητας p επέκτασης της φωτιάς.

Εδώ έχουμε τη γραφική απεικόνιση της σχέσης μεταξύ της πιθανότητας επέκτασης και του ποσοστού του τελικά καμένου δάσους (Σχήμα 3.16), ξανά για μια σταθερή πυκνότητα δάσους, στο 70%, έχοντας κρατήσει τον μέσο όρο της πιθανότητας ύστερα από 100 επαναλήψεις για διαφορετικές αρχικές καταστάσεις. Είναι χαρακτηριστική η μη γραμμικότητα του μοντέλου. Αν το δούμε πιο αναλυτικά, και σε αυτή την περίπτωση μοντέλου για μικρές τιμές της πιθανότητας από $p = 0.10$ έως $p = 0.40$ δεν πραγματοποιείται κάποια ιδιαίτερη μεταβολή και η φωτιά καλύπτει τελικά μια συγκεκριμένη μικρή περιοχή του δάσους, γύρω από το αρχικό μέτωπο, σε ποσοστό λιγότερο από το 20% του δάσους. Αντίθετα, όταν η πιθανότητα αυξηθεί ελάχιστα από το $p = 0.40$ κι έπειτα έχουμε αλλαγή κατάστασης του συστήματος (Phase Transition), με αποτέλεσμα την ραγδαία αύξηση της μετάδοσης της φωτιάς και μάλιστα υπάρχει μια τιμή της, κρίσιμη τιμή p_{cr} , για την οποία η φωτιά εξαπλώνεται τελικά σε όλο το δάσος.



Σχήμα 3.17: Γραφική παράσταση ποσοστού καμένου δάσους συναρτήσει της πιθανότητας p επέκτασης της φωτιάς, για διαφορετικές τιμές της πυκνότητας δάσους d

Όπως και προηγουμένως, έχουμε εφαρμόσει το μοντέλο, με τιμές της πιθανότητας $p, p \in [0,1]$, για τις διαφορετικές τιμές της πυκνότητας $d, d \in [0,1]$.

Μελετώντας τη σχέση πυκνότητας δάσους – πιθανότητας επέκτασης της φωτιάς μπορούμε να πάρουμε γραφικά την παραπάνω πλήρως κατατοπιστική απεικόνιση (Σχήμα 3.17). Η μη γραμμικότητα του μοντέλου διατηρείται για τις διάφορες τιμές της πυκνότητας d . Αυτό που διαφοροποιείται είναι η κρίσιμη τιμή της πιθανότητας, και το «μέγεθος» της μεταβολής κοντά στην κρίσιμη τιμή, ώστε η φωτιά να εξαπλωθεί σε όλο το δάσος. Για πυκνότητα δάσους κάτω από το 50% της συνολικής έκτασής του, η φωτιά δεν πρόκειται να εξαπλωθεί παρά μόνο σε μια περιορισμένη περιοχή του δάσους, ανεξάρτητα από την πιθανότητα διάδοσης. Αυτό είναι λογικό, καθώς ο κανόνας εφαρμόζεται τοπικά με αλληλεπίδραση γειτονικών κυττάρων. Έτσι εάν η κατανομή του δάσους είναι αραιή, αλληλεπιδρούν ελάχιστοι γείτονες. Για πυκνότητα από 50% και πάνω όμως εμφανίζεται το μη γραμμικό φαινόμενο. Η αύξηση της πυκνότητας επιφέρει ελαχιστοποίηση της κρίσιμης τιμής της πιθανότητας του συστήματος. Για παράδειγμα, για πυκνότητα $d = 50\%$ η διαφορά κατάστασης του συστήματος παρατηρείται για $p_{cr} \approx 0.66$ κι έπειτα (κόκκινη γραφική παράσταση), ενώ για πυκνότητα $d = 64\%$ έχουμε $p_{cr} \approx 0.48$ (μωβ γραφική παράσταση) και για $d = 72\%$ είναι $p_{cr} \approx 0.38$. Δηλαδή, όσο πιο πυκνό είναι το δάσος, τόσο πιο «εύκολα» διαδίδεται η φωτιά, έστω και με μικρή πιθανότητα διάδοσής της.

3.3.3. Συμπεράσματα από τη σύγκριση των 2 μοντέλων

Έχοντας ολοκληρώσει τη μελέτη της διαδικασίας επέκτασης πυρκαγιάς μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι τα δύο μοντέλα προσομοίωσης που αναφέρθηκαν δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες διαφορές.

Η μη γραμμικότητα χαρακτηρίζει και τα δύο μοντέλα, δημιουργώντας μια μεταβολή στην κατάσταση του συστήματος γύρω από κάποια συγκεκριμένη τιμή της πιθανότητας διάδοσης της φωτιάς. Αυτή είναι και η κρίσιμη τιμή της πιθανότητας για το εκάστοτε σύστημα δάσος – φωτιά, η οποία εξαρτάται από την πυκνότητα του δάσους.

Η κοινή αυτή συμπεριφορά έχει τη ρίζα της στη στοχαστικότητα των μοντέλων, δεδομένου ότι η κατανομή της πιθανότητας ακολουθεί την κατανομή Bernulli, με πιθανά αποτελέσματα «επιτυχία» ή «αποτυχία», σχετικά με το αν θα μεταδοθεί η φωτιά σε ένα γειτονικό κελί ή όχι. Επομένως, είναι δυνατή η χρήση και των δυο μοντέλων εξίσου στη μελέτη της προσομοίωσης της διάδοσης μιας φωτιάς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Εφαρμογή των Κυτταρικών Αυτομάτων σε μία πραγματική κατάσταση:

η περίπτωση των Σπέτσων

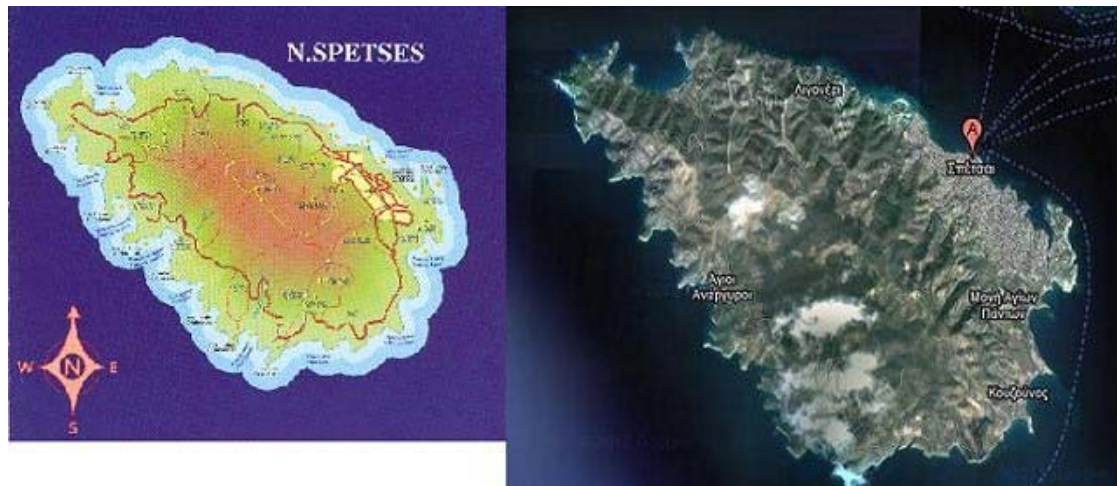
4.1. Το Κυτταρικό Αυτόματο

Η διαδικασία της μοντελοποίησης της επέκτασης της φωτιάς κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς βελτιστοποιείται, όταν μπορούμε να τη συγκρίνουμε με πραγματικά γεγονότα. Γι' αυτό το λόγο επιλέγουμε και την εφαρμογή ενός μοντέλου κυτταρικού αυτόματου σε μια περιοχή με πραγματικά δεδομένα, όπως τις Σπέτσες.

Η πυρκαγιά που εκδηλώθηκε στις Σπέτσες τον Αύγουστο του 1990 είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή δάσους έκτασης άνω των 6 τετραγωνικών χιλιομέτρων – σχεδόν η μισή δασική έκταση του νησιού. Η φωτιά ξέσπασε στο κέντρο περίπου του νησιού από άγνωστη αιτία και εξαπλώθηκε γρήγορα προς το νότιο μέρος του, λόγω ισχυρών νότιων ανέμων που έπνεαν στην περιοχή. Οι πυροσβέστες κατάφεραν να την θέσουν υπό έλεγχο και τέλος να την κατασβέσουν μετά από 11 ώρες. Το αποτέλεσμα: μεγάλη οικολογική και οικονομική καταστροφή. Για το γεγονός αυτό υπάρχουν πλήθος δεδομένων, περισσότερα από άλλα αντίστοιχα γεγονότα, που μας βοηθούν στη μελέτη του φαινομένου, ώστε να μπορούμε να προβλέψουμε και να περιορίσουμε στο ελάχιστο άλλες τέτοιες καταστροφές. Έχοντας, λοιπόν, απεικονίσει την πραγματική έκταση της καμένης τελικά περιοχής και γνωρίζοντας τα γεωγραφικά δεδομένα της περιοχής αλλά και τις μετεωρολογικές συνθήκες την περίοδο που ξέσπασε η φωτιά, μπορούμε να προσαρμόσουμε το μοντέλο μας, και να συγκρίνουμε τα υπολογιστικά με τα πραγματικά αποτελέσματα, ελέγχοντας την ακρίβειά του (*Alexandridis et al., 2008*).

Επομένως, σε αυτό το σημείο θα μελετήσουμε εκτενώς τις συνθήκες που επηρεάζουν τη διάδοση και εξάπλωση της φωτιάς, και το πώς αυτές εισάγονται και μοντελοποιούνται για την προσομοίωση του προβλήματος. Επιπλέον, θα δούμε πώς γίνεται η προσομοίωση θεωρώντας πραγματικά δεδομένα και συνθήκες. Θα εξετάσουμε τον τρόπο εξαγωγής των γεωγραφικών και γεωλογικών δεδομένων – GIS data – για την περιοχή, χρησιμοποιώντας δορυφορικές φωτογραφίες μέσω του προγράμματος Google Earth, γεγονός που θα μας επιτρέψει να εξαγάγουμε πολύτιμα συμπεράσματα για την επίδραση της κλίσης του εδάφους στην επέκταση της φωτιάς (η επιλογή του νησιού ενδείκνυται λόγω των απότομων υψομετρικών μεταβολών που

παρουσιάζει). Τέλος, θα δούμε πώς μπορεί να πραγματοποιηθεί επεξεργασία τέτοιων εικόνων (Image Processing), ώστε να εξάγουμε ακριβείς πληροφορίες για την πυκνότητα και το ποσοστό βλάστησης μιας περιοχής, τα φυσικά όρια κ.λ.π. Έχοντας ανακτήσει όλα αυτά τα δεδομένα, έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε ένα ακριβές μοντέλο, με διαμέριση και χαρακτηριστικά που να πλησιάζουν τα πραγματικά δεδομένα, ώστε να προσομοιώνει την επέκταση της φωτιάς με τον πληρέστερο τρόπο.



Σχήμα 4.1: Το νησί των Σπετσών, αριστερά κάτοψη της μορφολογίας του, δεξιά φωτογραφία από δορυφόρο (Πηγή Google Earth).

Ξεκινώντας την προσομοίωση του προβλήματος θα πρέπει να οριστούν επαρκώς, το περιβάλλον, οι καταστάσεις των κυττάρων καθώς και οι κανόνες εξέλιξης σε αυτή την περίπτωση.

- Το κυτταρικό αυτόματο

Και σε αυτή την περίπτωση το περιβάλλον είναι ένα επίπεδο δισδιάστατο πλέγμα, τετραγωνικό, μεγέθους l , με 8 γείτονες. Το μέγεθος του κάθε κελιού, ύστερα από την επεξεργασία των γεωλογικών πληροφοριών και την επεξεργασία της εικόνας του νησιού, όπως θα δούμε παρακάτω, ορίζεται να είναι $5m \times 5m$, διάσταση που μας εξυπηρετεί, ώστε να υποθέσουμε πως κάθε κελί, αν περιέχει βλάστηση, έχει ένα και μόνο δέντρο.

- Οι καταστάσεις των κυττάρων

Οι πιθανές καταστάσεις για κάθε κελί είναι οι εξής:

Κατάσταση «1»: το κελί είναι κενό. Η κατάσταση αυτή περιγράφει τα κελιά που αντιστοιχούν σε κατοικημένες περιοχές, σε περιοχές χωρίς καύσιμη ύλη γι' αυτό και υποθέτουμε πως ένα κελί στην κατάσταση 1 δεν μπορεί να καεί.

Κατάσταση «2»: το κελί περιέχει δέντρο, καύσιμη ύλη.

Κατάσταση «3»: το κελί περιέχει φλεγόμενο δένδρο.

Κατάσταση «4»: το κελί περιέχει καμένο δένδρο.

Η κατάσταση κάθε κελιού αποθηκεύεται στον πίνακα κατάστασης S .

- Κανόνες εξέλιξης

Κάθε χρονική στιγμή t οι κανόνες εξέλιξης εφαρμόζονται στο κελί (i, j) του πίνακα κατάστασης και έτσι σε όλο τον πίνακα.

- Κάθε κενό κελί παραμένει κενό και την επόμενη χρονική στιγμή, δηλαδή αν $S_t(i, j) = 1$ τότε $S_{t+1}(i, j) = 1$.
- Κάθε φλεγόμενο κελί γίνεται καμένο (κενό) την επόμενη χρονική στιγμή, δηλαδή αν $S_t(i, j) = 3$ τότε $S_{t+1}(i, j) = 4$.
- Κάθε καμένο κελί παραμένει καμένο (κενό), δηλαδή αν $S_t(i, j) = 4$ τότε $S_{t+1}(i, j) = 4$.
- Κάθε φλεγόμενο κελί έχει πιθανότητα p να μεταδώσει τη φωτιά στα γειτονικά του, εφ'όσον περιέχουν βλάστηση, την επόμενη χρονική στιγμή, δηλαδή αν $S_t(i, j) = 3$ τότε $S_{t+1}(i \pm 1, j \pm 1) = 3$, με πιθανότητα p .

- Μεταβλητές που επηρεάζουν την επέκταση της φωτιάς.

Όπως επισημάνθηκε εισαγωγικά, σημαντικές μεταβλητές στη διαδικασία προσομοίωσης είναι αυτές που καθορίζουν την *ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς* καθώς και το *σχήμα του μετώπου* κατά την εξάπλωσή της. Στο συγκεκριμένο μοντέλο προσομοίωσης της πυρκαγιάς στις Σπέτσες λαμβάνουμε υπόψη το είδος και την πυκνότητα της βλάστησης στο νησί, την κλίση του εδάφους και τη διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου. Επομένως, η πιθανότητα επέκτασης της φωτιάς είναι μια συνάρτηση όλων αυτών των παραγόντων και υπολογίζεται ως εξής:

$$p = p_c \cdot (1 + p_{veg}) (1 + p_d) \cdot p_s \cdot p_w,$$

Όπου p_c : σταθερή πιθανότητα, την οποία έχει ένα κύτταρο να μεταδώσει τη φωτιά σε ένα άλλο γειτονικό του, για δεδομένο τύπο και πυκνότητα βλάστησης, σε επίπεδο εδάφους και με την απουσία ανέμου.

p_{veg} : πιθανότητα διάδοσης, βάσει του είδους της βλάστησης.

p_d : πιθανότητα διάδοσης, βάσει της πυκνότητας της βλάστησης.

p_s : πιθανότητα διάδοσης, βάσει της κλίσης του εδάφους.

p_w : πιθανότητα διάδοσης, βάσει του ανέμου.

Στον παραπάνω τύπο παρατηρούμε πως όλες οι πιθανότητες πολλαπλασιάζονται από τη σταθερά πιθανότητας p_c , ώστε να μπορούμε να έχουμε την ορθή – κανονικοποιημένη πιθανότητα που βασίζεται σε όλους τους προαναφερθέντες παράγοντες.

Στο κυτταρικό αυτόματο, λοιπόν, κάθε κελί βρίσκεται σε μια κατάσταση από τις 1,2,3,4, η οποία απεικονίζεται για όλο το περιβάλλον στον πίνακα κατάστασης S , ο οποίος ανανεώνεται κάθε χρονική στιγμή. Σε αντίστοιχους πίνακες έχουμε συγκεντρωμένα και τα στοιχεία του είδους και της πυκνότητας της βλάστησης κάθε κελιού καθώς και το υψόμετρό του. Επομένως, όλο μας το περιβάλλον, οι Σπέτσες, κωδικοποιείται σε 4 διαφορετικούς πίνακες – κατάστασης, είδους βλάστησης, πυκνότητας βλάστησης, υψομέτρου.

- Επίδραση από το είδος και την πυκνότητα της βλάστησης.

Το περιβάλλον του νησιού είναι προφανώς ετερογενές, χωρίς ίδια ενιαία βλάστηση, με αποτέλεσμα να διαφοροποιείται και ο τρόπος μετάδοσης της φωτιάς. Το γεγονός αυτό προσομοιώνεται βάσει των πιθανοτήτων p_{veg} και p_d . Το είδος της βλάστησης και η πυκνότητα, όπως προείπαμε, καταχωρούνται σε πίνακες με διάσταση όσο και ο πίνακας κατάστασης, δίνοντας τις αντίστοιχες πληροφορίες για το κάθε κύτταρο του περιβάλλοντος. Ο πίνακας βλάστησης περιέχει τις τιμές 1, 2 ή 3, οι οποίες αντιπροσωπεύουν γεωργικές καλλιέργειες, θαμνώδη βλάστηση και πεύκα, αντίστοιχα. Όμοια, ο πίνακας πυκνότητας παίρνει κι αυτός τιμές από 1 έως 3, όπου η τιμή 1 αντιστοιχεί σε αραιή βλάστηση και η τιμή 3 σε πυκνή βλάστηση.



Σχήμα 4.2: Τα είδη βλάστησης στις Σπέτσες: 1=γεωργικές καλλιέργειες, 2=θαμνώδης βλάστηση, 3=πεύκα.

- Επίδραση από το υψόμετρο του εδάφους.

Η υψομετρική διαφορά των σημείων μια περιοχής που φλέγεται είναι δυνατόν να επηρεάσει τον τρόπο μετάδοσης της φωτιάς, άρα και την ταχύτητά της και το σχήμα του μετώπου της. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι η διάδοση μιας φωτιάς σε επίπεδο έδαφος θα διαφέρει από μια άλλη σε ανομοιόμορφο, έστω κι αν όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες είναι ίδιοι. Το γεγονός ότι η φωτιά μπορεί να μεταδοθεί με μεγαλύτερη πιθανότητα προς τα σημεία με μεγαλύτερο υψόμετρο σε σχέση με αυτά που βρίσκονται υψομετρικά χαμηλότερα, οφείλεται στις φλόγες που δημιουργούνται και μεγαλώνουν κατά την καύση. Στη δημιουργία, επομένως, ενός αξιόπιστου μοντέλου για την προσομοίωση μιας πυρκαγιάς η κλίση του εδάφους της εξεταζόμενης περιοχής παίζει σημαντικό ρόλο.

Στο κυτταρικό μας αυτόματο, λοιπόν, που αφορά στις Σπέτσες, μέσω δορυφόρου έχουμε απεικονίσει τα γεωμορφολογικά δεδομένα του νησιού. Έχοντας διαμερίσει το νησί με ένα πλέγμα τετραγωνικών κελιών – κυτταρικό αυτόματο – καταχωρούμε το υψόμετρο καθενός σε έναν πίνακα, τον πίνακα υψομέτρου. Είναι προφανές πως αυτός ο πίνακας είναι ίδιας διάστασης με τους πίνακες βλάστησης, πυκνότητας και κατάστασης.

Για τον υπολογισμό της πιθανότητας βάσει της κλίσης του εδάφους μας ενδιαφέρει η γωνία που σχηματίζουν τα κελιά που αλληλεπιδρούν. Καθώς όμως το κυτταρικό μας αυτόματο είναι δισδιάστατο τετραγωνικό, η γωνία αυτή υπολογίζεται διαφορετικά για τους οριζόντιους και κάθετους γείτονες ενός κελιού απ' ό,τι για τους διαγώνιους. Έχουμε, λοιπόν, για δυο γειτονικά κελιά μεγέθους l με υψόμετρα Y_1 και Y_2 :

- Αν είναι παρακείμενα μεταξύ τους, η γωνία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{Y_1 - Y_2}{l} \right)$$

- Αν είναι διαγώνια μεταξύ τους, η γωνία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{Y_1 - Y_2}{l\sqrt{2}} \right)$$

Η επίδραση της κλίσης στην εξάπλωση της φωτιάς, επομένως, μοντελοποιείται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$R_s = R_{0s} e^{(a\theta_s)},$$

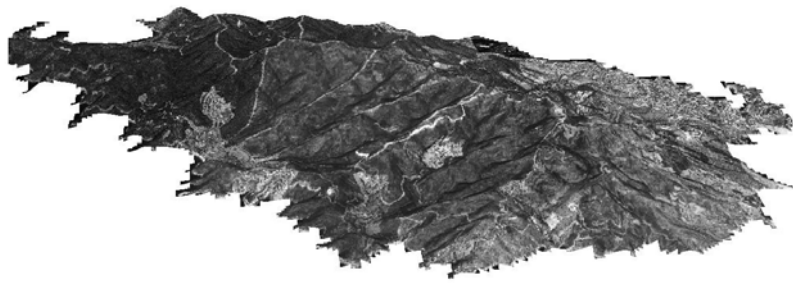
όπου R_{0s} : ο ρυθμός εξάπλωσης της φωτιάς σε επίπεδο έδαφος (κλίση ίση με μηδέν).

θ_s : η γωνία της κλίσης

a : σταθερά, προσαρμοσμένη από πειραματικά δεδομένα.

Άρα, από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η πιθανότητα που μοντελοποιεί την επίδραση της κλίσης στην εξάπλωση της φωτιάς δίνεται από τη σχέση:

$$p_s = e^{(a\theta_s)}.$$



Σχήμα 4.3: Αεροφωτογραφία Σπετσών: χαρακτηριστική η μορφολογία του νησιού (Alexandridis et al., 2008).

- Επίδραση από την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου.

Ο άνεμος είναι ο πλέον σημαντικός παράγοντας στην εξάπλωση μιας φωτιάς, γι' αυτό και η προσομοίωσή του κρίνεται απαραίτητη. Στη σχετική βιβλιογραφία υπάρχουν πολλά μοντέλα γι' αυτό το σκοπό, κυρίως εμπειρικά (Weise et al. 1996; Yongzhong et al. 2005). Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε ένα εμπειρικό μοντέλο που χρησιμοποιεί μια πιο «εύχρηστη» μαθηματική σχέση (Alexandridis et al., 2008). Η πιθανότητα μετάδοσης της φωτιάς λόγω της κατεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου υπολογίζεται, λοιπόν, από τη σχέση:

$$P_w = e^{c_1 V} \cdot e^{V c_2 (\cos \theta - 1)},$$

όπου: c_1, c_2 : σταθερές προσαρμοσμένες από πειραματικά δεδομένα.

θ : η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης διάδοσης της φωτιάς και της διεύθυνσης του ανέμου.

V : η ταχύτητα του ανέμου.

Ας παρατηρήσουμε τα εξής:

- i. Η διεύθυνση του ανέμου παίρνει συνεχείς τιμές, από 0° έως 360° , γεγονός που καθιστά τη μοντελοποίηση πιο ρεαλιστική.
- ii. Η πιθανότητα P_w εξαρτάται από τις διευθύνσεις του ανέμου και της διάδοσης της φωτιάς με τρόπο ώστε, αν οι διευθύνσεις είναι ομόρροπες, η P_w παίρνει τη μέγιστη τιμή της, ενώ αν είναι αντίρροπες, παίρνει την ελάχιστη τιμή της.

4.2. Ανάκτηση και επεξεργασία των Γεωλογικών – Γεωγραφικών δεδομένων για τις Σπέτσες

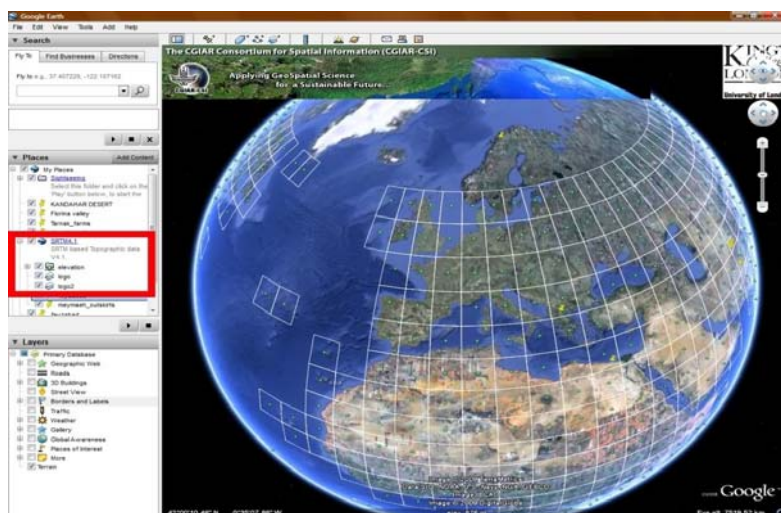
Για την απεικόνιση των γεωγραφικών δεδομένων της περιοχής χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα Google Earth (<http://www.google.com/earth/index.html>). Το συγκεκριμένο πρόγραμμα μας παρέχει τοπογραφικές πληροφορίες μέσω δορυφορικής φωτογραφίας της περιοχής. Επομένως, μπορούμε να εργαστούμε σε πραγματικό χώρο, έχοντας τα φυσικά όρια και τη γεωγραφία του νησιού και επίσης ύστερα από επεξεργασία της συγκεκριμένης εικόνας στο Matlab, μπορούμε να εντοπίσουμε τις περιοχές με συγκεκριμένα είδη βλάστησης καθώς και τις κατοικημένες περιοχές, και έτσι να προσομοιώσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια τη διάδοση της φωτιάς.

Το Google Earth είναι ένα εικονικό πρόγραμμα παγκόσμιας περιήγησης, παρέχεται δωρεάν στο διαδίκτυο και διαχειρίζεται πάνω από 10.000 gigabytes πληροφοριών που αφορούν στη Γη. Το εύρος του είδους των πληροφοριών που παρέχει το πρόγραμμα είναι μεγάλο και εκτείνεται από φωτογραφίες οποιουδήποτε σημείου στον πλανήτη, δρόμους και διαδρομές, καιρικές συνθήκες και αξιοθέατα, μέχρι πληροφορίες επιχειρήσεων ανά περιοχή και γεωλογικά στοιχεία. Πρόκειται για ένα διαδραστικό πρόγραμμα, όπου μέσω μιας απλής σύνδεσης στο διαδίκτυο κάθε χρήστης από τον προσωπικό του υπολογιστή μπορεί να εξερευνήσει την υδρόγειο και να εστιάσει σε διάφορα σημεία ενδιαφέροντος, βλέποντας τα κτήρια, τους δρόμους, ακόμη και ανθρώπους, γεγονός που το καθιστά το πιο δημοφιλές σε σχέση με άλλα αντίστοιχα προγράμματα.

Ωστόσο, πέρα από την απλή πλοήγηση και τα εικονικά ταξίδια ανά τον κόσμο, το Google Earth περιέχει μια πλήρη βάση γεωγραφικών και γεωλογικών δεδομένων για κάθε σημείο του πλανήτη.

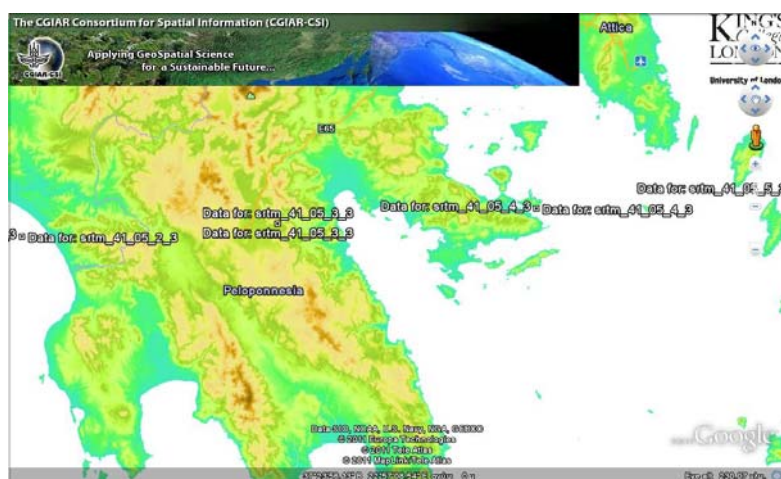
Για την προσομοίωση της επέκτασης της πυρκαγιάς στις Σπέτσες αξιοποιήσαμε το συγκεκριμένο πρόγραμμα, εξάγοντας τα υψομετρικά δεδομένα του νησιού. Τα τοπογραφικά δεδομένα στο Google Earth βασίζονται στα αρχεία του STRM (Shuttle Radar Topography Mission). Πρόκειται για ένα διεθνές πρόγραμμα το οποίο υλοποίησε η ΝΑΣΑ (National Aeronautics and Space Administration (NASA)) σε συνεργασία με το Εθνικό Γεωχωρικό Ινστιτούτο των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)) το Φεβρουάριο του 2000, θέτοντας σε τροχιά γύρω από τη γη ένα ειδικά κατασκευασμένο ραντάρ, σε μια αποστολή 11 ημερών (<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>). Το SRTM ανέκτησε υψομετρικά δεδομένα σε σχεδόν παγκόσμια κλίμακα, δημιουργώντας έτσι την πιο ολοκληρωμένη και υψηλής ανάλυσης ψηφιακή τοπογραφική βάση δεδομένων της γης. Τα υψομετρικά στοιχεία που προκύπτουν από αυτή τη βάση δεδομένων παρέχονται δωρεάν μέσω του Google Earth και χρησιμοποιούνται σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Geographic Information Systems – GIS).

Για την ανάκτηση, επομένως, των υψομετρικών δεδομένων για τις Σπέτσες αρκεί από την επιλογή Galery Earth του Google Earth να ενεργοποιηθεί η αντίστοιχη βάση δεδομένων του SRTM. Αυτόματα η εικόνα της γης στο Google Earth διαμερίζεται σε μικρά τετράγωνα, στο κέντρο του καθενός υπάρχει το αντίστοιχο αρχείο με τα υψόμετρα της περιοχής που καταλαμβάνει το τετράγωνο.



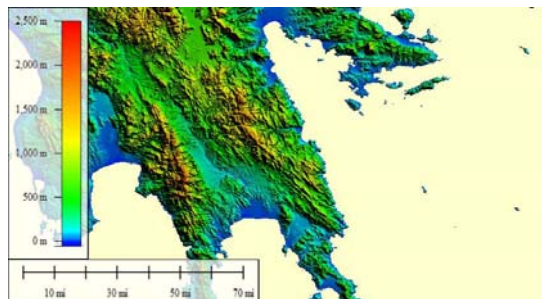
Σχήμα 4.4: Google Earth, διαμέριση της γης βάσει των αρχείων τοπογραφικών πληροφοριών SRTM. Στα αριστερά, στο κόκκινο πλαίσιο, η επιλογή ενεργοποίησης του SRTM στο Google Earth.

Εστιάζοντας στον Ελλαδικό χώρο, μπορούμε να επιλέξουμε το αρχείο που περιέχει την περιοχή των Σπετσών και να το αποθηκεύσουμε. Το αρχείο βρίσκεται σε μορφή kml – μορφή αρχείου που χρησιμοποιείται για την εμφάνιση γεωγραφικών δεδομένων σε προγράμματα περιήγησης, όπως το Google Earth.

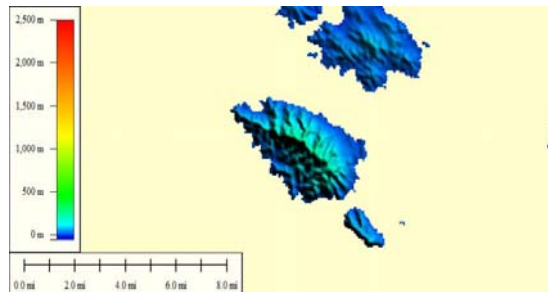


Σχήμα 4.5: Google Earth, εστίαση στο συγκεκριμένο αρχείο που αφορά στην περιοχή των Σπετσών.

Στη συνέχεια, «ανοίγοντας» το kml αρχείο μέσω του προγράμματος Global Mapper (<http://www.globalmapper.com/>) (ή ενός οποιουδήποτε λογισμικού GIS), μπορεί να γίνει επιλογή ακόμη πιο μικρής, συγκεκριμένης περιοχής και έτσι επιλέγουμε την περιοχή γύρω από τις Σπέτσες.



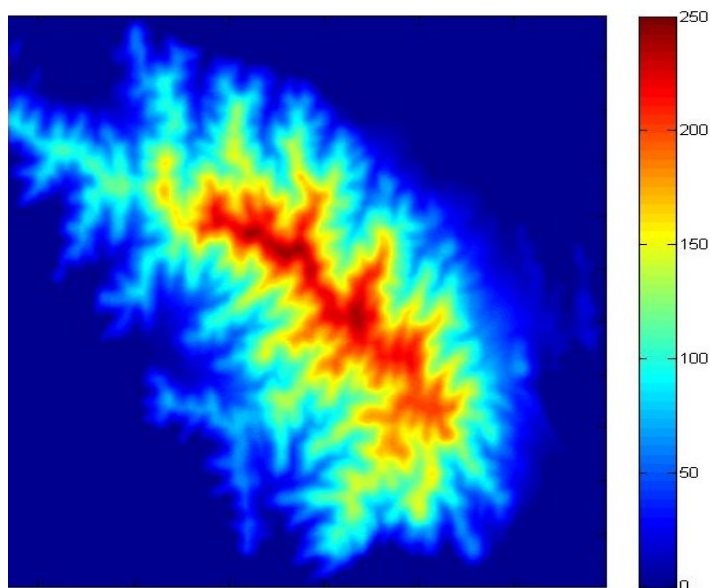
4.6i



4.6ii

Σχήμα 4.6: Απεικόνιση της ευρύτερης περιοχής με τα υψομετρικά δεδομένα που περιέχει το αρχείο kml (4.6i) και πιο συγκεκριμένα της περιοχής των Σπετσών (4.6ii), μέσω του Global Mapper.

Από την επιλογή File στο κυρίως μενού του προγράμματος Global Mapper επιλέγουμε "Export Raster and Elevation Data" και στη συνέχεια "Export XYZ Grid", από όπου μας δίνεται η επιλογή να εστιάσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια στην περιοχή του νησιού και να εξάγουμε σε ένα λογιστικό φύλλο τις χωρικές της συντεταγμένες. Συγκεκριμένα, αποθηκεύουμε σε μορφή πίνακα τριών στηλών τις τιμές γεωγραφικού πλάτους, γεωγραφικού μήκους και υψόμετρου για το κάθε στοιχείο της επιλεγμένης περιοχής (η διαμέριση είναι αυτόματη από το πρόγραμμα βάσει της γεωγραφικής θέσης του νησιού). Επομένως με την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας έχουμε στη διάθεσή μας τον υψομετρικό πίνακα των Σπετσών και μέσω της επεξεργασίας του στο Matlab μπορούμε να λάβουμε οποιαδήποτε απεικόνισή του (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Κάτοψη των Σπετσών, απεικόνιση του υψόμετρου, μέσω Matlab.

4.3. Επεξεργασία εικόνας (Image Processing) για την ανάκτηση των πληροφοριών βλάστησης

Έχοντας ψηφιοποιήσει το ανάγλυφο των Σπετσών, μένει να ανακτήσουμε πληροφορίες για την πυκνότητα της βλάστησης. Αυτό θα πραγματοποιηθεί μέσω της επεξεργασίας της ψηφιακής δορυφορικής φωτογραφίας του νησιού.

Η διαδικασία της επεξεργασίας εικόνας (Image Processing) στοχεύει στην επεξεργασία της πληροφορίας που αυτή απεικονίζει. Η επεξεργασία εικόνας καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα εφαρμογών, σχεδόν σε κάθε πτυχή των επιστημών και της τεχνολογίας. Οι διάφορες μέθοδοι για την επεξεργασία εικόνας εφαρμόζονται:

- στην Ιατρική, επεξεργασία και μελέτη ακτινογραφιών, αξονικών και μαγνητικών τομογραφιών, κυτταρική ανάλυση κ.ά.
- σε νομικές διαδικασίες, ανάλυση αποτυπωμάτων.
- στη βιομηχανία, αυτόματος έλεγχος των στοιχείων σε μια γραμμή παραγωγής.
- στη γεωργία, εδαφική μελέτη, μελέτη καλλιεργειών και βλάστησης κ.ά.

Για την προσομοίωση του προβλήματός μας, έχουμε μια ψηφιακή φωτογραφία των Σπετσών μέσω δορυφόρου (Σχήμα 4.8) και ο στόχος είναι ύστερα από την επεξεργασία της να ανακτήσουμε πληροφορίες για την πυκνότητα της βλάστησης. Ο σκοπός αυτός επιτυγχάνεται με τη χρήση του ψηφιακού μετασχηματισμού της εικόνας.

Στην περίπτωση που μελετάμε χρησιμοποιήθηκε ο συνημιτονοειδής μετασχηματισμός Fourier (Cosine Fourier Transform) (*McAndrew, 2010*). Ουσιαστικά πρόκειται για μια διαδικασία κατά την οποία μετασχηματίζουμε μια εικόνα στο πεδίο των συχνοτήτων και από την οποία μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες, στη συγκεκριμένη περίπτωση για την πυκνότητα και την έκταση της βλάστησης (αν και εφόσον υπάρχει βλάστηση).

Η επεξεργασία της ψηφιακής μας φωτογραφίας γίνεται μέσω του προγράμματος Matlab. Εδώ κάθε εικόνα αντιστοιχεί σε έναν πίνακα, μεγέθους $M \times N$, όσο και το μέγεθος της εικόνας. Οι τιμές του πίνακα εξαρτώνται από τον τύπο της εικόνας – gray scale (ασπρόμαυρη εικόνα), RGB (έγχρωμη εικόνα), κ.λ.π. Το κάθε χρώμα, επομένως, σε μία έγχρωμη εικόνα αντιστοιχεί σε ορισμένες τιμές του παραπάνω πίνακα κι έτσι η επεξεργασία της πληροφορίας της εικόνας ανάγεται σε μία μαθηματική διαδικασία.

4.3.1. Τύποι ψηφιακής εικόνας: RGB και gray scale

Εύλογα μπορούμε να αναρωτηθούμε πώς μια ψηφιακή εικόνα αντιστοιχεί σε αριθμητικές τιμές ενός πίνακα ανάλογα με το είδος της, εάν είναι έγχρωμη ή ασπρόμαυρη. Αυτό γίνεται κατανοητό αν σκεφτούμε πως μια ψηφιακή εικόνα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύνολο «ψηφίδων» όπου καθεμιά φέρει κι από ένα διαφορετικό χρώμα, κι όλες μαζί σε συνδυασμό στην αντίστοιχη διάταξη δίνουν το τελικό αποτέλεσμα της εικόνας.

Στην περίπτωση της έγχρωμης φωτογραφίας το χρώμα της κάθε ψηφίδας απεικονίζεται με βάσει το πρότυπο χρώματος RGB. Το RGB είναι ένα πρότυπο όπου τα χρώματα κόκκινο, πράσινο και μπλε συνδυάζονται με πλήθος διαφορετικών τρόπων ώστε να αναπαράγουν άλλα χρώματα. Το όνομα του προτύπου και η σύντηψη RGB προέρχεται από τα τρία βασικά χρώματα, το κόκκινο (Red), το πράσινο (Green) και το μπλε (Blue). Ένα χρώμα στο πρότυπο χρώματος RGB μπορεί να περιγραφεί με τον προσδιορισμό της «ποσότητας» του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε χρώματος από την οποία αυτό αποτελείται. Κάθε τέτοια «ποσότητα» μπορεί να ποικίλει μεταξύ του ελάχιστου (καθόλου χρώμα) και του μέγιστου (πλήρης ένταση χρώματος). Δηλαδή κάθε χρώμα εκφράζεται ως μια τριάδα από «ποσότητες» του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε (r,g,b) (RGB triplet). Εάν όλα τα χρώματα είναι στο ελάχιστο το αποτέλεσμα είναι μαύρο, ενώ αν όλα είναι στο μέγιστο το αποτέλεσμα είναι λευκό. Τα χρώματα μπορούν να περιγραφούν ποσοτικά με διάφορους τρόπους:

- Σε κλίμακα 0 ως 1: το 0 αντιστοιχεί την ελάχιστη «ποσότητα» χρώματος και το 1 στην μέγιστη. Παράδειγμα το μαύρο περιγράφεται από την τριάδα (0,0,0), το λευκό από (1,1,1) και το κόκκινο από (1,0,0).
- Σε ποσοστιαία κλίμακα 0% ως 100%: Παράδειγμα το μαύρο περιγράφεται από την τριάδα (0%,0%,0%), το λευκό από (100%,100%,100%) και το κόκκινο από (100%,0%,0%).
- Σε κλίμακα 0 ως 255: πρόκειται για παράγωγη κλίμακα αυτής από 0 ως 1 με πολλαπλασιασμό επί 255, ώστε ψηφιακά η αξία κάθε χρώματος να μπορεί να αντιστοιχηθεί σε 8 bit. Παράδειγμα το μαύρο περιγράφεται από την τριάδα (0,0,0), το λευκό από (255,255,255) και το κόκκινο από (255,0,0).
- Σε κλίμακα 0 ως 65.535: αντίστοιχη κλίμακα με την προηγούμενη όπου η αξία κάθε χρώματος αντιστοιχεί σε 16 bit. Παράδειγμα το μαύρο περιγράφεται από την τριάδα (0,0,0), το λευκό από (65.535,65.535,65.535) και το κόκκινο από (65.535,0,0).

Στην περίπτωση της ασπρόμαυρης φωτογραφίας το χρώμα της κάθε ψηφίδας απεικονίζεται με βάση το πρότυπο χρώματος gray scale. Εδώ οι αποχρώσεις του γκρι στην εικόνα αντιστοιχούν σε μια κλίμακα έντασης χρώματος από το μαύρο (αδύναμη ένταση) στο λευκό (ισχυρή ένταση). Η ένταση χρώματος μιας «ψηφίδας» - pixel εκφράζεται μέσα σε μια δεδομένη περιοχή ανάμεσα σε ένα ελάχιστο κι ένα μέγιστο όριο, με δυνατότητα να λάβει όλες τις ενδιάμεσες τιμές. Όμοια με πριν η ένταση του χρώματος μπορεί να περιγραφεί με τις αντίστοιχες κλίμακες, με πιο συνηθισμένη αυτή του 0 ως 1, όπου το 0 αντιστοιχεί στο μαύρο χρώμα, το 1 στο λευκό και όλες οι ενδιάμεσες δεκαδικές τιμές στις διάφορες αποχρώσεις του γκρι.

Στις περισσότερες εφαρμογές για την επεξεργασία και ανάλυση του σήματος μιας ψηφιακή εικόνας είναι προτιμότερο αυτή να βρίσκεται σε μορφή gray scale. Αυτό συμβαίνει καθώς, όπως θα δούμε και παρακάτω, η αναπαράσταση της έντασης του χρώματος μιας εικόνας στην κλίμακα του γκρι μπορεί εύκολα να κωδικοποιηθεί και να επεξεργαστεί με τη χρήση μαθηματικών μετασχηματισμών ώστε τελικά να λάβουμε την επιθυμητή πληροφορία. Υπάρχουν επομένως μέθοδοι για την μετατροπή μιας εικόνας από RGB σε gray scale. Οι μέθοδοι αυτές βασίζονται στο ποσοστό φωτεινότητας που «προσφέρει» το κάθε χρώμα – κόκκινο, πράσινο, μπλε – στην εικόνα. Η μετατροπή γίνεται προσθέτοντας τις τιμές του κόκκινου, του πράσινου και του μπλε από την τριάδα (r,g,b) μιας εικόνας, πολλαπλασιασμένες με ένα διαφορετικό ποσοστό ανάλογα με το αποτέλεσμα φωτεινότητας που προσφέρουν. Δηλαδή η τριάδα (r,g,b) ενός pixel εικόνας μετατρέπεται σε μία τιμή της κλίμακας του γκρι σύμφωνα με τη σχέση για τη φωτεινότητα: $0.2989 \cdot r + 0.5870 \cdot g + 0.1140 \cdot b$ (*Matlab Image Processing Toolbox*). Τα ποσοστά με τα οποία πολλαπλασιάζονται οι τιμές του της τριάδας (r,g,b) προέρχονται από την κανονικοποίηση του ποσοστού φωτεινότητας που προσφέρει κάθε χρώμα στην εικόνα βασισμένο στην ανθρώπινη αντίληψη – το ανθρώπινο μάτι είναι πιο ευαίσθητο στο πράσινο χρώμα σε σχέση με τα άλλα, έτσι το πράσινο (g) έχει μεγαλύτερο σταθμισμένο μέσο.

4.3.2. Επεξεργασία εικόνας μέσω του Διακριτού Συνημιτονοειδή Μετασχηματισμού.

Ο διακριτός συνημιτονοειδής μετασχηματισμός (DCT – Discrete Cosine Transform) είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο στην επεξεργασία εικόνας, ο οποίος χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση μιας ψηφιακής εικόνας ως ένα ημιτονοειδές άθροισμα από διάφορα πλάτη και συχνότητες. Συγκεκριμένα, στον χωρικό τομέα απεικόνισης της φωτογραφίας κάθε πληροφορία ενός κελιού-pixel μετασχηματίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$B_{pq} = a_p a_q \sum_{m=0}^{M-1} A_{mn} \cos\left(\frac{\pi(2m+1)p}{2M}\right) \cos\left(\frac{\pi(2n+1)q}{2N}\right)$$

όπου, $A_{M \times N}$ είναι ο πίνακας που αντιστοιχεί στην εικόνα στο Matlab, $0 \leq p \leq M-1$ και $0 \leq q \leq N-1$,

$$a_p = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{M}}, & p=0 \\ \sqrt{\frac{2}{M}}, & 1 \leq p \leq M-1 \end{cases} \quad \text{και} \quad a_q = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{N}}, & q=0 \\ \sqrt{\frac{2}{N}}, & 1 \leq q \leq N-1 \end{cases} \quad \text{και} \quad B_{pq} \quad \text{είναι} \quad \text{οι}$$

συντελεστές DCT του πίνακα A.

Μετά την ολοκλήρωση του συνημιτονοειδούς μετασχηματισμού, DCT δηλαδή, η εικόνα αναπαρίσταται στο πεδίο των συχνοτήτων, όπου κάθε στοιχείο φέρει τη συχνότητα του αντίστοιχου στοιχείου στο χωρικό πεδίο. Αυτό σημαίνει πως οι πίνακες της εικόνας στο πεδίο του χώρου και των συχνοτήτων έχουν το ίδιο μέγεθος.

Σε μια απλή ψηφιακή εικόνα η πλειοψηφία των σημαντικών οπτικών πληροφοριών της είναι συγκεντρωμένη σε μερικούς συντελεστές του DCT. Επομένως, η επεξεργασία της γίνεται μια εύκολη υπόθεση, μελετώντας απλώς αυτούς τους συντελεστές. Αυτή ακριβώς είναι και η μεγάλη αξία του μετασχηματισμού και γι' αυτό σε πολλές εφαρμογές είναι προτιμότερος από τον μετασχηματισμό Fourier (McAndrew, 2010).

Από τον πίνακα συχνοτήτων της εικόνας μπορούμε να εξάγουμε τα επιθυμητά συμπεράσματα, ύστερα από κατάλληλη επεξεργασία. Ο συγκεκριμένος πίνακας περιέχει τιμές από 0 έως 1, οι οποίες αποτελούν και την κλίμακα για την ύπαρξη και την πυκνότητα της βλάστησης στην περιοχή. Οι τιμές του πίνακα συχνοτήτων που βρίσκονται κοντά στο μηδέν αντιστοιχούν σε απουσία βλάστησης, πχ. θαλάσσια περιοχή. Όσο οι τιμές του πίνακα αυξάνονται, αυξάνεται και το ποσοστό της πυκνότητας βλάστησης.

Για την επεξεργασία της εικόνας αξιοποιούμε τα καταγεγραμμένα δεδομένα για την κατανομή του είδους βλάστησης στις Σπέτσες (Alexandridis et al., 2008). Με αυτό τον τρόπο για την κάθε περιοχή γνωρίζουμε τι είδους βλάστηση έχει και από τον πίνακα συχνοτήτων βρίσκουμε και την πυκνότητά της. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσω των εντολών του Matlab (Image Processing Toolbox). Εισάγουμε στο πρόγραμμα την ψηφιακή δορυφορική φωτογραφία της περιοχής (Σχήμα 4.8).

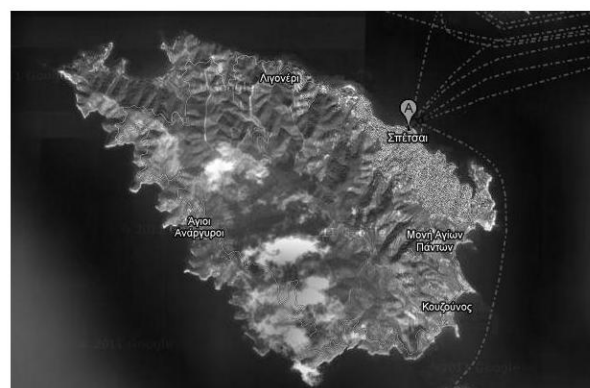


Σχήμα 4.8: Ψηφιακή φωτογραφία των Σπετσών από δορυφόρο (Πηγή Google Earth).

Δεδομένου ότι η εικόνα είναι έγχρωμη, κωδικοποιείται στο Matlab σε έναν πίνακα της μορφής (x, y, RGB) , όπου (x, y) είναι οι συντεταγμένες του κάθε κελιού-pixel της εικόνας και RGB είναι η τριάδα των βασικών χρωμάτων (κόκκινο, πράσινο, μπλε), από τα οποία αποτελείται το κάθε αντίστοιχο κελί.

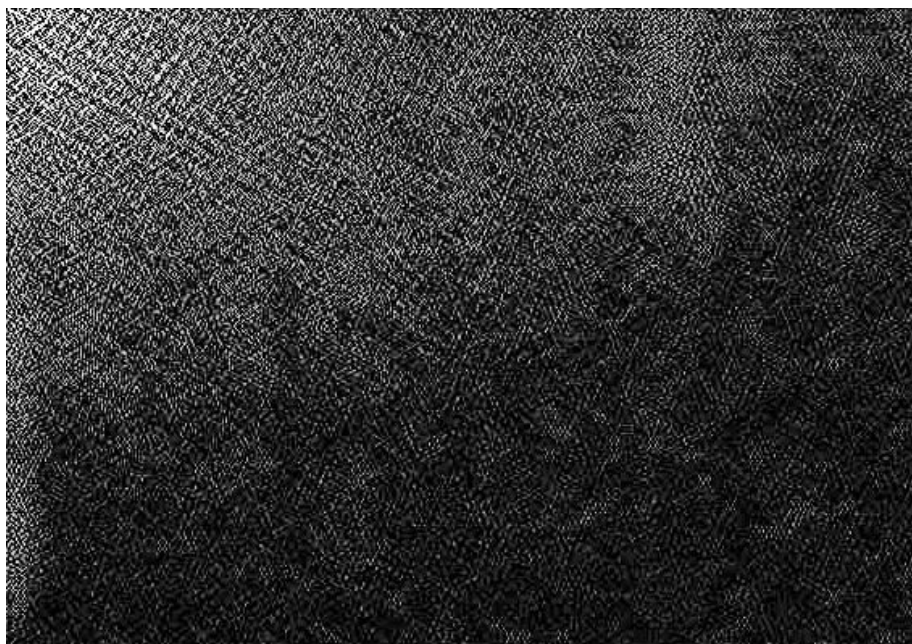
Για να μετασχηματιστεί όμως η εικόνα μέσω του Discrete Cosine Transform, θα πρέπει να τροποποιηθεί, ώστε να είναι της μορφής gray scale. Σε μια ψηφιακή εικόνα της μορφής gray scale κάθε στοιχείο της (pixel) φέρει μόνο την πληροφορία για τη συχνότητά του. Εικόνες αυτής της μορφής απεικονίζονται με χρώματα στην κλίμακα του γκρι (γνωστές ως «ασπρόμαυρες» εικόνες) ανάλογα με τις τιμές της συχνότητας: από το μαύρο στο λευκό μεταφερόμαστε από την μικρότερη προς τη μεγαλύτερη συχνότητα αντίστοιχα (Johnson, 2006).

Ο μετασχηματισμός μιας έγχρωμης εικόνας της μορφής RGB σε gray scale πραγματοποιείται μέσω της αντίστοιχης εντολής `rgb2gray` του Matlab. (Image Processing Toolbox) (Σχήμα 4.9).



Σχήμα 4.9: Μετασχηματισμός της εικόνας του Σχήματος 4.6 σε μορφή τύπου grayscale.

Έχοντας ολοκληρώσει αυτή τη διαδικασία, εφαρμόζουμε τον διακριτό συνημιτονοειδή μετασχηματισμό (dct2) και η παραπάνω εικόνα (Σχήμα 4.9) «μεταφράζεται» στις αντίστοιχες συχνότητες (Σχήμα 4.10).



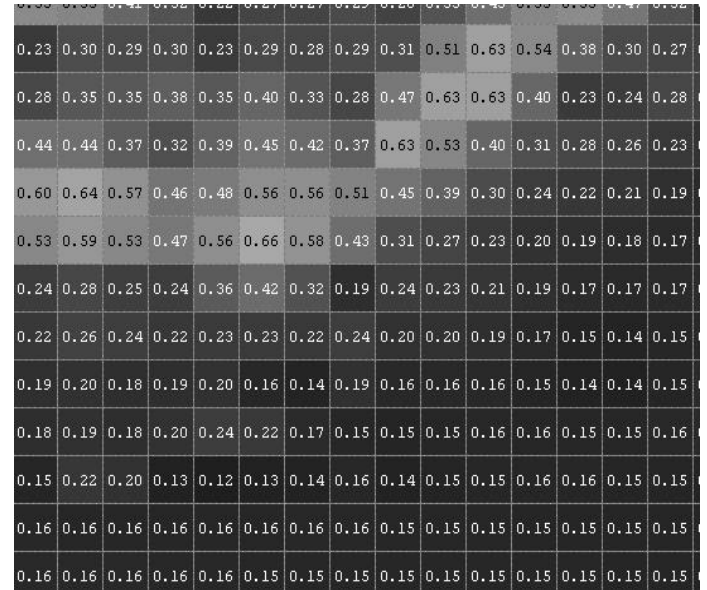
Σχήμα 4.10: Μετασχηματισμένη εικόνα αυτής του Σχήματος 4.7 μέσω Cosine Transform.

Τα μαύρα κελιά αντιστοιχούν σε συχνότητα 0, τα λευκά σε 1 και οι ενδιάμεσες τιμές των συχνοτήτων αντιστοιχούν στις αποχρώσεις του γκρι (Σχήμα 4.10). Επομένως, μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για την ύπαρξη βλάστησης ή όχι, καθώς και για την πυκνότητα της βλάστησης, με βάση τις τιμές που προκύπτουν από τον παραπάνω μετασχηματισμό.

Πιο συγκεκριμένα ας εξετάσουμε τα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 4.11 & 4.12) όπου απεικονίζεται ο μετασχηματισμός ορισμένων περιοχών στο πεδίο των συχνοτήτων. Παρατηρούμε πως με την εφαρμογή του συνημιτονοειδούς μετασχηματισμού προκύπτουν διαφορετικές τιμές συχνότητας για τη θαλάσσια περιοχή και για την στεριά (Σχήμα 4.11), όπως επίσης και διαφορετικές τιμές σε περιοχές βλάστησης ανάλογα με την πυκνότητά της (Σχήμα 4.12).



4.11 i.



4.11 ii.

Σχήμα 3.11: Απεικόνιση συγκεκριμένου τμήματος του νησιού όπου περιέχει τμήμα θάλασσας και ξηράς (4.11 i) και ο αντίστοιχος μετασχηματισμός του στο χώρο των φάσεων (4.11 ii). Στην θαλάσσια περιοχή αντιστοιχούν χαμηλές συχνοτήτες (μικρότερες του 0.20) και στην ξηρά μεγαλύτερες. Είναι εμφανές πως μπορούμε έτσι να εντοπίσουμε τα φυσικά όρια του νησιού.



4.12 i.

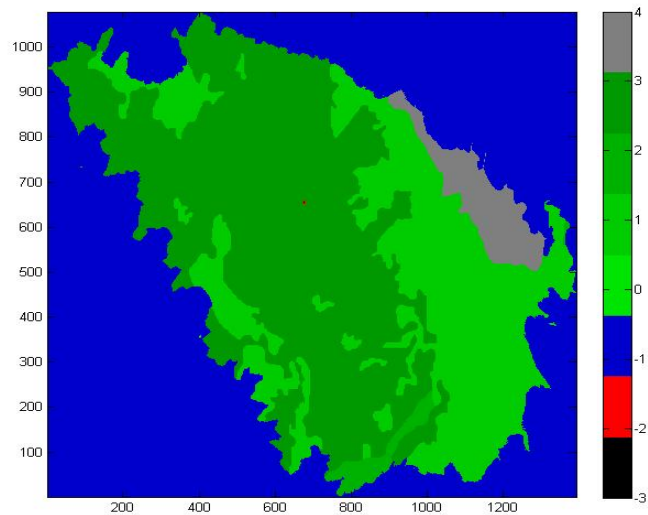


4.12 ii.

Σχήμα 4.12: Απεικόνιση συγκεκριμένου τμήματος ξηράς του νησιού (4.12 i) και ο αντίστοιχος μετασχηματισμός του στο χώρο των φάσεων (4.12 ii). Οι τιμές των συχνοτήτων μεταβάλλονται για

διαφορετική πυκνότητα βλάστησης: όσο πυκνότερη η κατανομή δένδρων τόσο μεγαλύτερη η τιμή της πυκνότητας.

Ολοκληρώνοντας επομένως την παραπάνω διαδικασία μπορούμε να κατασκευάσουμε τον πίνακα πυκνότητας βλάστησης των Σπετσών και μέσω του Matlab να λάβουμε την απεικόνισή του (Σχήμα 4.11). Έχουμε δηλαδή το περιβάλλον του προβλήματος με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για την προσομοίωση.



Σχήμα 4.13: Διαμέριση των Σπετσών με βάσει την πυκνότητα της βλάστησης. Στο υπόμνημα: 0=άγωνα, 1=αραιή βλάστηση, 2=κανονική βλάστηση, 3=πυκνή βλάστηση. Η γκρι περιοχή (4) αντιστοιχεί στην πόλη των Σπετσών.

4.4. Εφαρμογή του μοντέλου Κυτταρικού Αυτόματου για τις Σπέτσες

Έχοντας ολοκληρώσει όλη την προηγούμενη διαδικασία μελέτης των γεωλογικών και γεωγραφικών δεδομένων των Σπετσών μπορούμε πλέον να εφαρμόσουμε το μοντέλο του κυτταρικού αυτόματου για την προσομοίωση της επέκτασης της φωτιάς. Έχουμε δηλαδή στη διάθεσή μας όλες τις απαραίτητες πληροφορίες:

- Τις μετεωρολογικές συνθήκες της συγκεκριμένης μέρας κατά την οποία ξέσπασε η φωτιά στο νησί (*Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία*): νότια κατεύθυνση του ανέμου με ταχύτητα 8-10 m/s.
- Τους πίνακες της πυκνότητας και του είδους της βλάστησης. Οι τιμές των αντίστοιχων πιθανοτήτων είναι εμπειρικές, βάσει των γενικών συνθηκών στην περιοχή και περιλαμβάνουν τις απαραίτητες πληροφορίες υγρασίας, θερμοκρασίας, βλάστησης (*Alexandridis et al., 2008*) και έχουν ως εξής:

- ο Πυκνότητα βλάστησης:

αραιή: $p_d = -0.4$

κανονική: $p_d = 0$

πυκνή: $p_d = 0.3$

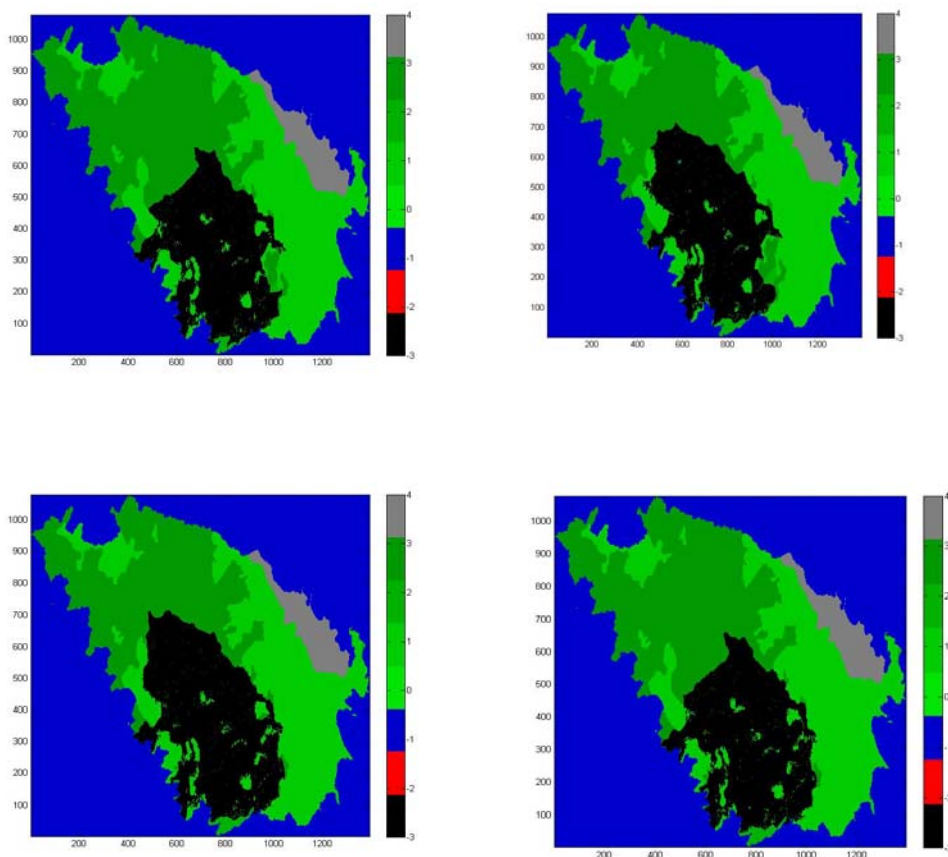
- ο Είδος βλάστησης:

γεωργικές καλλιέργειες: $p_{veg} = -0.3$

θαμνώδη: $p_{veg} = 0$

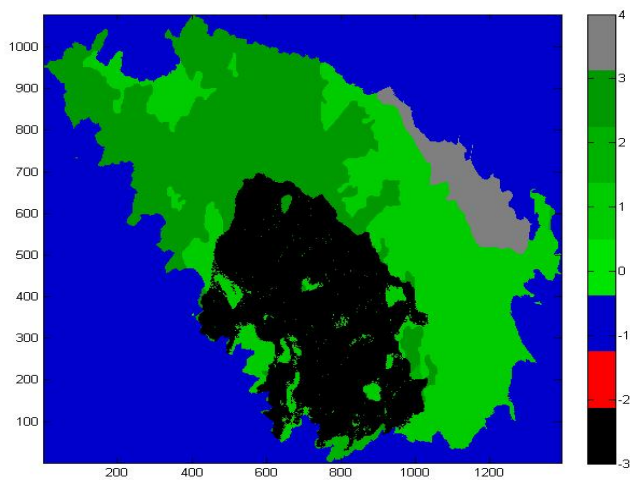
πεύκα: $p_{veg} = 0.4$

Εφαρμόζουμε, λοιπόν, το μοντέλο του κυτταρικού αυτόματου, θέτοντας την αρχική συνθήκη έναρξης της φωτιάς στο κέντρο του νησιού, περίπου όπως συνέβη και στην πραγματικότητα. Ο κανόνας εξελίσσεται και ολοκληρώνεται δίνοντας την απεικόνιση της τελικά καμένης έκτασης. Στο Σχήμα 4.14 απεικονίζεται η τελικά καμένη έκταση από την επανάληψη εφαρμογής του μοντέλου – σε κάθε περίπτωση η φωτιά ακολουθεί την ίδια κατεύθυνση και η καμένη έκταση έχει το ίδιο σχήμα, γεγονός που μας επιτρέπει να συμπεράνουμε τη συνέπεια των αποτελεσμάτων που δίνει το μοντέλο.



Σχήμα 4.14: Παραδείγματα αποτελεσμάτων της τελικά καμένης έκτασης ύστερα από διαφορετικές επαναλήψεις του μοντέλου. Παρατηρούμε πως σε κάθε περίπτωση η φωτιά διαδίδεται στην ίδια περιοχή.

Επομένως, ας παρατηρήσουμε το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης της συγκεκριμένης πυρκαγιάς στις Σπέτσες.

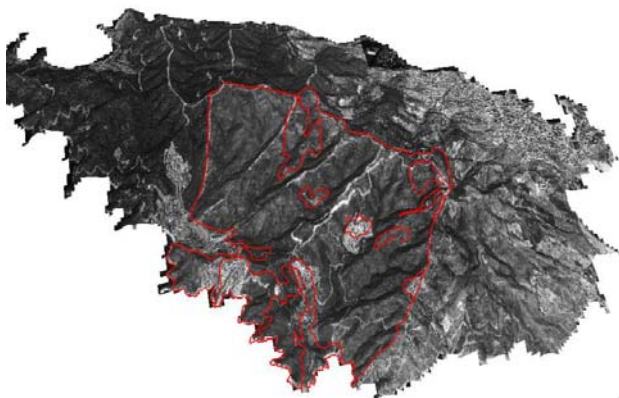


Σχήμα 4.15: Προσομοίωση καμένης έκτασης.

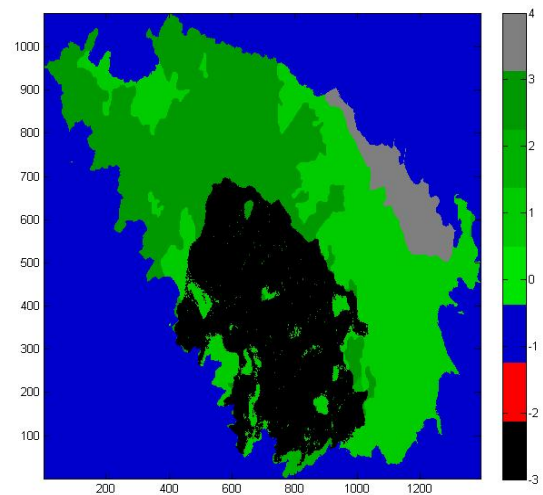
Από την παραπάνω εικόνα (Σχήμα 4.15) μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- ✓ Η φωτιά διαδόθηκε προς το νότιο μέρος του νησιού, κάτω από την επίδραση των ανέμων που έπνεαν στην περιοχή.
- ✓ Η κλίση του εδάφους επηρέασε την κατεύθυνση διάδοσης της φωτιάς: το μέτωπο κατευθύνθηκε μέχρι το μέσο του νησιού όπου, όπως παρατηρούμε κι από τα σχήμα 4.3 και 4.7, βρίσκεται το μεγαλύτερο υψόμετρο. Πέρα από αυτή την περιοχή, εξαιτίας της διαφορετικής κλίσης του εδάφους («κατηφορική» - που συνεπάγεται μικρότερη πιθανότητα μετάδοσης) η φωτιά δεν επεκτάθηκε κι άφησε ανεπηρέαστη την εκεί περιοχή.

Στο Σχήμα 4.16 συγκρίνουμε το αποτέλεσμα της προσομοίωσης με τα πραγματικά στοιχεία που έχουμε για την έκταση της φωτιάς και την τελικά καμένη περιοχή από τις τοπικές Αρχές (Alexandridis et al., 2008).



Σχήμα 4.16. i) Απεικόνιση καμένης έκτασης στην πραγματικότητα (Πηγή: Alexandridis et al., 2008).



Σχήμα 4.16.ii) Απεικόνιση καμένης έκτασης ύστερα από την προσομοίωση.

Η περιοχή διάδοσης της φωτιάς, όπως αυτή υπολογίστηκε από το μοντέλο κυτταρικού αυτόματου, προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματική κατάσταση. Η επάρκεια, λοιπόν, της μεθόδου επαληθεύεται. Συμπεραίνουμε λοιπόν πως μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τη μέθοδο για την πρόβλεψη της διάδοσης της φωτιάς σε οποιαδήποτε άλλη αντίστοιχη περίπτωση εάν έχουμε στη διάθεσή μας τα απαραίτητα δεδομένα (γεωγραφικά, μετεωρολογικά δεδομένα κλπ). Ωστόσο, πιο αξιόπιστο αποτέλεσμα θα υπάρξει, εάν στο μοντέλο προστεθεί κι άλλος ένας πολύ σημαντικός

παράγοντας, αυτός του τυχαίου φαινομένου (spotting effect). Η δημιουργία ενός μετώπου φωτιάς μακριά από το κυρίως είναι «κανόνας» σε περιπτώσεις πυρκαγιών, όπως στις Σπέτσες, όπου μεγάλο μέρος της φλεγόμενης περιοχής είναι πευκόδασος και εύκολα παρατηρούνται εκτινάξεις καμένων κουκουναριών σε πιο μακρινά σημεία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΕΠΙΛΟΓΟΣ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Στην παρούσα εργασία για τη μελέτη της διαδικασίας διάδοσης μιας φωτιάς χρησιμοποιήθηκαν διάφορα υπολογιστικά μοντέλα Κυτταρικών Αυτομάτων. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι χρήσιμα τόσο για την κατανόηση και καλύτερη προσέγγιση της διάδοσης της φωτιάς, όσο και για την εξέλιξη τέτοιων μοντέλων στην εφαρμογή τους σε πραγματικά γεγονότα μεγάλης κλίμακας, σε συνδυασμό με άλλα προγράμματα, όπως τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα.

Αρχικά μελετήθηκε ένα μοντέλο Κυτταρικού Αυτόματου τετραγωνικού πλέγματος, με 8 γείτονες – πιθανές θέσεις διάδοσης της φωτιάς – όπου κάθε κελί δύναται να έχει 3 διαφορετικές καταστάσεις και η εξέλιξή του στο χρόνο, βάσει των κανόνων διάδοσης, μας δίνει τα χαρακτηριστικά της εξάπλωσης της φωτιάς. Επιπλέον χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι πως η τιμή της πιθανότητας διάδοσης της φωτιάς περιλαμβάνει το σύνολο των παραγόντων που επηρεάζουν αυτή τη διαδικασία. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν δυο μοντέλα με διαφορετική προσέγγιση της αλληλεπίδρασης του συστήματος δάσος – φωτιά: ένα μοντέλο Κυτταρικού Αυτόματου για τη μετάδοση της φωτιάς με αλληλεπίδραση «στοιχείου» προς «στοιχείου» και ένα με μη γραμμική αλληλεπίδραση των στοιχείων του. Η μελέτη των δυο αυτών μοντέλων δείχνει πως και τα δύο παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά, δημιουργώντας μια ραγδαία μεταβολή στην κατάσταση του συστήματος (phase transition) γύρω από κάποια τιμή της πιθανότητας διάδοσης (κρίσιμη τιμή του συστήματος). Επιπλέον εξετάστηκε η σχέση μεταξύ της πυκνότητας δάσους και της πιθανότητας διάδοσης της φωτιάς και στα δύο μοντέλα και αποδείχτηκε η αντίστροφη εξάρτησή τους: για μεγαλύτερες τιμές της πυκνότητας βλάστησης ενός δάσους, το σύστημα δάσος – φωτιά αποκτά μικρότερη τιμή της κρίσιμης τιμής της πιθανότητας διάδοσης της φωτιάς.

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε ένα μοντέλο Κυτταρικού Αυτόματου σε συνδυασμό με Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα για την προσομοίωση ενός πραγματικού γεγονότος: τη φωτιά που ξέσπασε στο νησί των Σπετσών τον Αύγουστο του 1990 με αποτέλεσμα την καταστροφή του μεγαλύτερου δασικού μέρους του. Η εφαρμογή αυτή σε ένα σύστημα μεγάλης κλίμακας έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς συνδυάζει πλήθος μεθόδων και διαφορετικών συστημάτων. Για την ανάκτηση των τοπογραφικών δεδομένων του νησιού χρησιμοποιήθηκε η υψομετρική βάση δεδομένων του προγράμματος Google Earth σε συνδυασμό με ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Global Mapper. Έπειτα για την χαρτογράφηση της πυκνότητας βλάστησης των Σπετσών εφαρμόστηκαν τεχνικές επεξεργασίας εικόνας

(Image Processing) με χρήση του Συνημιτονοειδούς Μετασχηματισμού Fourier. Με την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας το μοντέλο εφαρμόστηκε και τα υπολογιστικά αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης συγκρίθηκαν με τα πραγματικά δεδομένα από την φωτιά στις Σπέτσες. Η σύγκριση αυτή ανέδειξε την επάρκεια και αξιοπιστία του Κυτταρικού Αυτόματου να μοντελοποιεί σε πολύ μεγάλο ικανοποιητικό βαθμό τη δυναμική της διάδοσης της φωτιάς.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί πως το μοντέλο θα είναι πιο ολοκληρωμένο δίνοντας αποτελέσματα με ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια εάν συνυπολογιστεί και μοντελοποιηθεί η επίδραση τυχαίων φαινομένων στην ανάπτυξη και εξέλιξη μιας πυρκαγιάς. Τέτοια φαινόμενα είναι η επίδραση ενός κεραυνού ή η δημιουργία εστιών φωτιάς μακρύτερα από το κυρίως μέτωπο από την εκτίναξη φλεγόμενων αντικειμένων ή κουκουναριών – σύνηθες στην περίπτωση πευκοδάσους όπως στις Σπέτσες.

Εν κατακλείδι, η χρήση της μεθόδου αναδεικνύεται σε ιδιαίτερα σημαντική σε περιπτώσεις μελλοντικών πυρκαγιών. Σε πραγματικό χρόνο η εφαρμογή του μοντέλου μπορεί να βοηθήσει στον υπολογισμό της κατεύθυνσης του μετώπου καθώς και του χρόνου εξάπλωσης της φωτιάς, δίνοντας τη δυνατότητα καλύτερης κατανομής των εναέριων και χερσαίων δυνάμεων που επιχειρούν στην περιοχή, έγκαιρης εκκένωσης οικισμών και αποφυγής εγκλωβισμού τόσο πολιτών όσο και πυροσβεστών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

F. A. Albini, *A model for fire spread in wildland fuels by radiation*, Combustion Science and Technology 16, 9-16 (1985).

F. A. Albini, *Wildland fire spread by radiation - a model including fuel cooling by natural convection*, Combustion Science and Technology 45, 101-113 (1986).

F.A. Albini, J.K Brown. *Mathematical modelling and predicting wildland fire effects*, Combustion, Explosion and Shock waves 32, 520-533 (1996).

A. Alexandridis, D. Vakalis, C.I. Siettos, G.V. Bafas, *A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990*, Applied Mathematics and Computation 204, 191-201 (2008).

A. Alexandridis, L. Russo, D. Vakalis, G. V. Bafas, C. I. Siettos, *Wildland fire spread modelling using cellular automata: evolution in large-scale spatially heterogeneous environments under fire suppression tactics*, International Journal of Wildland Fire 20, 633-647 (2011).

M.I. Asensio, L. Ferragut, J. Simon, *A convection model for fire spread simulation*, Applied Mathematics Letters 18, 673-677 (2005).

Associated Press. *NASA Image of Fires in Greece*, 30 Αυγούστου 2007.

P.G. Baines, *Physical mechanisms for the propagation of forest fires*, Mathematical and Computer Modelling 13, 83-94 (1990).

S. G. Berjak, J. H. Hearne, *An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system*, Ecological Modelling 148, 133-151 (2002).

W. Catchpole, R. Bradstock, J. Choate, L. Fogarty, N. Gellie, G. McCarthy, L. McCaw, J. Marsden-Smedley, G. Pearce, *Cooperative development of equations for heathland fire behaviour*. In: Viegas, D.X. (Ed.), *Proceeding of the Third International Conference on Forest Fire Research/14th Fire and Forest Meteorology Conference*, Luso, ADAI, University of Coimbra, Coimbra, 631-645 (1998).

R. Casagrandi, S. Rinaldi, *A Minimal Model for Forest Fire Regimes*, The American Naturalist 25, 98-123 (1999).

H.M. Cekirge, *Propagation of fire fronts in forest*, Computers and Mathematics with Applications 4, 325-332 (1978).

S. Clar, K. Schenk, F. Schwabl, *Phase transitions in a forest-fire model*, Physical Review E 55, 2174-2183 (1997).

S. El Yacoubi and A. El Jai, *Cellular Automata Modelling and Spreadability*, Mathematical and Computer Modelling 36, 1059-1074 (2002)

A.H. Encinas, L.H. Encinas, S.H. White, A.M. del Rey, G.R. Sanchez, *Simulation of forest fire fronts using cellular automata*, Advances in Engineering Software 38, 372-378 (2007).

P. Fernandes, *Fire spread prediction in shrub fuels in Portugal*. Forest Ecology and Management 144, 67-74 (2001).

W. Fons. *Analysis of fire spread in light forest fuels*, Journal of Agricultural Research 72, 93-121 (1946).

M.D. Flannigan and B.M. Wotton, Climate, weather and area burned, in E.A. Johnson and K. Miyanishi (Eds.), *Forest Fires: Behavior & Ecological Effects*, Academic Press, 335-337 (2001).

W.H. Frandsen, *Fire spread through porous fuels from the conservation of energy*, Combustion and Flame 16, 9-16 (1971).

D. G. Green, A. Tridgell and A.M Gill, *Interactive simulation of bushfires in heterogeneous fuels*, Mathematical and Computer Modelling 13, 57-66 (1990).

Jet Propulsion Laboratory, *Shuttle Radar Topography Mission*, California Institute of Technology, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>

E.A. Johnson. *Fire and Vegetation Dynamics*. Cambridge University Press, Cambridge (1992).

I. Karafyllidis, A. Thanailakis, *A model for predicting forest fire spreading using cellular automata*, Ecological Modelling 99, 87-97 (1997).

I. Karafyllidis, *Design of a dedicated parallel processor for the prediction of forest fire spreading using cellular automata and genetic algorithms*, Engineering Applications of Artificial Intelligence 17(1), 19-36 (2004).

M. Larini, F. Giroud, B. Porterie, J. Loraud, *A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media*. International Journal of Heat and Mass Transfer 41, 881-897 (1998).

M.F. Letelier S., J. Valdivia, H.J. Leutheusser, *An analytical model of the wind-induced spread of forest fires*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 30, 215-219 (1988).

X. Li, W. Magill, *Modeling fire spread under environmental influence using a cellular automaton approach*, Complexity International 8, 1-14 (2001).

R.R. Linn and P. Cunningham, *Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere–fire model: Basic fire behavior and dependence on wind speed*. Journal of Geophysical Research 110, 19 (2005).

J.B. Marsden-Smedley and W.R. Catchpole, *Fire behaviour modelling in Tasmanian buttongrass moorlands II. Fire behaviour*. International Journal of Wildland Fire 5, 215-228 (1995).

MATLAB Image Processing Toolbox,
<http://www.mathworks.com/help/toolbox/images/>

A. McAndrew, *An Introduction to Digital Image Processing with MATLAB*, Victoria University of Technology (2010).

F. Morandini, P.A. Santoni, J.H. Balbi, *The contribution of radiant heat transfer to laboratory-scale fire spread under the influences of wind and slope*, Fire Safety Journal 36, 519-543 (2001).

D. Morvan, J.L. Dupuy, *Modeling of Fire Spread Through a Forest Fuel Bed Using a Multiphase Formulation*, Combustion and Flame 127, 1981-1994 (2001).

J. Von Neumann, *The theory of self-reproducing automata*, University of Illinois Press, Urbana IL 388 (1966).

E. Pastor, L. Zarate, E. Planas, J. Arnaldos, *Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour*, Progress in Energy and Combustion Science 29, 139-153 (2003).

R. Rothermel, *A mathematical Model for predicting fire spread in wildland fuels*. US Department. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station (1972).

R. Rothermel, *How to predict the spread and intensity of forest fire and range fires*. US Department. of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment (1983).

O. Sèro-Guillaume , J. Margerit, *Modelling forest fires. Part I: a complete set of equations derived by extended irreversible thermodynamics*, International Journal of Heat and Mass Transfer 45, 1705-1722 (2002).

B.J. Stocks, M.E. Alexander, R.A. Lanoville, *Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME)*. Canadian Journal of Forest Research 34, 1543-1547 (2004).

A.L. Sullivan. *A review of wildland fire modeling, 1990-present, 1: Physical and quasi-physical models*, International Journal of WildLand Fire 18, 349-368 (2009).

A.L. Sullivan, *A review of wildland fire spread modelling, 1990-present 2: Empirical and quasi-empirical models*, Int. J. WildLand Fire 18, 369-386 (2009).

A.L. Sullivan, *A review of wildland fire spread modelling, 1990-present 3: Mathematical analogues and simulation models*. Int. J. WildLand Fire 18, 387-403 (2009).

D. Vakalis, H. Sarimveis, C. Kiranoudis, A. Alexandridis, G. V. Bafas, *A GIS based operational system for wildland fire crisis management I. Mathematical modelling and simulation*, Applied Mathematical Modelling 28, 389-410 (2004).

D. Vakalis, H. Sarimveis, C. Kiranoudis, A. Alexandridis, G. Bafas, *A GIS based operational system for wildland fire crisis management II. System architecture and case studies*, Applied Mathematical Modelling 28, 411-425 (2004).

S.D. Watt, A.J. Roberts and R.O. Weber, *Dimensional Reduction of a bushfire model*, Mathematical and Computer Modelling 21, 79-83 (1995).

R.O. Weber, *Analytical models for fire spread due to radiation*. Combustion and Flame 78, 398-408 (1989).

D.R. Weise, G.S. Biging, *Effects of wind velocity and slope on flame properties*, Canadian Journal of Forest Research 26, 1849-1858 (1996).

D.R. Weise, G.S. Biging, *A Qualitative Comparison of Fire Spread Models Incorporating Wind and Slope Effects*, Forest Science 43, 170-180 (1997).

S. Wolfram, *Universality and Complexity in Cellular Automata*, Physica D: Nonlinear Phenomena 10, 1-35 (1984).

S. Wolfram, *Computation Theory of Cellular Automata*, Springer-Verlag, Communications in Mathematical Physics 96, 15-57 (1984).

S. Yassemi, S. Dragicevic, M. Schmidt, *Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behavior*, Ecological Modelling 210, 71-84 (2008).

Z. Yongzhong, E. Youhao, H. Tao, Z. Songbing, W. Jihe, *A CA-based information system for surface fire spreading simulation*, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05. Proceedings. 2005 IEEE International (2005).