ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ: ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ:ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και διαχείριση του χώρου

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ Γ: ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

Τίτλος Εργασίας: Τεχνολογίες Γεωπληροφορικής για την παρακολούθηση της αναγέννησης του φυσικού τοπίου μετά από μια δασική πυρκαγιά με την αξιοποίηση δεδομένων παρατήρησης γης και ΣΓΠ.

Μεταπτυχιακή εργασία

ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ:ΙΩΑΝΝΑ ΤΖΙΜΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΧΑΛΚΙΑΣ Χ.

ΑΘΗΝΑ, 2022

HAROKOPIO UNIVERSITY

SCHOOL: Harokopeio University

DEPARTMENT: Department of Geography

POSTGRADUATE PROGRAMME : Applied Geography and Spatial Management

COURSE: Geoinformatics

Title: Geoinformatics technologies for monitoring natural landscape regeneration after a forest fire using earth observation and GIS data.

Master Thesis

Ioanna Tzima

Athens,2022

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ: ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ:ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ: Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και διαχείριση του χώρου

ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ Γ: ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή [ΧΑΛΚΙΑΣ ΠΕΤΡΟΠΟΥΛΟΣ ΚΑΤΣΑΦΑΔΟΣ]

Όνομα Πρώτου Καθηγητή (Επιβλέπων) [Χαλκιάς Χ.]

Βαθμίδα, Τμήμα, Ίδρυμα

Όνομα Δεύτερου Καθηγητή

Πετρόπουλος Γ.

Βαθμίδα, Τμήμα, Ίδρυμα

Όνομα Τρίτου Καθηγητή

Κατσαφάδος Π.

Βαθμίδα, Τμήμα, Ίδρυμα

Η Ιωάννα Τζίμα

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

1) Είμαι η κάτοχος των πνευματικών δικαιωμάτων της πρωτότυπης αυτής εργασίας και από όσο γνωρίζω η εργασία μου δε συκοφαντεί πρόσωπα, ούτε προσβάλει τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων.

2) Αποδέχομαι ότι η ΒΚΠ μπορεί, χωρίς να αλλάξει το περιεχόμενο της εργασίας μου, να τη διαθέσει σε ηλεκτρονική μορφή μέσα από τη ψηφιακή Βιβλιοθήκη της, να την αντιγράψει σε οποιοδήποτε μέσο ή/και σε οποιοδήποτε μορφότυπο καθώς και να κρατά περισσότερα από ένα αντίγραφα για λόγους συντήρησης και ασφάλειας.

3) Όπου υφίστανται δικαιώματα άλλων δημιουργών έχουν διασφαλιστεί όλες οι αναγκαίες άδειες χρήσης ενώ το αντίστοιχο υλικό είναι ευδιάκριτο στην υποβληθείσα εργασία.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Χαλκιά Χρήστο για την βοήθεια που προσέφερε, τον διδάσκοντα κύριο Πετρόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά του, καθώς και τους γονείς μου για την στήριξή τους για όλο το διάστημα αυτό.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ 7
Abstract 8
Κατάλογος Εικόνων 9
Κατάλογος Πινάκων 10
Κατάλογος Γραφημάτων 10
Κατάλογος Διαγραμμάτων 10
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή 12
1.1. Η σημασία των δασικών πυρκαγιών στο μεσογειακό οικοσύστημα της Ελλάδας 12
1.2. Στόχοι και συμβολή της διπλωματικής εργασίας 14
1.3. Δομή της εργασίας 14
Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 15
2.1. Δασικές Πυρκαγιές στην Ελλάδα 15
2.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών 21
2.3. Τεχνολογίες γεωπληροφορικής για την διαχείριση των δασικών πυρκαγιών 23
2.3.1: Επιχειρησιακά προϊόντα τηλεπισκόπησης 27
2.3.2. Εκτίμηση καμένων εκτάσεων 30
2.3.3. Παρακολούθηση αναβλάστησης 34
2.4Τελικές Παρατηρήσεις 40
Κεφάλαιο 3: Περιγραφή περιοχής μελέτης και δεδομένων 41
3.1 Εισαγωγή 41
3.2.Περιγραφή περιοχής μελέτης 41
3.2. Περιγραφή Δεδομένων 45
3.2.1.Δορυφορικά Δεδομένα 45
3.3.2.Χρήσεις γης (Corine) 47
3.3.3.Τοπογραφικά δεδομένα (ASTER DEM) 49
Κεφάλαιο 4: Μέθοδοι 50
4.1. Μεθοδολογία χαρτογράφησης καμένων περιοχών 50
4.1.1. Βήματα Προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας 50
4.1.2.Μεθοδολογία αποτύπωσης αναβλάστησης 61
4.1.3. Μεθοδολογία συσχετισμού με την τοπογραφία 62
4.1.4. Μεθοδολογία συσχετισμού με το NBR 64
Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα 66
5.1.Αξιολόγηση της χαρτογραφημένης καμένης περιοχής 66

5.2.Αξιολόγηση της αναβλάστησης του δασικού τοπίου 67
5.2.1. Στατιστική ανάλυση 70
5.3.Συσχετισμός αναβλάστησης με χαρακτηριστικά καμένης έκτασης 74
5.3.1.Τοπογραφία (slope, aspect) 74
5.3.2. Συσχέτιση Normalized Burn Ratio με την δασική αναγέννηση 79
Κεφάλαιο 6: Συζήτηση αποτελεσμάτων 82
6.1.Αξιολόγηση της αναβλάστησης της περιοχής 82
6.2.Συσχετισμός της αναβλάστησης με την κλίση και τον προσανατολισμό 86
Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα & Μελλοντικές κατευθύνσεις 88
7.1.Κύρια συμπεράσματα εργασίας 88
7.2.Κατευθύνσεις συνέχισης της εργασίας 89
8.Βιβλιογραφία 90

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η γεωπληροφορική επιτρέπει την αξιοποίηση των γεωχωρικών πληροφοριών άμεσα σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένης, της διαχείρισης των φυσικών καταστροφών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο να διερευνήσει την αναγέννηση του φυσικού τοπίου της Πάρνηθας μετά από την δασική πυρκαγιά του 2007, κατά την χρονική ακολουθία των 4-6 χρόνων, αξιοποιώντας τεχνολογίες γεωπληροφορικής. Πρώτος στόχος της εργασίας ήταν ο υπολογισμός των καμένων εκτάσεων με τη βοήθεια τεχνικών μηχανικής μάθησης και δορυφορικών δεδομένων Landsat 5 και Landsat 8. Επόμενος στόχος, αποτέλεσε η αποτύπωση της αναβλάστησης της καμένης περιοχής, ενώ τρίτος και τελευταίος στόχος ήταν την μελέτη της αναβλάστησης συναρτήσει χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα της τοπογραφίας.

Όπως προέκυψε, η έκταση της βλάστησης από 42,3603 τετραγωνικά χιλιόμετρα, απέμεινε στα 0,0054, με το ποσοστό καταστροφής να ανέρχεται στο 90%. Τα αποτελέσματα παρουσίασαν έναν σχετικά καλό αλλά αργό ρυθμό αναβλάστησης, καθώς κατά την πρώτη ημερομηνία μετά την πυρκαγιά η βλάστηση είχε επανέλθει στο 60%, ενώ τις επόμενες ημερομηνίες ήταν μόλις στο 20%, επιβεβαιώνοντας μια συστηματική επιστροφή στις υπάρχουσες συνθήκες προ πυρκαγιάς. Σημαντικός παράγοντας που επηρέασε την αναγέννηση ήταν ο ρυθμός της βροχόπτωσης, ο οποίος ήταν ιδιαίτερα χαμηλός την τελευταία χρονιά με αποτέλεσμα η αναβλάστηση να κυμαίνεται στο 78%. Κατά την συσχέτιση με την τοπογραφία προέκυψε ότι οι ρυθμοί της εκ νέου ανάπτυξης ήταν υψηλότεροι στις πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό σε σύγκριση με τις νότιες. Στις βόρειες πλάγιες οι μέγιστη τιμή του δείκτη αναβλάστησης, 4 χρόνια μετά την πυρκαγιά, ήταν 0,68 ενώ στις νότιες 0,65. Αυτή η διαφορά συνεχίστηκε και τα επόμενα χρόνια. Η χαρτογράφηση της καμένης έκτασης από τις δορυφορικές εικόνες όπως και η αποτύπωση της φυσικής αναγέννησης του τοπίου η οποία πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων (ΓΠΣ) προσφέρει πολύ σημαντική πληροφόρηση για την επαναφορά του φυσικού οικοσυστήματος και την προτεραιοποίηση αντίστοιχων δράσεων αναβλάστησης στην περιοχή. Επίσης, αποτελέσματα της εργασίας θα συμβάλλουν στην αξιολόγηση των οικολογικών και χωρικών επιπτώσεων της πυρκαγιάς και την καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν την αναγέννηση ενός φυσικού Μεσογειακού οικοσυστήματος.

Λέξεις κλειδιά: *αναβλάστηση, NBR, NDVI, γεωπληροφορική, τηλεπισκόπηση, ΣΓΠ, Landsat.*

Abstract

Geoinformatics allows geospatial information to be used directly in various areas, including natural disaster management.

This thesis aimed to investigate the regeneration of the natural landscape of Parnitha after the forest fire of 2007, during the time sequence of 4 years, using geoinformatics technologies. The first objective of the work was to calculate the burnt areas with the help of machine learning techniques and Landsat 5 and Landsat 8 satellite data. study area and specifically the topography.

As it turned out, the area of vegetation from 42.3603 square kilometers, remained at 0.0054, with the destruction rate reaching 90%. The results showed a relatively good but slow rate of regeneration, as on the first post-fire date the vegetation had recovered to 60%, while on subsequent dates it was only 20%, confirming a systematic return to pre-fire conditions. An important factor that affected the regeneration was the rate of precipitation, which was particularly low in the last year, resulting in the regrowth at 78%. Correlating with topography revealed that rates of regrowth were higher on north-facing slopes compared to south-facing slopes. On the northern slopes, the maximum value of the regrowth index, 4 years after the fire, was 0.68, while on the southern slopes it was 0.65. This difference continued in the following years.

The mapping of the burnt area from the satellite images as well as the mapping of the natural regeneration of the landscape, which was carried out in a Geographical Systems (GIS) environment, offers very important information for the restoration of the natural ecosystem and the prioritization of corresponding regeneration actions in the area. Also, results of the study will contribute to the evaluation of the ecological and spatial effects of the fire and a better understanding of the factors influencing the regeneration of a natural Mediterranean ecosystem.

Keywords: forest regeneration, NBR, NDVI, geoinformatics, remote sensing, GIS, Landsat.

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1.: Σύγκριση μεταξύ της ετήσιας καμένης έκτασης σε πέντε χώρες 18
Εικόνα 2.2.: Εστίες πυρκαγιών στην Ελλάδα το 2007 19
Εικόνα 2.3: Παράγοντες επιρροής επί των πυρκαγιών 22
Εικόνα 2.4: Το Ευρωπαϊκό σύστημα πληροφόρησης για τις δασικές πυρκαγιές.....28
Εικόνα 2.5: COPENICUS OPEN ACCESS HUB 29
Εικόνα 2.6: Παράδειγμα LIFE+ DEmORGEST 37
Εικόνα 3.1: Περιοχή μελέτης.....41
Εικόνα 3.2.: Χάρτης περιοχής μελέτης.....43
Εικόνα 3.2.: Η Πάρνηθα το 2022(Προσωπικό αρχείο)
Εικόνα 3.3:Η Πάρνηθα το 2022(Προσωπικό αρχείο) 44
Εικόνα 3.4.: Η Πάρνηθα το 2022(Προσωπικό αρχείο)
Εικόνα 3.5:Η Πάρνηθα το 2022(Προσωπικό αρχείο) 44
Εικόνα 3.7:Εικόνα 03-07-2007.....47
Εικόνα 3.8:Χάρτης καλύψεων γης (Corine Land Cover,2018).....48
Εικόνα 4.1: NDVI 06/2007.....54
Εικόνα 4.2 NDVI 07/2007.....55
Εικόνα 4.3: NDVI 2011.....56
Εικόνα 4.4: NDVI 2017.....57
Εικόνα 4.5: NDVI 2021.....58
Εικόνα 4.6: ROI που χρησιμοποιήθηκαν.....59
Εικόνα 4.7: Ταξινομημένη εικόνα 60
Εικόνα 5.1:Χαρτογράφηση καμένης περιοχής 66
Εικόνα 5.2:NDVI 06-2007
Εικόνα 5.3:NDVI 07-2007 69
Εικόνα 5.4:NDVI 2011
Εικόνα 5.5:NDVI 2017.....69
Εικόνα 5.6 :NDVI 2021.....69
Εικόνα 5.7:NDVI 08/2021 για βόρειες πλαγιές σε μοίρες
Εικόνα 5.8:NDVI 08/2021 για νότιες πλαγιές σε μοίρες 75
Εικόνα 5.9 :NBR 06/2007
Εικόνα 5.10:NBR 07/2007 80
Εικόνα 5.11:NBR 2011
Εικόνα 5.12:NBR 2017 80
Εικόνα 5.13:NBR 2021 80
Εικόνα 6.1:Χάρτης απεικόνισης σταθμών βροχόπτωσης 85

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1.: Κατανομή των αιτιών των πυρκαγιών στις χώρες της Μεσογείου 15
Πίνακας 3.1: Ημερομηνίες Landsat εικόνων της περιοχής μελέτης 46
Πίνακας 4.1: Ποσοτικά στοιχεία υψομέτρου, κλίσεων και προσανατολισμού.....64
Εξίσωση 4.2 65
Πίνακας 5.1: Στατιστικά NDVI 67
Πίνακας 5.2: Εμβαδόν δασοκάλυψης/ημερομηνία 70
Πίνακας 5.3: Στατιστικά NDVI 73
Πίνακας 5.4: Στατιστικά North/South facing slopes 74
Πίνακας 5.5: Στατιστικά R^2 North/South facing slopes 78
Πίνακας 5.6: Στατιστικά NBR.....79
Πίνακας 5.7: Συσχέτιση NDVI και NBR 81

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 5.1: Μεταβολή της δασοκάλυψης 2007-2021 70
Γράφημα 5.2 : *Διάγραμμα διασποράς* NDVI 06/2007-NDVI 07/2007 72
Γράφημα 5.3:Διάγραμμα διασπορώνNDVI 06/2007-NDVI 2011 72
Γράφημα 5.4:Διάγραμμα διασπορώνNDVI 06/2007-NDVI 2017 72
Γράφημα 5.5:Διάγραμμα διασποράς NDVI 06/2007-NDVI 2021 72
Γράφημα 5.7:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό 06/2007-07/2007 75
Γράφημα 5.8: Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό 06/2007-08/2011 76
Γράφημα 5.9:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό 06/2007-07/2017 76
Γράφημα 5.10:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό 06/2007-08/2021 76
Γράφημα 5.11:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με νότιο προσανατολισμό 06/2007-07/2007 77
Γράφημα 5.12:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με νότιο προσανατολισμό 06/2007-08/2011 77
Γράφημα 5.13:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με νότιο προσανατολισμό 06/2007-07/2017 77
Γράφημα 5.14: Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με νότιο προσανατολισμό 06/2007-08/2021 77
Γράφημα 6.1: Μηνιαίος ρυθμός βροχόπτωσης 2017-2021 84

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1: Βήματα προ – επεξεργασίας 51
Διάγραμμα 5.2 :Βήματα ανάλυσης 71

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	
ΣΓΠ	(Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφορίων)
NBR	(Normalized Burn Ratio)
NDVI	(Normalized difference vegetation index)
dNBR	(Differenced Normalized Burn Ratio)

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1. Η σημασία των δασικών πυρκαγιών στο μεσογειακό οικοσύστημα της Ελλάδας

Εκτός από τον παράγοντα των μεσογειακών κλιματικών συνθηκών που καθιστούν τις περιοχές επιρρεπείς σε πυρκαγιές, οι μεσογειακές περιοχές χαρακτηρίζονται και από περιοχές όπου η βλάστηση της άγριας περιοχής αναμειγνύεται με τους ανθρώπινους οικισμούς. Έτσι, στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και της δημογραφικής επέκτασης, υπάρχει αυξανόμενη επικινδυνότητα, καθώς οι περιοχές αυτές θεωρούνται συχνά ως ένας από τους κύριους παράγοντες κινδύνου πυρκαγιάς (Ganteaume et al, 2021).

Είναι γεγονός πως οι δασικές πυρκαγιές μαζί με την κλιματική αλλαγή και την ξηρασία θεωρούνται μια από τις κύριες διαταραχές που προκαλούν μεταξύ άλλων και την καταστροφή της βλάστησης (Vega et al., 2021). Οι δασικές πυρκαγιές, αποτελούν σημαντικό παράγοντα διατάραξης της οικολογικής κοινότητας, καθώς επηρεάζουν ετησίως εκατομμύρια εκτάρια δασικής γης σε όλο τον κόσμο. Είναι γεγονός πως θεωρούνται ως κύρια αιτία μείωσης της βιοποικιλότητας, απώλειας γονιμότητας του εδάφους, εκπομπής αερίων ρύπων και άλλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Zhenga et al, 2015). Μπορούν να προκαλέσουν εξαφανίσεις ειδών χλωρίδας και πανίδας αλλά και να μεταβάλλουν τη σύνθεση των ειδών αυτών. Παράλληλα, αποτελεί γεγονός πως πολλά είναι τα οικοσυστήματα στα οποία η πυρκαγιά έχει προκαλέσει σοβαρή υποβάθμιση, επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό την βλάστηση (Moore, 2005). Είναι γεγονός πως κάθε χρόνο σημειώνονται περισσότερες από 50,000 δασικές πυρκαγιές στην Ευρώπη, που πλήττουν πάνω από 500,000 εκτάρια δασικών και άλλων δασικών εκτάσεων (Twele and Barbosa, 2004).

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί ότι η εκδήλωση των πυρκαγιών σημειώνεται με μεγαλύτερη συχνότητα και ένταση, και ιδιαίτερα κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Πιο συγκεκριμένα η καταστροφική σειρά πυρκαγιών που συνέβησαν τα καλοκαίρια του 2007 και του 2009 στην Ελλάδα κατέστησε εμφανή την ανάγκη να αναπτυχθεί ένας επιχειρησιακός μηχανισμός χαρτογράφησης των καμένων περιοχών με ακριβή και έγκαιρο τρόπο (Polychronaki and Gitas, 2012). Ωστόσο, αποτελεί γεγονός, πως το φαινόμενο των πυρκαγιών αποτελεί έναν από τους σοβαρότερους κινδύνους που απειλούν τα μεσογειακά δάση, και έχει πλήξει την Ελλάδα και τα τελευταία χρόνια.

Οι πυρκαγιές του καλοκαιριού του 2021 στην Ελλάδα ήταν από τα πιο σοβαρά γεγονότα δασικών πυρκαγιών που έχουν σημειωθεί στη χώρα την τελευταία δεκαετία. Η περίοδος πυρκαγιάς διήρκεσε για 20 ημέρες (δηλαδή, από τις 27 Ιουλίου έως τις 16 Αυγούστου 2021) και είχε ως αποτέλεσμα την καταστροφή μιας περιοχής άνω των 3,600 τετραγωνικών χιλιομέτρων (Evelpidou et al., 2021).

Έτσι, τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα εφαρμόζονται διάφορες τεχνολογίες για την αντιμετώπιση των πυρκαγιών, όπως μοντέλα πρόβλεψης για την συμπεριφορά της κάθε πυρκαγιάς και αξιολόγησης της ανάκτησης της βλάστησης, τόσο στα πλαίσια ενεργειών για την πρόληψη των πυρκαγιών όσο και στην αντιμετώπιση αυτών (Βαλλάτου, 2016).

Η γνώση της δυναμικής της αναβλάστησης μετά από ένα ξέσπασμα πυρκαγιάς είναι απαραίτητη για την εκτίμηση των επιπτώσεων της πυρκαγιάς αλλά και για την κατανόηση των δυνάμεων που προκαλούν αλλαγές στα οικοσυστήματα μετά την πυρκαγιά (Petropoulos et al, 2014). Η ταχύτητα της ανάκτησης της βλάστησης μπορεί να ελέγξει την έκταση των διαφόρων περιβαλλοντικών, κοινωνικών, οικονομικών και πολιτικών επιπτώσεων, καθώς υπάρχουν αρκετές περιοχές που μπορεί να παρουσιάσουν πλήρη αποκατάσταση της βλάστησης μετά από μερικά χρόνια, ενώ άλλες δεν έχουν ακόμη ανακτηθεί πλήρως δεκαετίες μετά την πυρκαγιά.

Έτσι, είναι γεγονός πως οι πυρκαγιές μπορούν να επηρεάσουν δραματικά τις ιδιότητες του εδάφους και τον κύκλο των θρεπτικών ουσιών, αλλά η σωστή αποκατάσταση μιας φυτικής κοινότητας μετά την πυρκαγιά μπορεί να σταθεροποιήσει και να μετριάσει τις αρνητικές επιπτώσεις (Moyaa et al., 2019). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η μελέτη για την φυσική ανάκαμψη της ενδιάμεσης φάσης εδάφους-φυτών ‘’Pinus halepensis’’, η οποία μελέτη αποτέλεσε μια βιολογική προσέγγιση για τη συσχέτιση των ιδιοτήτων του εδάφους με την ανάκτηση της βλάστησης και τη σοβαρότητα των εγκαυμάτων. Στην μελέτη αυτή εξετάστηκαν ορισμένες χημικές ιδιότητες και βιολογικοί δείκτες (Moya et al., 2019). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρείχαν πληροφορίες για τον τρόπο με τον οποίο η σοβαρότητα της καύσης εκτάσεων πεύκης Χαλεπίου, ρυθμίζει τη φυσική ανάκτηση των φυτών που συνδέεται με τη βιοχημική και μικροβιολογική αντίδραση του εδάφους στη φωτιά. Η υψηλή σοβαρότητα των εγκαυμάτων περιόρισε την ανάκτηση φυσικής βλάστησης μειώνοντας τη βιολογική λειτουργικότητα του εδάφους (Moya et al., 2019).

Όπως έχει προκύψει η επιστήμη της τηλεπισκόπησης συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην επεξεργασία των δεδομένων που είναι απαραίτητα για την διαχείριση των φάσεων των καταστροφών (Α.Τάτσινας, 2017). Έτσι, οι τεχνικές παρατήρησης της γης έχουν χρησιμοποιηθεί ολοένα και περισσότερο ως ένα ευεργετικό εργαλείο για την παρακολούθηση διαφόρων πτυχών της πυρκαγιάς σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες.

1.2. Στόχοι και συμβολή της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως βασικό στόχο να μελετήσει την αναγέννηση του φυσικού τοπίου μετά από μια πυρκαγιά, βάσει της χαρτογράφησης της καμένης περιοχής με την βοήθεια τηλεπισκοπικών δεδομένων. Αυτά συνδυαστικά με τα **Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ)** θα συντελέσουν η παρακολούθηση ανάκτησης της βλάστησης της καμένης υπό μελέτη περιοχής.

Πρώτος στόχος της εργασίας είναι η αποτύπωση της πυρκαγιάς της περιοχής μελέτης που έχει επιλεγεί αλλά και ο υπολογισμός των καμένων εκτάσεων, καθώς και των αποτελεσμάτων της πυρκαγιάς στο δασικό οικοσύστημα. Δεύτερος και εξίσου βασικός είναι η παρατήρηση του ρυθμού της αναβλάστασης και η εκτίμηση της συμβολής της στην αποκατάσταση του φυσικού τοπίου βάσει της χρονικής ακολουθίας των πέντε με έξι χρόνων. Τρίτος και τελευταίος στόχος, αποτελεί η ανάλυση του φαινομένου της αναβλάστησης συναρτήσει της τοπογραφίας της περιοχής.

1.3. Δομή της εργασίας

Η εργασία περιλαμβάνει έξι βασικά κεφάλαια ανάλυσης, με το πρώτο να παρουσιάζει μια γενική εικόνα των δασικών πυρκαγιών αλλά και τους στόχους οπού θα καλύψει η εργασία. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση στην οποία αναλύονται οι δασικές πυρκαγιές στην Ελλάδα καθώς και οι παράγοντες που τις επηρεάζουν. Στο τρίτο κεφάλαιο, περιγράφεται η περιοχή μελέτης, τα δορυφορικά δεδομένα και η διαδικασία της προ – επεξεργασίας αυτών. Στα επόμενα δυο αναλύονται οι μέθοδοι χαρτογράφησης καμένων περιοχών και αποτύπωσης αναβλάστησης αλλά και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία. Στα τελευταία κεφάλαια, πραγματοποιείται η ανάλυση και συζήτηση των αποτελεσμάτων αλλά και μελλοντικές κατευθύνσεις.

Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1. Δασικές Πυρκαγιές στην Ελλάδα

Στην σημερινή εποχή έχει αποδειχθεί πως τα δάση είναι ζωτικής σημασίας για την ισορροπία των οικοσυστημάτων. Είναι γεγονός πως αποτελούν ένα πλούσιο οικοσύστημα με τεράστια σημασία, σύνθετο βιότοπο, βασικό παράγοντα για τον υδρολογικό κύκλο, αλλά και ευεργετική προσφορά στον σύγχρονο άνθρωπο. Ιδιαίτερα στην Μεσόγειο, έχουν ανθρώπινη συνιστώσα, καθώς κατά μέσο όρο οι άνθρωποι ευθύνονται για το 96% μιας πυρκαγιάς, είτε λόγω αμέλειας είτε εκ προθέσεως (Hernández, 2019). Οι πυρκαγιές αποτελούν φαινόμενο που είναι στενά συνδεδεμένο με την διαταραχή των δασών, όπου ως πυρκαγιά εννοούμε την ανεξέλεγκτη φωτιά που μπορεί να αποφέρει καταστροφικές συνέπειες. Ωστόσο, οι πυρκαγιές που ξεσπούν κάθε χρόνο στις μεσογειακές χώρες έχουν καταστροφικές συνέπειες τόσο σε περιβαλλοντικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Έχει παρατηρηθεί πως κατά μέσο όρο σημειώνονται 65,000 πυρκαγιές ετησίως στην Ευρώπη και πιο συγκεκριμένα οι 45,000 δασικές πυρκαγιές εντοπίζονται στη νότια Ευρώπη, καίγοντας περίπου 0,5 εκατομμύρια εκτάρια δασών και άλλων αγροτικών εκτάσεων, με το μεγαλύτερο τμήμα των καμένων εκτάσεων να σημειώνονται στην περιοχή της Ελληνικής Μεσογείου και ιδιαίτερα, στην Ελλάδα (San-Miguel-Ayanz,2012). Όπως γίνεται αντιληπτό από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2.1), στην περιοχή της Μεσογείου οι πυρκαγιές κατά κύριο λόγο οφείλονται σε ανθρωπογενή αίτια, ενώ μεγάλο είναι και το πλήθος αυτών που είναι σκόπιμες.

Πίνακας 2.1.: Κατανομή των αιτιών των πυρκαγιών στις χώρες της Μεσογείου
(Πηγή: http://awsassets.panda.org/downloads/wwf__the_mediterranean_burns_2019_eng_final.pdf)

	Ολικές Πυρκαγιές		**Πυρκαγιές από ανθρώπινα αίτια**		
	%Λόγω φυσικών αιτίων	%Λόγω ανθρωπίνων αιτιών	%σκόπιμες πυρκαγιές	%εξ αμέλειάς	%λόγω άγνωστης αιτίας
Ισπανία	4	96	55	23	15
Γαλλία	2	98	21	77	<10
Ελλάδα	4	96	19	21	51
Ιταλία	1	99	26	54	19
Πορτογαλία	1	99	26	19	54
Τουρκία	11	89	9	47	31

Μ.Ο.	4	96	26	40	28

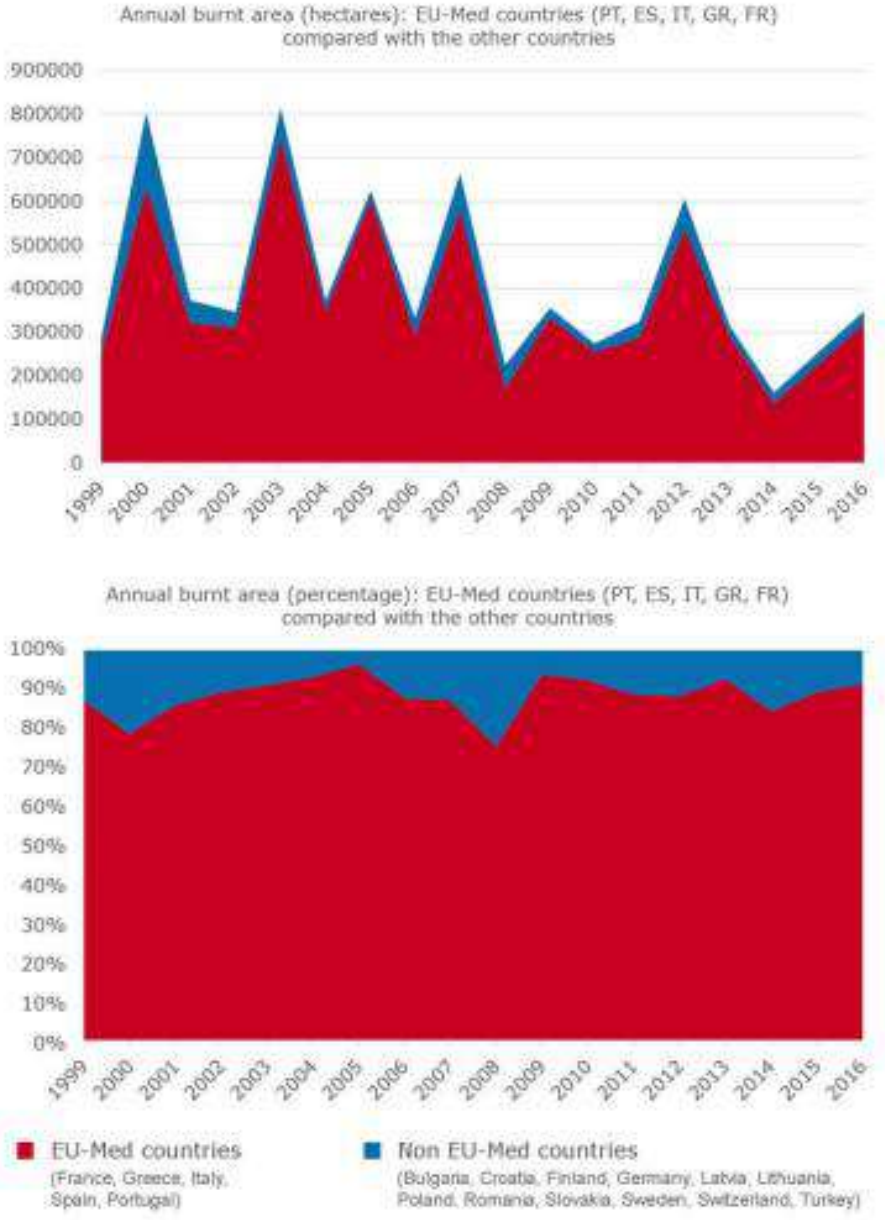
Έτσι, γίνεται κατανοητό πως οι δασικές πυρκαγιές είναι από τους μεγαλύτερους εχθρούς για την διατήρηση και την παραγωγικότητα των δασών, καθώς αποτελεί τον βασικό παράγοντα που επηρεάζει πιο γρηγορά από οτιδήποτε άλλο τα δάση. Όπως έχει καταστεί σαφές, οι πυρκαγιές δρουν ριζικά στις αλλαγές των δασών. Παράλληλα, έχουν ισχυρή επίδραση σε κάθε τύπο οικοσυστήματος καθώς συσχετίζονται με διαφορετικές αιτίες και επιδράσεις. Αυτό συμβαίνει, καθώς πολλές φορές συχνά αποτελούν ένα καταλυτικής σημασίας διαχειριστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται μακροπρόθεσμα ή βραχυπρόθεσμα για την τροποποίηση του τοπίου και την αλλαγή των χρήσεων γης (ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ, 2011).

Παράλληλα, υπάρχει αυξανόμενη ανησυχία για τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις των πυρκαγιών, ιδίως υπό το κλίμα αλλαγής του κλίματος που συνεπάγεται αύξηση της συχνότητας και της σοβαρότητας των πυρκαγιών στις ευρωπαϊκές χώρες στο μέλλον. Όσον αφορά σε επίπεδο τοπίου, η ανάφλεξη και η εξάπλωση των πυρκαγιών προέρχονται από μια πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ πηγών ανάφλεξης, καιρού, τοπογραφίας και κάλυψης εδάφους (Bilgili et al., 2011). Είναι γεγονός πως οι ζημιές που ενδέχεται να προκληθούν από πυρκαγιές έχουν τεράστιες διαστάσεις και συχνά μακροπρόθεσμες συνέπειες. Είναι γεγονός πως η ισχυρή εμπορευματοποίηση και οι καταναλωτικές συνήθειες της σύγχρονης κοινωνίας επηρεάζουν τον άνθρωπο και τον απομακρύνουν να κατανοήσει τις απώλειες που προκαλούνται από μια δασική πυρκαγιά, τόσο από οικολογική άποψη όσο και από κοινωνικοοικονομική άποψη (Bivolarski, 2019).

Είναι γεγονός πως το 2015, πυρκαγιές έπληξαν 98 εκατομμύρια εκτάρια δασών παγκοσμίως. Αν και οι περισσότερες από τις ετήσιες καμένες εκτάσεις βρίσκονται σε τροπικές περιοχές, τα εύκρατα δάση επηρεάζονται επίσης από τις πυρκαγιές. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, για παράδειγμα, η ετήσια καμένη έκταση λόγω πυρκαγιών αυξήθηκε κατά πάνω από 5% ετησίως κατά την περίοδο 1991–2015. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφοριών Δασικών Πυρκαγιών (EFFIS), το 58% της συνολικής καμένης έκτασης στην Ευρώπη το 2018 ήταν σε δάση και άλλες δασώδεις εκτάσεις, όπως προσδιορίζεται από το σύστημα ταξινόμησης τύπου κάλυψης γης CORINE. Επιπλέον, η κλιματική αλλαγή προβλέπεται ότι θα προκαλέσει αύξηση της

συχνότητας των κυμάτων καύσωνα, των ξηρών περιόδων και, κατά συνέπεια, της ξηρασίας, ιδιαίτερα στη νότια Ευρώπη. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την επιδείνωση της διάρκειας και της σοβαρότητας της περιόδου πυρκαγιάς στις περιοχές που κινδυνεύουν καθώς και της πιθανότητας μεγάλων πυρκαγιών (Vigna et al, 2021).

Αξίζει να σημειωθεί πως οι δασικές εκτάσεις ανά τον κόσμο καλύπτουν περίπου 215 εκατομμύρια εκτάρια, ενώ η Ευρώπη αποτελεί τα 36 εκατομμύρια εκτάρια που καλύπτονται από δασώδεις εκτάσεις, με αποτέλεσμα να αποτελεί το ένα τρίτο της συνολικής γης. Τα τελευταία χρόνια, μεγάλες δασικές πυρκαγιές έχουν πλήξει επανειλημμένα την Ευρώπη, ιδίως τις μεσογειακές χώρες. Μόνο το 2010, οι πυρκαγιές ήταν υπεύθυνες για τη ζημιά 0,5 εκατομμυρίου εκταρίων στα δάση. Τα διαθέσιμα δεδομένα για συγκεκριμένες χώρες υπογραμμίζουν τη μεταβλητότητα των δασικών πυρκαγιών σε χρόνο και χώρο. Κατά το τρέχον έτος 2017, τον Νοέμβριο η συνολική καμένη έκταση μόνο της Πορτογαλίας, της Ισπανίας και της Ιταλίας ξεπέρασε τα 0,8 εκατομμύρια εκτάρια. Στο σχήμα 2.1 παρακάτω γίνεται ευδιάκριτη η σύγκριση μεταξύ της ετήσιας καμένης έκτασης σε πέντε χώρες (Πορτογαλία, Ισπανία, Ιταλία, Ελλάδα και Γαλλία) και σε άλλες 12 χώρες, όπου η μεταβλητότητα των ζημιών από πυρκαγιά είναι εμφανής ενώ επηρεάζεται και από τις καιρικές συνθήκες (Libertà et al, 2017). Στο πρώτο γράφημα φαίνεται η ετήσια καμένη έκταση πέντε χωρών της ΕΕ (Γαλλία, Ελλάδα, Ιταλία, Πορτογαλία, Ισπανία) και 12 άλλες χώρες (Βουλγαρία, Κροατία, Φινλανδία, Γερμανία, Λετονία, Λιθουανία, Πολωνία, Ρουμανία, Σλοβακία, Σουηδία, Ελβετία, Τουρκία), ενώ στο δεύτερο ποσοστό καμένης επιφάνειας ανά έτος, όπου το 100% αντιπροσωπεύει τη συνολική ετήσια καμένη έκταση και των 17 χωρών. Όπως είναι ευδιάκριτο, την χρονική περίοδο 2003-2005 οι πυρκαγιές κατέστρεψαν έως και 800.000 εκτάρια, ενώ περισσότερο από το 90 % των καμένων εκτάσεων για την ίδια χρονική περίοδο ανήκε σε ευρωπαϊκές χώρες και κατά κύριο λόγο, χώρες της Μεσογείου.



Εικόνα 2.1.: Σύγκριση μεταξύ της ετήσιας καμένης έκτασης σε πέντε χώρες

(Πηγή: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC108974)

Η πυρκαγιά είναι ένας από τους κύριους παράγοντες δυναμικής των οικοσυστημάτων στα ευρωπαϊκά τοπία της Μεσογείου, καθώς έχει επηρεάσει τη σύνθεση του εδάφους και της βλάστησης για χιλιετίες. Αξίζει να τονιστεί πως υπάρχει ένα ευρύ φάσμα παραγόντων που ενδέχεται να ενθαρρύνουν την ανάφλεξη πυρκαγιάς, ενώ ταυτόχρονα έχει αναδειχθεί η ισχυρή σχέση μεταξύ της συχνότητας πυρκαγιών στα δάση και των κλιματικών και μετεωρολογικών χαρακτηριστικών στις ευρωπαϊκές χώρες, ενώ πολλοί είναι αυτοί που υποστηρίζουν ότι τα αίτια

ανάφλεξης των δασικών πυρκαγιών είναι κυρίως ανθρωπογενή (Lourenço et al, 2020). Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται αύξηση του αριθμού των ακραίων πυρκαγιών στην περιοχή της Μεσογείου και συνεπώς και στην Ελλάδα όπου αυτό αποδίδεται σε αλλαγές στη χρήση γης αλλά και την κλιματική θέρμανση (Polychronaki and Z. Gitas, 2012). Παράλληλα, οι καταστροφικές πυρκαγιές τις τελευταίες δεκαετίες έχουν καταστήσει αναγκαία την αύξηση των πολιτικών διαχείρισης κινδύνου με σκοπό την αντιμετώπιση μελλοντικών κινδύνων και επιπτώσεων πυρκαγιάς (Palaiologou et al., 2021).

Αξίζει να σημειωθεί, πως τα Μεσογειακά οικοσυστήματα έχουν εξελιχθεί σε άμεση σχέση με την φωτιά, καθώς οι έντονες διαφορετικές κλιματικές συνθήκες και ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες προκαλούν αποξήρανση της βλάστησης, καθιστώντας την εύφλεκτη. Όπως έχει παρατηρηθεί, το μεγαλύτερο ποσοστό πυρκαγιών, αποδίδεται σε λόγους απροσεξίας, ενώ οι σημαντικότερες ανθρώπινες δραστηριότητες που οδηγούν στην υποβάθμιση των δασικών οικοσυστημάτων, είναι η υπερβόσκηση, οι αλλαγές των χρήσεων γης καθώς και οι πυρκαγιές (Chatzichristaki, 2011).

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.2 στην Ελλάδα, οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν σοβαρό πρόβλημα δεδομένου ότι καταστρέφουν τεράστιες και ζωτικής σημασίας δασικές εκτάσεις, αποτελώντας μία από τις σημαντικότερες φυσικές καταστροφές σε ένα κατεξοχήν πυριγενές φυσικό περιβάλλον από άποψη κλίματος και βλάστησης (ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ, 2011). Το αυξανόμενο πρόβλημα των πυρκαγιών στην Ελλάδα εντοπίζεται σε μεγάλο τμήμα της Μεσογείου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, οι υπηρεσίες πολιτικής προστασίας να αντιμετωπίζουν τουλάχιστον δύο πυρκαγιές μεγάλης κλίμακας κάθε χρόνο συνδυαστικά με εκατοντάδες μεσαίας και χιλιάδες γεγονότα μικρής κλίμακας. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού-φθινοπώρου του 2007, δεκάδες παράλληλες μεγάλης κλίμακας

Εικόνα 2.2.: Εστίες πυρκαγιών στην Ελλάδα το 2007

(Πηγή: https://ec.europa.eu/environment/system/files/2021-03/SR45_broch_EL_v6.0_signed.pdf)

πυρκαγιές, που κυμαίνονταν από 10,000 έως 40,000 εκτάρια, έκαψαν περισσότερα από 270,000 εκτάρια στην Ελλάδα. Η πυρκαγιά 15,000 εκταρίων στη Χίο το 2012 έκαψε το ένα έκτο του νησιού, καταστρέφοντας μέρος της τοπικής οικονομίας και των δασικών οικοσυστημάτων (Palaiologou et al., 2018). Είναι λοιπόν κατανοητό πως αυτά τα ακραία φαινόμενα πυρκαγιάς συμβαίνουν με αυξανόμενη συχνότητα λόγω των κλιματικών αλλαγών που υφίσταται η Ελλάδα μέσα στο πέρασμα των χρόνων, της συσσώρευσης καυσίμων αλλά και λόγω της κακής κατάστασης γύρω από κάποια αστική ανάπτυξη που εμποδίζει αποτελεσματικές δραστηριότητες καταστολής (Palaiologou et al., 2018).

Έχει παρατηρηθεί πως κάθε χρόνο η χώρα αντιμετωπίζει κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες μεγάλα ποσοστά πυρκαγιών, με αποτέλεσμα να καίγονται σημαντικές εκτάσεις. Πιο συγκεκριμένα στο χρονικό διάστημα 1983-2008 σημειώθηκαν 38,085 περιστατικά πυρκαγιών, με αποτέλεσμα να έχουν καεί 13,613,121 στρέμματα, με το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών και πιο συγκεκριμένα, της τάξεως του 19% να κατανέμεται στη γεωγραφική ενότητα της Πελοποννήσου, ενώ το μικρότερο, περίπου 7%, να κατανέμεται στη Θεσσαλία. Αξίζει να σημειωθεί, το 79% της καμένης έκτασης αποτελεί δασική, ενώ το υπόλοιπο γεωργική (Βαλλάτου, 2016).

Είναι γεγονός πως στην διαχείριση της πυρκαγιάς καταλυτικό ρόλο παίζουν και αρμόδιες κυβερνητικές υπηρεσίες για την αποκατάσταση μετά την πυρκαγιά, οι οποίες δυσκολεύονται να αξιολογήσουν αξιόπιστα τι πραγματικά συνέβη κατά τη διάδοση της πυρκαγιάς και να προβλέψουν τις βραχυπρόθεσμες συνθήκες μετά την πυρκαγιά. Έτσι, θα ήταν εύκολο να ταξινομήσουν και να ιεραρχήσουν τις επενδύσεις αποκατάστασης μετά την πυρκαγιά. Αν και αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε μέρη όπως η Ελλάδα , λείπει μια αποδεκτή μεθοδολογία σχετικά με τον τρόπο αξιολόγησης και ιεράρχησης των επενδύσεων μετά την πυρκαγιά με βάση τη σημασία των επιπτώσεων της πυρκαγιάς, είτε είναι επιζήμιες είτε επωφελείς (Palaiologou et al, 2020).

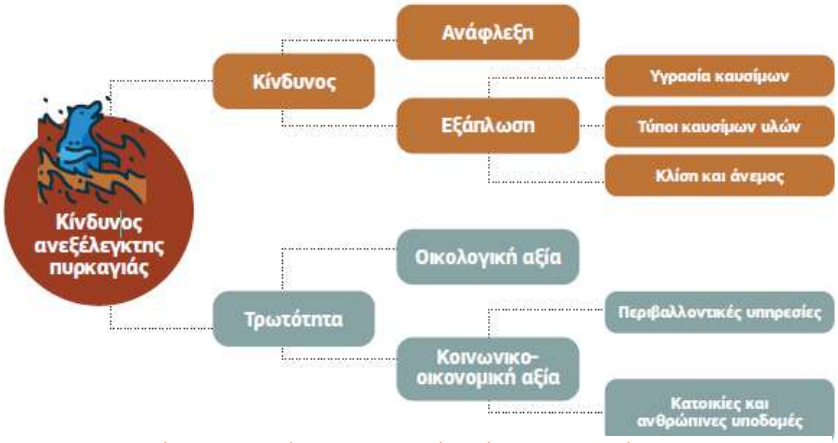
2.2. Παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών

Οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την συμπεριφορά των πυρκαγιών, είναι τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης, η τοπογραφία και οι μετεωρολογικές συνθήκες (Daşdemir et al, 2021). Στην περιοχή της Μεσογείου, κατά κύριο λόγο, οι αιτίες των πυρκαγιών σχετίζονται με ανθρώπινες δραστηριότητες και με την ανθρώπινη συμπεριφορά. Οι δασικές πυρκαγιές συμπεριφέρονται διαφορετικά ανάλογα με τον τύπο των καυσίμων, τις καιρικές συνθήκες και τους τοπογραφικούς παράγοντες. Γενικά, ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το σχήμα της πυρκαγιάς είναι η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου, καθώς μπορεί να ενταθεί σε πολύ γρήγορο χρονικό διάστημα (Daşdemir et al, 2021). Έτσι, η πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς είναι ζωτικής σημασίας για όλους τους σχεδιασμούς διαχείρισης πυρκαγιών και τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, συμπεριλαμβανομένης της πρόληψης και του σχεδιασμού καταστολής αυτών (Birot, 2009). Γενικά, οι επιπτώσεις αυτού του επικίνδυνου φαινομένου επηρεάζουν τόσο περιβαλλοντικές όσο και κοινωνικοοικονομικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένων των υλικών ζημιών, των εξόδων απόκρισης έκτακτης ανάγκης, του κόστους ανάκτησης, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των πολιτιστικών και ιστορικών επιπτώσεων. Οι επιπτώσεις των πυρκαγιών έχουν τεράστιο κόστος ως προς τις προσπάθειες πυρόσβεσης και πρόληψης, την αποκατάσταση τοπίου μετά την πυρκαγιά, επισκευές πληγέντων σπιτιών και υποδομών και οικονομική αποζημίωση που επιβαρύνει τους εθνικούς προϋπολογισμούς όλων των πληγέντων χωρών. Οι πυρκαγιές επιταχύνουν επίσης φαινόμενα όπως η διάβρωση, η ερημοποίηση, αλλαγές των χρήσεων γης, εξαφάνιση ειδών, η υποβάθμιση του φυσικού περιβάλλοντος και τη; ποιότητα του αέρα. Για τον λόγο αυτό η ανάπτυξη μεθοδολογιών αξιολόγησης που μπορούν να περιλαμβάνουν αυτή τη μεγάλη ποικιλία επιπτώσεων, ποικίλλουν τόσο χωρικά όσο και χρονικά, και είναι κρίσιμη για την ενημέρωση ενός ισχυρού συστήματος υποστήριξης αποφάσεων διαχείρισης πυρκαγιών και δασών ευθυγραμμισμένο με την οικολογική και κοινωνικοοικονομική πραγματικότητα (Palaiologou et al, 2020).

Είναι γεγονός πως η υψηλότερη εμφάνιση πυρκαγιών που παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια συνδέεται με την ομογενοποίηση του τοπίου λόγω αλλαγών των χρηστών γης, καθώς

αλλαγές που συνέβησαν τα τελευταία χρόνια έχουν αυξήσει σημαντικά τον κίνδυνο πυρκαγιάς (Ganteaume et al., 2013).

Στην εικόνα 2.3. είναι εμφανή τα βασικά κριτήρια εκτίμησης του κινδύνου ανεξέλεγκτης πυρκαγιάς σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, και όπως είναι εμφανές οι συνιστώσες του κινδύνου ανεξέλεγκτης πυρκαγιάς αφορούν τη ανάφλεξη και την πιθανότητα εξάπλωσης μια πυρκαγιάς, ενώ οι συνιστώσες της τρωτότητας αφορούν την έκθεση και την τρωτότητα των περιοχών που είναι επιρρεπείς στο να πληγούν από ανεξέλεγκτες πυρκαγιές.



Εικόνα 2.3: Παράγοντες επιρροής επί των πυρκαγιών

(Πηγή:https://ec.europa.eu/environment/system/files/2021-03/SR45_broch_EL_v6.0_signed.pdf _)

Σημαντικός παράγοντας επιρροής είναι οι μετεωρολογικές συνθήκες, καθώς ο καιρός αποτελεί ίσως τον πιο μεταβλητό παράγοντα. Οι παράμετροι του καιρού που επηρεάζουν την συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών είναι ο άνεμος, η σχετική υγρασία του αέρα, η θερμοκρασία του αέρα, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, η ύπαρξη νεφώσεων ή ηλιοφάνειας και η σταθερότητα της ατμόσφαιρας. Αποτελεί γεγονός πως η ταχύτητα του ανέμου, είναι ένας από τους πιο κρίσιμους παράγοντες που επιδρά στην συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς, με την ταχύτητα του να μετράται με ανεμόμετρα σε χλμ./ώρα. Παράλληλα, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο περισσότερο οι φλόγες αποκτούν κλίση προς τα εμπρός και πλησιάζουν την καύσιμη ύλη μπροστά τους, με τον τρόπο αυτό η αποτελεσματικότητα της ακτινοβολίας να πολλαπλασιάζεται και να αυξάνεται κατακόρυφα η μεταφορά θερμότητας με επαγωγή για την προθέρμανση της καύσιμης ύλης. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι ότι η φωτιά διαδίδεται με μεγαλύτερη ταχύτητα, νέα καύσιμη ύλη συνεχώς αναφλέγεται και έτσι οι φλόγες μεγαλώνουν.

Παράλληλα, η επίδραση του ισχυρού ανέμου στην πυρκαγιά, έχει και ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό, καθώς προκαλεί τη μεταφορά σωματιδίων, τα οποία μπορούν να

προκαλέσουν νέες εστίες, συχνά πέρα από δρόμους και αντιπυρικές ζώνες. Αν και η διεύθυνση του ανέμου έχει σημασία ως προς τον συνδυασμό της επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου με αυτήν της πυρκαγιάς, ιδιαίτερα σημαντικό στοιχείο αποτελούν οι αλλαγές της διεύθυνσης αυτού καθώς μεταβάλλουν την κατεύθυνση του μετώπου της πυρκαγιάς αυξάνοντας τους κινδύνους.

Τρίτος και τελευταίος βασικός παράγοντας επιρροής είναι η καύσιμη ύλη, όπου το σύνολο του δάσους την αποτελεί, καθώς όλα τα μέρη που το απαρτίζουν είναι αναφλέξιμα υλικά. Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο τα υλικά αυτά αναφλέγονται ποικίλει ανάλογα με τη διάταξή τους στο χώρο, την ποσότητά τους, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, τη θερμοκρασία τους και την περιεχόμενη σε αυτά υγρασία. Η διάταξη στο χώρο κατατάσσει την καύσιμη ύλη σε υποεδάφια, επιεδαφια και εναέρια. Έτσι, η ποσότητα της καύσιμης ύλης, μετρούμενη σε τόνους ανά στρέμμα ή σε κιλά ανά τετραγωνικό μέτρο, είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η θερμική ένταση της πυρκαγιάς, καθώς όσο περισσότερη καύσιμη ύλη υπάρχει τόσο περισσότερη είναι η διαθέσιμη ενέργεια προς έκλυση. Η ταχύτητα με την οποία εκλύεται η περιεχόμενη στην καύσιμη ύλη ενέργεια, άρα και η ένταση του μετώπου της πυρκαγιάς, δεν εξαρτάται μόνο από την ποσότητά της. Ταυτόχρονα, στην συμπεριφορά της πυρκαγιάς ιδιαίτερα σημαντικό ρολό παίζει και η περιεχόμενη υγρασία στην καύσιμη ύλη (Sinkevičius and Gabriel, 2021).

2.3. Τεχνολογίες γεωπληροφορικής για την διαχείριση των δασικών πυρκαγιών

Είναι γεγονός πως στην παρακολούθηση και αξιολόγηση μιας δασικής πυρκαγιάς καταλυτικό ρόλο παίζουν τα τηλεσκοπικά δεδομένα και τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών. Η δορυφορική τηλεπισκόπηση χρησιμεύει τόσο παρακολούθηση της εξέλιξης όσο και στην καταγραφή των αποτελεσμάτων από αυτήν.

Με τον όρο τηλεπισκόπηση (**Remote sensing, teledetaction, telerilevamento**) ορίζεται η τεχνική απόκτησης πληροφοριών για αντικείμενα που βρίσκονται στη γήινη επιφάνεια, μέσω της ανάλυσης δεδομένων που συλλέγονται από ειδικά όργανα τα οποία όμως δεν έχουν φυσική επαφή με τα αντικείμενα. Έτσι, η τηλεπισκόπηση μπορεί να αποδοθεί και ως η αναγνώριση ενός αντικειμένου από απόσταση. Ταυτόχρονα, η έννοια της Τηλεπισκόπησης, σε μια ευρύτερη έννοια μπορεί να συμπεριλάβει και ακουστικά ή ηχητικά κύματα που παράγονται κάτω από την

επιφάνεια του νερού τα οποία μπορεί να καταγράφονται από ειδικούς αισθητήρες (Περάκης et al, 2015).

Κατά την ψηφιακή ανάλυση της εικόνας ο χρήστης που έρχεται σε επαφή με την ψηφιακή επεξεργασία πρέπει να συμμετέχει σε πολλές διαφορετικές διεργασίες, που η κάθε μία είναι ξεχωριστή από τις υπόλοιπες στον χειρισμό. Κατά την ανάλυση χρησιμοποιούνται ψηφιδωτά (raster) δεδομένα που προσφέρουν πλεονεκτήματα για τη διαχείριση των τιμών των εικονοστοιχείων από τα λογισμικά επεξεργασίας, καθώς είναι εύκολο να βρεθούν και να εντοπιστούν τα εικονοστοιχεία και οι τιμές τους.

Παράλληλα, στην τηλεπισκοπηση υπάρχουν σημαντικά χαρακτηριστικά ως προς την χρήση εικόνων οπού χρησιμοποιούνται φασματικά κανάλια στο ορατό, υπέρυθρο και μικροκυματικό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, περιγράφονται με τη χωρική (spatial), φασματική (spectral) και ραδιομετρική (radiometric) και χρονική (temporal) διακριτική ικανότητα ή ανάλυση (Περάκης et al, 2015).

Στην σύνθεση των μοντέλων πρόβλεψης αλλά και στην αναγέννηση του τοπίου, καταλυτικό ρόλο έπαιξε η τηλεπισκόπηση. Είναι γεγονός πως η αλλαγή της δυναμικής κάλυψης γης θεωρείται την δεδομένη στιγμή ως η μοναδική και πιο σημαντική μεταβλητή της παγκόσμιας αλλαγής που επηρεάζει τα οικολογικά συστήματα. Για τον λόγο αυτό η γνώση της χωροχρονικής κατανομής της δυναμικής ανάκτησης της βλάστησης μετά την πυρκαγιά είναι καίριας σημασίας, καθώς η διαδικασία ανάκτησης της βλάστησης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο σε διάφορες πτυχές της πολιτικής και στη λήψη αποφάσεων, καθώς και στη δυναμική και τις δομές των φυτικών και ζωικών κοινοτήτων των επηρεαζόμενων οικοσυστημάτων. Ειδικά στην περιοχή της Μεσογείου, όπου η φωτιά υπήρξε σημαντικός οικολογικός παράγοντας για χιλιετίες με τα ποσοστά της δυναμικής ανάκτησης μετά την πυρκαγιά να είναι συνήθως χωρικά μεταβλητά και να εξαρτώνται από έναν αριθμό παραγόντων (Petropoulos et al, 2014).

Όπως είναι ευρέως διαδεδομένο η επιστήμη της τηλεπισκόπησης εφαρμόζεται με επιτυχία σε όλα τα στάδια της πυρκαγιάς εδώ και αρκετές δεκαετίες, επιτυγχάνοντας τις εκτιμήσεις του κίνδυνου πυρκαγιάς, την ενεργή ανίχνευση αυτής, την χαρτογράφηση της καμένης περιοχής και τις εκτιμήσεις σοβαρότητας (Veraverbeke et al., 2018). Η τηλεπισκόπηση παρέχει ένα μέσο για την ανάλυση των συνθηκών και την παρακολούθηση των αλλαγών σε

μεγάλες γεωγραφικές εκτάσεις, καθιστώντας την χρήσιμη για μελέτες στην οικολογία των πυρκαγιών. Παράλληλα, τα συστήματα τηλεπισκόπησης παρέχουν βιοφυσικές μετρήσεις των συνθηκών του εδάφους πριν και μετά την πυρκαγιά, ενώ τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα συστήματα τηλεπισκόπηση για την έρευνα ως προς την συμπεριφορά της πυρκαγιάς είναι οι πολυφασματικοί αισθητήρες (Szpakowski and Jensen, 2019).

Την δεκαετία του 1960 επινοήθηκε ο όρος Τηλεπισκόπηση καθώς οι νέες τεχνολογίες έγιναν διαθέσιμες και ο τομέας έγινε πιο επαγγελματικός. Οι πρώτοι δορυφόροι τηλεπισκόπησης ξεκίνησαν το 1959 από τις ΗΠΑ. Το 1972 ξεκίνησε το Landsat 1 (ERTS-1) και χαρακτηρίστηκε ως το πρώτο βήμα στη συγχώνευση τεχνολογιών χώρου και τηλεπισκόπησης με σκοπό την παρακολούθηση και διαχείριση των πόρων της γης (Boogert, 2016).

Ωστόσο, εκτός από τα μέσα της Τηλεπισκόπησης, καταλυτικό ρολό στην παρακολούθηση και αξιολόγηση μιας δασικής πυρκαγιάς παίζουν και τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, με το GIS να αποτελεί ένα υπολογιστικό σύστημα για τη συλλογή, αποθήκευση, διαχείριση, ανάκτηση, μετασχηματισμό, ανάλυση και εμφάνιση χωρικών δεδομένων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διάφορους σκοπούς, ενώ έχουν σχεδιαστεί για να υποστηρίζουν τη γεωγραφική έρευνα και τη λήψη χωρικών αποφάσεων. Ειδικά στην περιοχή των φυσικών καταστροφών, το GIS έχει εφαρμοστεί στο σύστημα προσομοίωσης και έγκαιρης προειδοποίησης, στο σύστημα διαχείρισης έκτακτης ανάγκης και στην εκτίμηση ζημιών από καταστροφές (Gai et al, 2011).

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση της τεχνολογίας GIS έχει αυξηθεί για σκοπούς περιβαλλοντικής διαχείρισης και παρακολούθησης και κυρίως ως Σύστημα Υποστήριξης Αποφάσεων (DSS), ενώ χρησιμοποιείται επίσης και για την ανάλυση πυρκαγιών αλλά και για την πρόβλεψη και διαχείριση αυτών. Το GIS επιτρέπει την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων για την εξάπλωση της πυρκαγιάς ή για τη διαχείριση πυρκαγιάς για τον προσδιορισμό, για παράδειγμα, τη βέλτιστη κατανομή κρουνών, τη θέση των πυροσβεστικών σταθμών, την ταξινόμηση των περιοχών πυρκαγιάς ανάλογα με τον τύπο πυρκαγιάς και τη δημιουργία της συγκεκριμένης περιοχής από νωρίς σχέδια παρέμβασης (Mangiameli et al, 2021).

Είναι γεγονός πως το GIS δύναται να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση κίνδυνου και για την ανάληψη μέτρων μείωσης αυτού, αποτελώντας ένα από τα πιο αποτελεσματικά και

γρήγορα μέσα για την ακριβή αξιολόγηση δεδομένων. Τα απαιτούμενα δεδομένα μπορούν να ληφθούν επαρκώς από ανοιχτές πηγές και στη συνέχεια να εφαρμοστούν κατάλληλα για την ενσωμάτωση διαφόρων επιπέδων δεδομένων και τη δημιουργία επιθυμητής απεικόνισης σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις διαφόρων κινδύνων (Hussain et al, 2020). Παράλληλα, χρησιμοποιώντας το GIS, η αξιολόγηση κινδύνου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε διαφορετικές γεωγραφικές κλίμακες, ενώ οι παράγοντες που καθορίζουν την κατάλληλη κλίμακα που αρμόζει σε κάθε περίπτωση, περιλαμβάνουν τον στόχο της αξιολόγησης κινδύνου, τον τύπο του κινδύνου, την επιχειρησιακή κλίμακα στην οποία ενεργοποιούνται αυτοί οι κίνδυνοι, το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, τα διαθέσιμα δεδομένα και πόροι και η απαιτούμενη ακρίβεια της αξιολόγησης. Για πολύ μεγάλες περιοχές όπως σε εθνικό επίπεδο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρές κλίμακες όπως 0,1 έως 1 εκατομμύριο χαρτογραφικές κλίμακες και χωρική ανάλυση 0,1 έως 1 χιλιόμετρο για μια κατά προσέγγιση έκταση έως 600.000 τετραγωνικών χιλιομέτρων (Hussain et al, 2020).

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) επιτρέπουν την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των δασών και άλλων οικοσυστημάτων σε χωρική κλίμακα και χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά στη διερεύνηση, την παρακολούθηση και τον εντοπισμό δασικών πυρκαγιών (Gülçina and Deniza, 2022). Παράλληλα, μέσω του GIS παρέχεται μεγάλη ευκολία στην αξιολόγηση πολυάριθμων γεωγραφικών παραμέτρων με μεταβλητές τιμές και στην ανάλυση γεγονότων και φαινομένων, τα οποία αναπτύσσονται υπό τον έλεγχο αυτών των γεωγραφικών παραμέτρων (Gülçina and Deniza, 2022).

Η χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) είναι εμφανές πως υποστηρίζει την εισαγωγή, τη διαχείριση, την επεξεργασία, τη χωρική ανάλυση, χαρτογραφική μοντελοποίηση και οπτικοποίηση περίπλοκων περιβαλλοντικών δεδομένων, που αναφέρονται στο χώρο και στο χρόνο, για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς (Kalabokidis et al., 2013).

Ωστόσο, εκτός από τις βασικές λειτουργίες των ΣΓΠ (GIS) στην διαχείριση των δασικών πυρκαγιών, ιδιαιτέρως σημαντική είναι και η τεχνική WebGIS, ενσωματώνοντας συχνά πρόσθετες λειτουργίες χρησιμοποιώντας δεδομένα από διαφορετικές πηγές. Το WebGIS, ένας συνδυασμός Web και GIS, έχει γίνει ένας αυξανόμενος κλάδος από την έναρξή του το 1993. Το 1993, το ερευνητικό κέντρο της Xerox Corporation στο Palo Alto (Santa Clara, CA, ΗΠΑ) ανέπτυξε

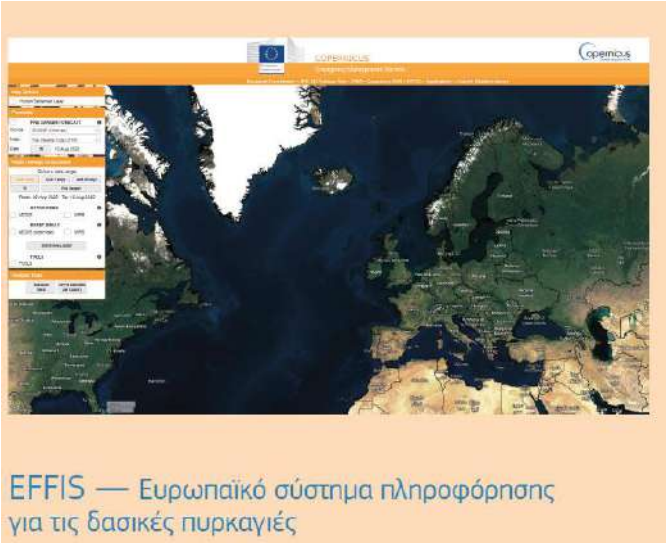
ένα πρόγραμμα προβολής χαρτών που βασίζεται στο Web, που σηματοδοτεί την προέλευση του Web GIS (Hamza and Chmit, 2022).

2.3.1: Επιχειρησιακά προϊόντα τηλεπισκόπησης

Αναπόσπαστο κομμάτι στην παρακολούθηση των πυρκαγιών, παίζει και το Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφοριών Δασικών Πυρκαγιών (EFFIS). Το Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφοριών για τις Δασικές Πυρκαγιές (EFFIS) αναπτύχθηκε από κοινού από τις υπηρεσίες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (ΕΚ) (Γενική Διεύθυνση Περιβάλλοντος και το Κοινό Κέντρο Ερευνών) και τις σχετικές υπηρεσίες πυρκαγιάς στις χώρες σε απάντηση στις ανάγκες των ευρωπαϊκών φορέων όπως το Κέντρο Παρακολούθησης και Πληροφόρησης της Πολιτικής Προστασίας, οι υπηρεσίες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Είναι γεγονός πως το EFFIS είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα που καλύπτει τον πλήρη κύκλο διαχείρισης των δασικών πυρκαγιών, από την πρόληψη και την ετοιμότητα των δασικών πυρκαγιών έως την ανάλυση ζημιών μετά την πυρκαγιά.

Το σύστημα παρέχει πληροφορίες σε περισσότερες από 30 χώρες στις ευρωπαϊκές και μεσογειακές περιοχές, και λαμβάνει λεπτομερείς πληροφορίες για δασικές πυρκαγιές από 22 ευρωπαϊκές χώρες. Παράλληλα, υποστηρίζει την πρόληψη δασικών πυρκαγιών και την καταπολέμηση δασικών πυρκαγιών στην Ευρώπη μέσω της παροχής έγκαιρης και αξιόπιστης πληροφόρησης για τις δασικές πυρκαγιές. Το EFFIS, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.4 ως μία από τις Υπηρεσίες Έκτακτης Ανάγκης του Copernicus αποτελεί ουσιαστικό εργαλείο για την παροχή των πιο ενημερωμένων πληροφοριών σχετικά με τον κίνδυνο πυρκαγιάς στην ΕΕ, τον εντοπισμό της εξέλιξης των πυρκαγιών και τη βοήθεια των εθνικών αρχών να παρακολουθούν αυτές τις πυρκαγιές (Efthimiou et al, 2019).

Από το 2000, τα δεδομένα για τις δασικές πυρκαγιές που παρέχονται κάθε χρόνο από μεμονωμένα κράτη μέλη της ΕΕ και άλλες ευρωπαϊκές χώρες ελέγχονται, αποθηκεύονται και διαχειρίζονται στο πλαίσιο του EFFIS. Η βάση δεδομένων είναι πλέον γνωστή ως Ευρωπαϊκή βάση δεδομένων πυρκαγιάς και ο αριθμός των κρατών μελών και άλλων συμμετεχόντων ευρωπαϊκών χωρών που συμβάλλουν σε αυτήν, αυξάνεται σταδιακά.



Εικόνα 2.4: Το Ευρωπαϊκό σύστημα πληροφόρησης για τις δασικές πυρκαγιές

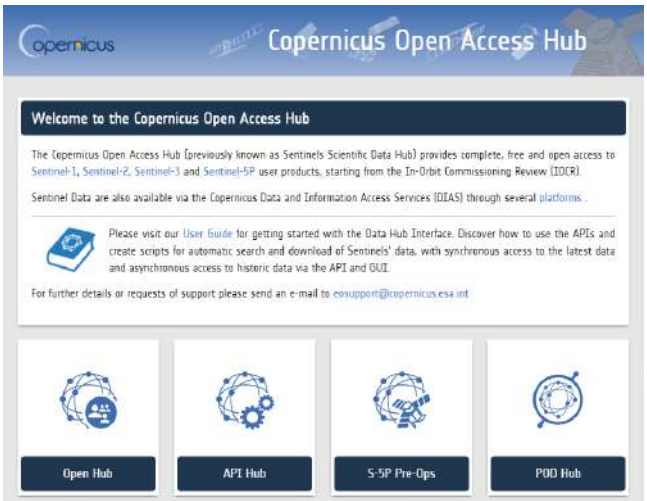
*(Πηγή:https://ec.europa.eu/environment/system/files/2021-03/SR45_broch_EL_v6.0_signed.pdf)_*

Σήμερα η βάση δεδομένων αντικατοπτρίζει τις προσπάθειες των 22 συνεισφέρουσων χωρών που παρέχουν τακτικά δεδομένα πυρκαγιάς: Βουλγαρία, Κροατία, Κύπρος, Τσεχία, Εσθονία, Φινλανδία, Γαλλία, Γερμανία, Ελλάδα, Ουγγαρία, Ιταλία, Λετονία, Λιθουανία, Πολωνία, Πορτογαλία, Ρουμανία , Σλοβακία, Σλοβενία, Ισπανία, Σουηδία, Ελβετία και Τουρκία, και περιέχει πάνω από 2 εκατομμύρια μεμονωμένα αρχεία πυρκαγιών, από τα οποία περίπου 1,66 εκατομμύρια ταξινομούνται ως δασικές πυρκαγιές (San-Miguel-Ayanz,2012). Είναι γεγονός πως κάθε χωρά διαθέτει τους δικούς της εσωτερικούς κανόνες αναφοράς για μεμονωμένα συμβάντα πυρκαγιάς, ενώ ορισμένα αποθηκεύουν πολύ λεπτομερείς πληροφορίες και διαθέτουν περίπλοκες βάσεις δεδομένων για το σκοπό αυτό. Όπως έχει αποδειχθεί η Ευρωπαϊκή Βάση Δεδομένων Πυρκαγιάς περιέχει μια σειρά από κοινά συγκεντρωμένα χαρακτηριστικά κάθε πυρκαγιάς, τα οποία μπορούν να παρέχονται από όλες τις χώρες. Οι τέσσερις κύριοι τύποι πληροφοριών που συλλέγονται είναι: ο χρόνος πυρκαγιάς, ο τόπος πυρκαγιάς, το μέγεθος της πυρκαγιάς και η αιτία της πυρκαγιάς (San-Miguel-Ayanz,2012). Όπως φαίνεται και στην εικόνα το EFFIS Από το 1998 το EFFIS που υποστηρίζεται από ένα δίκτυο εμπειρογνωμόνων έχει καταστεί μία από τις συνιστώσες των υπηρεσιών διαχείρισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης του προγράμματος Copernicus της ΕΕ.

Εξίσου σημαντική για την παρατήρηση μιας δασικής πυρκαγιάς είναι και η πλατφόρμα του Copernicus όπου είναι διαθέσιμη στο site ‘’https://scihub.copernicus.eu/’’, η οποία

υποστηρίζει τα κράτη μέλη της ΕΕ μέσω της χρήσης δορυφόρων για ενεργή χαρτογράφηση πυρκαγιών και ταχεία αξιολόγηση καμένων περιοχών σε σχεδόν πραγματικό χρόνο, και φαίνεται στην εικόνα 2.5.

Οι δορυφόροι παρατήρησης της γης έχουν αποδειχθεί ζωτικό εργαλείο για την απόκριση σε πυρκαγιές και κατά την περίοδο ανάκαμψης μετά από ένα συμβάν, ενώ προκύπτει πως οι πυρκαγιές και η έκτασή τους μπορούν να ανιχνευθούν σε σχεδόν πραγματικό χρόνο με την συμβολή δορυφορικών οργάνων που ανιχνεύουν τη θερμότητα. Ταυτόχρονα, οι αλλαγές μπορούν να παρακολουθούνται σε σύντομες χρονικές περιόδους και μπορούν να δημιουργηθούν χάρτες πυρκαγιάς μέσα σε λίγες ώρες για να παρέχουν μια επισκόπηση των πληγεισών περιοχών και να βοηθήσουν στην αποτελεσματικότερη καταπολέμηση της πυρκαγιάς. Μόλις σβήσει η πυρκαγιά, οι επιπτώσεις της στη γη μπορούν επίσης να αναγνωριστούν σαφώς από τους δορυφόρους. Έτσι, η Υπηρεσία Διαχείρισης Έκτακτης Ανάγκης Copernicus χρησιμοποιεί δορυφορικά δεδομένα για να παρέχει έγκαιρες και ακριβείς γεωχωρικές πληροφορίες για τις πυρκαγιές και την έκταση των καμένων περιοχών, υποστηρίζοντας έτσι την ταχεία εκτίμηση της συνολικής ζημιάς. Με την βοήθεια της πλατφόρμας αυτής μπορούν να παραχθούν χάρτες ετοιμότητας και πρόληψης, προϊόντα αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης όπως αναλύσεις της έκτασης της πυρκαγιάς και ανίχνευση ενεργών πυρκαγιών, ταχεία χαρτογράφηση καμένων περιοχών για υποστήριξη αναλύσεων επίπτωσης πυρκαγιάς και εκτιμήσεις ζημιών στη βλάστηση.



Εικόνα 2.5: COPENICUS OPEN ACCESS HUB

(Πηγή: 'https://scihub.copernicus.eu/)

Είναι γεγονός πως το Copernicus παρέχει δεδομένα παρατήρησης της Γης μέσω αποκλειστικών αποστολών Copernicus, συγκεκριμένα της σειράς δορυφόρων Sentinel , θέτοντας ως στόχο την ανίχνευση και παρακολούθηση ενεργών πυρκαγιών παγκοσμίως αλλά και την χαρτογράφηση καμένων περιοχών (ESA,2013).

2.3.2. Εκτίμηση καμένων εκτάσεων

Η χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης για τη μελέτη δασικών πυρκαγιών είναι ένα θέμα που ξεκίνησε ήδη πριν από αρκετά χρόνια και του οποίου οι δυνατότητες αυξάνονται καθώς νέοι αισθητήρες ενσωματώθηκαν σε διεθνή προγράμματα γεωσκόπησης και επιτεύχθηκαν νέοι στόχοι με βάση τις βελτιωμένες τεχνικές που έχουν εισαχθεί. Για τον λόγο αυτό διακρίνονται τρία βασικά θέματα, στα οποία η τηλεπισκόπηση παρέχει αποτελέσματα που μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα στο θέμα των δασικών πυρκαγιών, όπως ο κίνδυνος εξάπλωσης πυρκαγιάς και ο καθορισμός θερμικών παραμέτρων πυρκαγιάς και, τέλος η χαρτογραφία των πληγεισών περιοχών.

Όσον αφορά τον κίνδυνο πυρκαγιάς, η τηλεπισκόπηση έχει δώσει πολύ πολύτιμα αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο, κάτι που ήταν και ο απαιτούμενος στόχος. Ωστόσο, για να είναι δυνατή η πρόβλεψη της ύπαρξης πυρκαγιών, είναι απαραίτητο να ενσωματωθούν δείκτες ετερογενών τύπων που μερικές φορές δεν εμπίπτουν στο πεδίο των μελετών (Casanova, 2008). Έχει αποδειχθεί, πως για τις εκτεταμένες δασικές πυρκαγιές, τα τηλεπισκοπικά μέσα αποτελούν την καταλληλότερη μέθοδο για την εκτίμηση της σφοδρότητας μιας πυρκαγιάς, καθώς δεν χρειάζεται μεγάλο ποσό χρόνου, χρήματος και πόρων. Η τεχνολογία τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση της σοβαρότητας βασίζεται κυρίως στις ποσοτικές σχέσεις μεταξύ των δεδομένων που παρατηρούνται στο πεδίο μελέτης αλλά και των δεικτών που αναλύονται μέσω της επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων. Μεταξύ αυτών των δεικτών, ο φασματικός δείκτης έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτερα, καθώς μπορεί να υπολογιστεί και να εφαρμοστεί εύκολα (Zhenga et al, 2015).

Η χαρτογράφηση πυρκαγιάς παρέχει μια χρονική και χωρική επισκόπηση της σοβαρότητας της προκειμένου να προσανατολίσουν τη διαχείριση και τον μελλοντικό σχεδιασμό, διαδραματίζοντας βασικό ρόλο και στην προώθηση της κλιματικής αλλαγής αλλά και των οικολογικών μελετών. Η μοντελοποίηση των δασικών πυρκαγιών απαιτεί αναλύσεις ιστορικής και χωρικής κλίμακας που συνδέουν τις ετήσιες πυρκαγιές με την κλιματική διακύμανση, την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η θερμοκρασία και η βροχόπτωση αλληλοεπιδρούν για τον έλεγχο της σοβαρότητας της πυρκαγιάς και τη δομή των καυσίμων (Qarallah et al., 2021).

Είναι γεγονός πως οι προσπάθειες απεικόνισης των θέσεων καμένων εκτάσεων, συμβάλλουν σημαντικά στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, στην εκτίμηση των επιπτώσεων μιας πυρκαγιάς στη δυναμική του τοπίου καθώς και στη λήψη κατάλληλων διαχειριστικών πρακτικών με απώτερο σκοπό την προστασία και την αποκατάστασή τους. Ταυτόχρονα, η χαρτογράφηση των δασικών πυρκαγιών μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω επίγειων παρατηρήσεων, αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων. Η πρώτη τεχνική θεωρείται χρονοβόρα και πολυδάπανη, ενώ καθίσταται αδύνατον να εφαρμοστεί σε καμένες επιφάνειες μεγάλης έκτασης λόγω του υψηλού βαθμού δυσκολίας και προσβασιμότητας που συναντάται στα τοπία. Παρόλα αυτά, παρέχει πολύ υψηλή ακρίβεια σε τοπικό επίπεδο και γι’ αυτό τον λόγο προτιμάται σε χαρτογραφήσεις όπου απαιτείται μεγάλη λεπτομέρεια. Η δεύτερη τεχνική προσφέρει αρκετά υψηλή ακρίβεια και επιτρέπει τη χαρτογράφηση σε μεγαλύτερες γεωγραφικές περιοχές χρησιμοποιώντας ασπρόμαυρα, έγχρωμα ή ακόμα και υπέρυθρα δεδομένα. Ωστόσο, το μεγάλο κόστος απόκτησης και επεξεργασίας τους καθώς επίσης και το εξειδικευμένο προσωπικό που απαιτείται λειτουργούν ως αρνητικοί παράγοντες. Τέλος, η τρίτη τεχνική χαρτογράφησης βασίζεται στη δορυφορική τηλεπισκόπηση και χρησιμοποιεί δορυφορικές εικόνες χωρικής, φασματικής και χρονικής ανάλυσης (Qarallah et al., 2021).

Παράλληλα, είναι γεγονός πως η δορυφορική τηλεπισκόπηση υπερέχει από τις άλλες δύο τεχνικές κυρίως από άποψη χρόνου και κόστους, καθώς παρέχει δεδομένα για ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας της γης, όπου μπορούν να ληφθούν μετρήσεις για την ίδια περιοχή σε τακτική βάση ακόμη και σε περιοχές με μικρή ή και καθόλου προσβασιμότητα. Αυτά τα φασματικά δεδομένα στο ορατό και στο υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, μπορούν με κατάλληλη επεξεργασία και ερμηνεία να συντελέσουν σε μία οικονομικά αποδοτική, αντικειμενική και ταχύτατη μέθοδο παρακολούθησης και χαρτογράφησης των καμένων εκτάσεων. Έτσι, η τηλεπισκόπηση στη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών μπορεί να εφαρμοστεί πριν από μία πυρκαγιά για πρόληψη και προστασία, κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς για ανίχνευση και παρακολούθηση και μετά από μία πυρκαγιά για εκτίμηση των συνεπειών και χαρτογράφηση.

Τα δεδομένα της παρατήρησης της Γης, ιδιαίτερα οι δορυφορικές εικόνες και τα παράγωγα προϊόντα σε συνδυασμό με τις τεχνικές επεξεργασίας εικόνων, χρησιμοποιούνται

όλο και περισσότερο για τον εντοπισμό περιοχών που έχουν υποστεί ζημιές από δασικές πυρκαγιές. Είναι γεγονός πως με την υψηλή χωρική ανάλυση δίνεται η δυνατότητα παρατήρησης μεγάλης περιοχής με μια μόνο εικόνα. Παράλληλα, δίνεται η δυνατότητα να υπάρχουν διαδοχικά δεδομένα και δεδομένα ήδη σε ψηφιακή μορφή και το ευρύ φάσμα μήκους κύματος που μπορεί να καλύψει ένας δορυφορικός αισθητήρας. Όπως προέκυψε και στην μελέτη στο νησί της Θάσου για την αξιολόγηση δεδομένων οπτικής τηλεπισκόπησης σε καμένες περιοχές, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα οπού εφαρμοστήκαν σε ένα ζεύγος εικόνων διαδοχικών ετών, από τον δορυφόρο Landsat-8. Όπως προέκυψε, οι εικόνες αυτές παρέχουν καλύτερη ακρίβεια λόγω της ικανότητάς του να διακρίνουν τις καμένες περιοχές παλαιότερων ετών (Elhag et al, 2020). Πιο συγκεκριμένα, τα οπτικά δορυφορικά δεδομένα έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς και έχουν αποδειχθεί χρήσιμα για τη χαρτογράφηση των καμένων περιοχών (Addison and Oommen, 2018). Είναι γεγονός πως οι δορυφορικές εικόνες έχουν χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των συνθηκών πριν και μετά τα γεγονότα δασικών πυρκαγιών (Teodoro and Amaral, 2019).

Έτσι, για να επιτευχθεί η χαρτογράφηση των δασικών πυρκαγιών είναι σημαντική η κατανόηση των φασματικών ιδιοτήτων των καμένων εκτάσεων, δηλαδή η φασματική τους υπογραφή ενώ ο προσδιορισμός του βέλτιστου συνδυασμού των φασματικών διαύλων είναι μείζονος σημασίας καθώς διαμορφώνει την ακρίβεια της ταξινόμησης. Ενώ το ορατό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αποδεικνύεται μη αποτελεσματικό για τη διάκριση των καμένων εκτάσεων, έχει παρατηρηθεί πως στο υπέρυθρο τμήμα, έχουν παρατηρηθεί έντονες αλλαγές στις τιμές ανάκλασης όσον αφορά τις εκτάσεις μετά από πυρκαγιά. Παράλληλα, έχει διαπιστωθεί έντονη μείωση της ανακλαστικότητας των καμένων εκτάσεων στο κοντινό υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, η οποία οφείλεται στην καταστροφή της δομής των φύλλων. Παράλληλα, η έντονη αύξηση της ανακλαστικότητας των καμένων εκτάσεων στο μέσο υπέρυθρο τμήμα που οφείλεται στη μείωση της διαθέσιμης υγρασίας του φυλλώματος, έχει ως απόρροια οι καμένες εκτάσεις να παρουσιάζουν μεγαλύτερες ραδιομετρικές τιμές σε σχέση με την υγιή βλάστηση (Gibsona, et al, 2020).

Οι τεχνικές διαφοροποίησης εικόνας που χρησιμοποιούν ανίχνευση αλλαγής πολλαπλών ημερομηνιών, για παράδειγμα μεταξύ εικόνων πριν και μετά την πυρκαγιά έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε μελέτες χαρτογράφησης σοβαρότητας πυρκαγιάς με

τηλεπισκόπηση. Έχουν ληφθεί και συγκριθεί πολυάριθμοι δείκτες ανάκλασης, συμπεριλαμβανομένης της διαφοροποιημένης αναλογίας κανονικοποιημένης καύσης (**Differenced Normalized Burn Ratio**), του δείκτη βλάστησης προσαρμοσμένου στο έδαφος, του δείκτη καμένης έκτασης και μετασχηματισμοί φωτεινότητας. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος δείκτης είναι ο διαφοροποιημένος λόγος κανονικοποιημένης καύσης (**dNBR**), ο οποίος έχει αποδειχθεί ότι παράγει εύλογη χαρτογράφηση της χωρικής διακύμανσης στη βαρύτητα σε μια ενιαία πυρκαγιά, σε ένα εύρος κοινοτήτων βλάστησης (Gibsona, et al, 2020).

Απόρροια των παραπάνω δεδομένων είναι πως οι διαφορετικές κατηγορίες κάλυψης γης διαχωρίζονται σχετικά εύκολα μεταξύ τους φασματικά, με την προϋπόθεση ότι σε κάθε περίπτωση επιλέγεται να μελετηθεί το κατάλληλο τμήμα του φάσματος. Αυτό το γεγονός, καθιστά την επιστήμη της τηλεπισκόπησης χρήσιμη κυρίως στη χαρτογράφηση μεγάλης έκτασης δασικών πυρκαγιών, προσφέροντας σημαντικές πληροφορίες και αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της περιορισμένης προσβασιμότητας των περιοχών ιδιαίτερα στη λεκάνη της Μεσογείου, η οποία χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο (Η συμβολή της δορυφορικής τηλεπισκόπησης στη χαρτογράφηση των δασικών πυρκαγιών, http://www.nagref.gr).

Η δορυφορική τηλεπισκοπηση έχει καταλυτικό ρολό στην εκτίμηση των καμένων εκτάσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί σύμφωνα με τους (Petropoulos et al, 2011) η συμβολή της τηλεπισκόπησης στην ανάλυση πυρκαγιών, συμπεριλαμβανομένης της αξιολόγησης των επιπτώσεων από τις πυρκαγιές, ενώ μεταξύ των πλεονεκτημάτων της τηλεπισκόπησης σε σύγκριση με τις συμβατικές επιτόπιες έρευνες είναι η παροχή έγκαιρων και συχνά φθηνών εικόνων με επαρκή χωρική ανάλυση με χαμηλό ή καθόλου κόστος από τοπική, σε περιφερειακή και παγκόσμια κλίμακα. Η παρούσα μελέτη είχε κύριο στόχο την διερεύνηση της αξίας της συνδυασμένης χρήσης του SVM με τις παρατηρήσεις Landsat TM για ακριβή και οικονομικά αποδοτική χαρτογραφία καμένης περιοχής σε μεσογειακό περιβάλλον (P. Petropoulos et al, 2010).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής των μεθόδων τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση καμένων εκτάσεων αποτελούν τα δάση του Αμαζονίου, όπου παρουσιάζουν την διαδικασία υποβάθμισης των δασών χρησιμοποιώντας κλασματικές εικόνες. Στην μελέτη αυτή, η προσέγγιση συνίστατο στη χαρτογράφηση των αποψιλωμένων περιοχών και στη χαρτογράφηση

των δασών που υποβαθμίστηκαν από πυρκαγιές χρησιμοποιώντας τμηματοποίηση εικόνων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εικόνες της βλάστησης, του εδάφους και του κλάσματος σκιάς επέτρεψαν τη χαρτογράφηση και την παρακολούθηση και τον διαχωρισμό των υποβαθμισμένων δασικών εκτάσεων που προκλήθηκαν από πυρκαγιές. Έτσι, η σύγκριση των αποτελεσμάτων Landsat Operational Land Imager (OLI) και RapidEye για το έτος 2013 έδειξε συνολική ακρίβεια 94%. Βασικό συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι η χωρική ανάλυση παίζει σημαντικό ρόλο στη χαρτογράφηση των επιλεκτικών χαρακτηριστικών καταγραφής λόγω των χαρακτηριστικών τους. Επομένως, σε σύγκριση με τα δεδομένα Landsat, η διαθεσιμότητα δεδομένων υψηλότερης χωρικής και χρονικής ανάλυσης, όπως παρέχονται από το Sentinel-2, αναμένεται να βελτιώσει την αξιολόγηση της υποβάθμισης των δασών (Edemir Shimabukuro et al., 2018).

2.3.3. Παρακολούθηση αναβλάστησης

Η αποκατάσταση ενός φυσικού οικοσυστήματος αποτελεί μια δυναμική διαδικασία που χρήζει διαρκούς παρατήρησης, έρευνας και παρακολούθησης. Μακροχρόνιες παρατηρήσεις στα ελληνικά δασικά οικοσυστήματα έχουν αποδείξει ότι η φύση ακολουθεί μια διαδικασία αποκατάστασης της φυσικής βλάστησης αρκετά γρηγορά μετά το πέρας μιας δασικής πυρκαγιάς (Καλλίρης,2017). Ως παράγοντας αλλαγής ως προς την επιτάχυνση της τροποποίησης του τοπίου της βλάστησης, οι δασικές πυρκαγιές ελέγχουν τις προϋποθέσεις για την εγκατάσταση και τη διαδοχή της βλάστησης. Σε όλα τα οικοσυστήματα τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς καθορίζουν τη δομή, τη σύνθεση και τη λειτουργία των δασών μετά την πυρκαγιά (Chu and Guo, 2014).

Η διερεύνηση της αναγέννησης των δασών μετά την πυρκαγιά είναι ζωτικής σημασίας για τη μελέτη της δυναμικής των δασών και του παγκόσμιου κύκλου άνθρακα. Από περιβαλλοντικής άποψης, οι πυρκαγιές προκαλούν αλλαγές στο κάλυμμα εδάφους, απώλεια αποθεμάτων άνθρακα και αλλαγές στη σύνθεση του εδάφους και την υδρογεωμορφολογική συμπεριφορά του (Fernández-Guisuraga et al., 2019). Παρ 'όλα αυτά, η μεσογειακή βλάστηση είναι αρκετά προσαρμοσμένη στις διαταραχές πυρκαγιάς, με τα μεσογειακά είδη να έχουν αναπτύξει οικολογικές στρατηγικές μετά την πυρκαγιά, όπως την ικανότητα εκ νέου εκροής, την ανθεκτικότητα της τράπεζας σπόρων ή την ικανότητα ανάπτυξης ή διασποράς. Υπό αυτή την έννοια, η ανάλυση των Μεγάλων Δασικών Πυρκαγιών αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον επειδή οι επιπτώσεις που προκαλούν είναι καταστροφικές (Fernández-Guisuraga et al., 2019). Είναι

σημαντικό πως η διαδοχή των δασών είναι μια σημαντική οικολογική διαδικασία που καθορίζει τα βιοφυσικά, βιολογικά και βιογεωχημικά χαρακτηριστικά των δασικών οικοσυστημάτων. Τα αποτελέσματα μιας δασικής διαδοχής ποικίλλουν ανάλογα με τις συνθήκες του χώρου πριν και μετά την πυρκαγιά, την έκταση της πυρκαγιάς και την σοβαρότητα της πυρκαγιάς (Chu and Guo, 2014).

Στα επιρρεπή στις πυρκαγιές οικοσυστήματα, η αξιολόγηση της ανάκτησης έχει ουσιαστική επίπτωση στις στρατηγικές διαχείρισης μετά την πυρκαγιά με στόχο την αποφυγή διαβρωτικών διεργασιών σε μεγάλες καμένες περιοχές. Έτσι, η αξιολόγηση της δυνατότητας εφαρμογής των μοντέλων ανάκτησης (post-fire recovery model) όπου αναπτύχθηκαν σε συγκεκριμένες τοποθεσίες σε άλλα γεωγραφικά/κλιματικά περιβάλλοντα θα μπορούσε να προσφέρει ένα πολύτιμο εργαλείο στη λήψη αποφάσεων για την διαχείριση μετά την πυρκαγιά. Αυτό θα επέτρεπε την εκμετάλλευση δεδομένων που συλλέγονται σε άλλες τοποθεσίες πυρκαγιών μειώνοντας τις προσπάθειες συλλογής δεδομένων στην περιοχή ενδιαφέροντος. Ωστόσο, η δυνατότητα εφαρμογής μοντέλων ανάκτησης μετά την πυρκαγιά μεταξύ καμένων τοποθεσιών παραμένει μια πρόκληση, επειδή η δομή και η σύνθεση της βλάστησης μετά την πυρκαγιά επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από κλιματικούς παράγοντες όπως, οι γεωγραφικές κλίσεις, η βροχόπτωση και η θερμοκρασία καθώς και οι ιδιότητες του καθεστώτος πυρκαγιάς (Fernández-Guisuraga et al., 2019).

Τα μεσογειακά είδη έχουν αναπτύξει οικολογικές στρατηγικές που εφαρμόζονται μετά την πυρκαγιά, στις οποίες συγκαταλέγονται η ικανότητα βλάστησης αλλά και η ανθεκτικότητα αυτής. Ωστόσο, οι αλλαγές των καλύψεων γης και οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχουν επηρεάσει ριζικά τη δυναμική της οικολογικής διαδοχής μετά την πυρκαγιά στο άμεσο μέλλον.

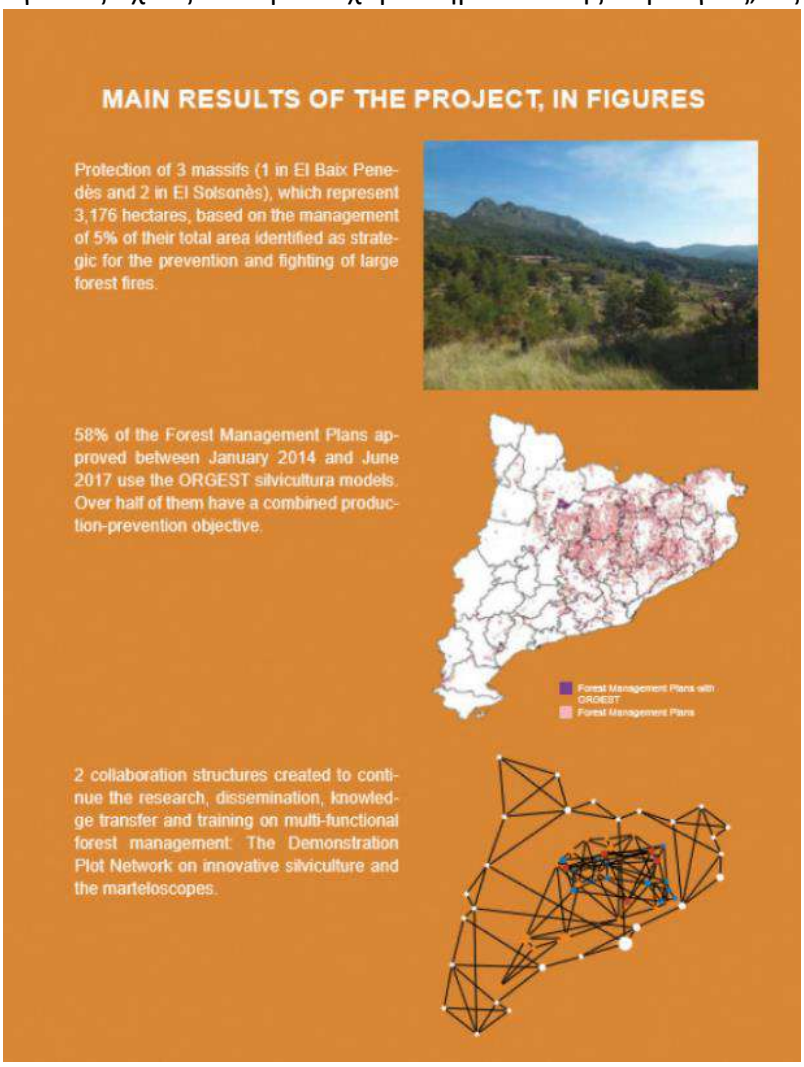
Γίνεται κατανοητό πως τα δασικά οικοσυστήματα οφείλουν να προσαρμοστούν στις διάφορες κλιματικές αλλαγές αλλά και αλλαγές που προκαλούν υψηλότερο κίνδυνο ακραίων κλιματικών φαινομένων, όπως παρατεταμένες ξηρασίες (Viana-Soto et al, 2020). Αξίζει να σημειωθεί ακόμη , πως η ταχύτητα της ανάκτησης της βλάστησης μπορεί να ελέγξει την έκταση και ένταση των διαφόρων περιβαλλοντικών, κοινωνικών, οικονομικών και πολιτικών επιπτώσεων, καθώς ο ρυθμός αναγέννησης της βιομάζας της βλάστησης μπορεί να ποικίλλει σημαντικά. Στην περιοχή της Μεσογείου, όπου ο παράγοντας της πυρκαγιάς έχει επηρεάσει σε

μεγάλο βαθμό τα οικολογικά οικοσυστήματα για χιλιετίες, τα ποσοστά της δυναμικής ανάκτησης μετά την πυρκαγιά μεταβάλλονται χωρικά και εξαρτώνται από μια ποικιλία παραγόντων. Οι κλιματικοί παράγοντες, όπως οι έντονες βροχοπτώσεις του φθινοπώρου, γενικά οδηγούν σε υψηλότερη πιθανότητα διάβρωσης του εδάφους μετά την πυρκαγιά, γεγονός που επηρεάζει την δυναμική της αναγέννησης της βλάστησης. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι ο παράγοντας της αναγέννησης επηρεάζεται συχνά από την τοπογραφία της περιοχής (Petropoulos et al, 2014).

Η παρακολούθηση της δυναμικής ανάκτησης μετά την πυρκαγιά είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας και την εξασφάλιση των σχετικών πληροφοριών που θα βελτιώσουν τη διαχείριση και θα υποστηρίξουν την αποκατάσταση του οικοσυστήματος μετά από πυρκαγιές. Η τηλεπισκόπηση παρέχει ένα οικονομικά αποδοτικό εργαλείο για την παρακολούθηση της ανάκτησης βλάστησης μετά την πυρκαγιά (Pérez-Cabello et al, 2021). Είναι γεγονός πως οι δορυφορικές εικόνες προσφέρουν μια λιγότερο δαπανηρή εναλλακτική λύση και παρέχουν ευρύτερες πληροφορίες για τις καμένες περιοχές λαμβάνοντας βιοφυσικές μεταβλητές πυρκαγιών. Παράλληλα, οπτικοί αισθητήρες μεσαίας ανάλυσης, όπως οι Landsat, επιτρέπουν την παρακολούθηση της βλάστησης στις καμένες περιοχές για περισσότερα από 40 χρόνια.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.6, ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα διαχείρισης για την αύξηση της ανθεκτικότητας των δασών, αποτελεί αυτό στην Καταλονία. Το πρόγραμμα LIFE+ DEmORGEST31 (*https://cinea.ec.europa.eu/programmes/life_en*) έχει ενισχύσει την ικανότητα των ιδιοκτητών δασών και των επαγγελματιών του δάσους στην Καταλονία να προστατεύουν τα δάση από πυρκαγιές κατά τρόπο βιώσιμο.

Οι παράγοντες που καθορίζουν το ρυθμό αναγέννησης της βλάστησης μετά από μια πυρκαγιά είναι πολλαπλοί και ο πλήρης προσδιορισμός ή η μοντελοποίησή τους είναι δύσκολη (Morresi et al, 2019). Αυτοί οι παράγοντες σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και το ιστορικό ζωής των φυτικών ειδών. Στις εκτιμήσεις αναγέννησης τα επίπεδα σοβαρότητας της πυρκαγιάς, η τοπογραφία (υψόμετρο, κλίση και προσανατολισμός), το κλίμα μετά την πυρκαγιά και η κατηγορία κάλυψης της βλάστησης είναι τα πιο χρησιμοποιούμενα (Viana-Soto et al, 2017). Είναι γεγονός πως η αλληλεπίδραση μεταξύ κλιματικών αλλαγών και καλύψεων γης αυξάνει τη συχνότητα, την επιφάνεια, και τη σοβαρότητα των πυρκαγιών στη λεκάνη της Μεσογείου. Η ανάκτηση δασών σε κλίμακα τοπίου μοντελοποιείται συχνά ως μια γρήγορη και ομοιογενή διαδικασία. Ωστόσο, ανάλογα με το επίπεδο σοβαρότητας της πυρκαγιάς, μπορεί να είναι πολύ διαφοροποιημένη σε πολλαπλά επίπεδα, με μεγάλες αλλαγές στη δομή των δασών και στη σύνθεση των ειδών (Morresi et al, 2019).



Εικόνα 2.6: Παράδειγμα LIFE+ DEmORGEST

*Πηγή:https://ec.europa.eu/environment/system/files/2021-03/ SR45_broch_EL_v6.0_signed.pdf)_*

Αυτό που χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό των μεταβολών του ρυθμού ανάπτυξης της βλάστησης, είναι το NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), οπού αποτελεί τον δείκτη βλάστησης. Τα πρώτα αποτελέσματα στην εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς, αν και όχι σε πραγματικό χρόνο, ελήφθησαν μέσω αναλύσεων από δορυφόρους που

ανήκουν στη σειρά National Oceanographic and Atmospheric Administration, μέσω του αισθητήρα AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Στην συνέχεια, ενσωματώθηκαν περισσότεροι δείκτες που προέρχονταν από τους ίδιους αισθητήρες ώστε να βελτιωθούν οι αλγόριθμοι και να συμπεριληφθούν οι πληροφορίες σχετικά με τις μετεωρολογικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία της επιφάνειας που λαμβάνεται μέσω δορυφόρων. Ο συνδυασμός του NDVI με την επιφανειακή θερμοκρασία έχει δώσει τη θέση του σε έναν μικτό δείκτη στον οποίο η κλίση γραμμικής παλινδρόμησης και στα δύο μεγέθη που καθορίζουν τα κύτταρα του εδάφους, παρουσιάζει καλή συσχέτιση με την εξατμισοδιαπνοή της βλάστησης και το υδατικό στρες το εισήγαγε για να λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο στο πλαίσιο της λειτουργίας σε χώρες της Μεσογείου. Η δυνατότητα χρήσης της φασματικής πληροφορίας στο μεσαίο υπέρυθρο, στην περιοχή των 1,6 m, έχει δώσει τη θέση της στην εισαγωγή άλλων δεικτών που σχετίζονται με την υγρασία του καυσίμου, καθώς η ανακλαστικότητα της βλάστησης σε αυτό το διάστημα μήκους κύματος επηρεάζεται έντονα από το νερό που περιέχεται σε αυτό (Casanova, 2008).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η αξιοποίηση της τηλεπισκόπησης και των Συστημάτων Γεωγραφικών πληροφοριών, ως προς τη ανάκτηση της βλάστησης μετά την πυρκαγιά έχει μακρά παράδοση στη χρήση του δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης (NDVI) λόγω της καλά εδραιωμένης σχέσης μεταξύ του δείκτη και της υπέργειας βιομάζας σε ένα ευρύ φάσμα οικοσυστημάτων. Σε κλίμακα μέτριας ανάλυσης, τα δεδομένα Landsat είναι συνήθως το πρότυπο επιλογής. Μια πληθώρα μελετών απέδειξε τη χρησιμότητα του Landsat NDVI για την αξιολόγηση της δυναμικής της βλάστησης μετά την πυρκαγιά. Αυτές οι μελέτες περιορίστηκαν σε περιορισμένο αριθμό εικόνων, ενώ ορισμένες άλλες μελέτες, ωστόσο, χρησιμοποίησαν χρονοσειρές χαμηλής ανάλυσης για την παρακολούθηση των διαδικασιών αναγέννησης. Σε βάρος της χωρικής λεπτομέρειας, αυτές οι μελέτες προσφέρουν το πλεονέκτημα της λήψης εικόνας με υψηλή χρονική συχνότητα (Veraverbeke et al., 2012).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σημασίας της παρακολούθησης της αναβλάστησης που παρουσιάζεται είναι ότι η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα δασικά τοπία ανακάμπτουν μετά από γεγονότα διαταραχής του φυσικού οικοσυστήματος, είναι κρίσιμη για την κατανόηση των οικολογικών ελέγχων στην ανάκτηση και για την αξιολόγηση των αλλαγών στα δασικά αποθέματα άνθρακα κατά τη διάρκεια του κύκλου διαταραχής (Franks et al, 2017). Οι πυρκαγιές

του 1988 στο Εθνικό Πάρκο Γέλοουστοουν ήταν ένα από τα μεγαλύτερα πυροσβεστικά συγκροτήματα στην πρόσφατη ιστορία των Η.Π.Α. και αποτέλεσαν μια ευκαιρία να μελετηθεί η ανάκτηση δασών. Όπως φάνηκε, η επιλογή της πλατφόρμας τηλεπισκόπησης για την παρακολούθηση ανάκτησης πυρκαγιάς εξαρτάται τόσο από τη σοβαρότητα όσο και από το μέγεθος της πυρκαγιάς. Όπως έχει σημειωθεί, καμένες περιοχές μεγαλύτερες από 50 εκτάρια μπορούν να χαρτογραφηθούν με αισθητήρες μέσης έως χαμηλής ανάλυσης όπως WiFS-IRS, NOAA AVHRR, MODIS ή Spot-Vegetation. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά τα αρχεία δεν διαθέτουν το μακρύ αρχείο του Landsat που εμποδίζει την παρακολούθηση της ανάκτησης εγκαυμάτων για αρκετές δεκαετίες. Το Εθνικό Πάρκο Yellowstone (YNP), ΗΠΑ είναι το παλαιότερο πάρκο της χώρας που ιδρύθηκε το 1872 και το επίκεντρο της μελέτης ήταν τα υποαλπικά οροπέδια που επλήγησαν από τις πυρκαγιές του 1988. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του Landsat, ενώ για την ανάλυση, σημασία δόθηκε σε δύο δορυφορικές μετρήσεις που σχετίζονται με την κατάσταση της βλάστησης.

Ο Δείκτης Κανονικής Διαφοράς Βλάστησης (NDVI), χρησιμοποιείται ευρέως ως δείκτης αξιολόγησης της «πράσινης» βλάστησης, και η μέτρησή του, είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της απόκρισης πυρκαγιάς με την ζώνη Landsat 5, η οποία εμπίπτει στο τμήμα υπέρυθρων βραχέων κυμάτων (SWIR) του φάσματος. Αυτή η μελέτη μπόρεσε να δείξει ότι οι δορυφορικές μετρήσεις ήταν σε θέση να περιγράψουν πάνω από το 80% της μεταβλητότητας που βρέθηκε στις μεταβλητές δασικής αναγέννησης που συλλέγονται στο έδαφος (LAI,ANPP) για μεμονωμένα έτη και περίπου το 60-70% σε διάστημα έξι ετών κατά την ανάκτηση της βλάστησης. Παράλληλα, έγινε αντιληπτό ότι αυτές οι πληροφορίες είναι χρήσιμες για την παρακολούθηση ή τη μοντελοποίηση του τρόπου με τον οποίο τα δάση αντιδρούν μετά από διαταραχή πυρκαγιάς μεγάλης κλίμακας, αλλά κρίνεται επιτακτική ανάγκη για μέριμνα και κατανόηση των περιορισμών αυτών των δορυφορικών μετρήσεων (G. Masek et al, 2017).

2.4Τελικές Παρατηρήσεις

Λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις πληροφορίες που προέκυψαν από την βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι μια πυρκαγιά έχει ολέθριες συνέπειες για την ζωή των ανθρώπων αλλά και για το οικοσύστημα. Όπως έχει αποδειχθεί, οι πυρκαγιές επηρεάζονται από διάφορους παράγοντες, με αποτέλεσμα να είναι επιτακτικής ανάγκης η διαχείριση αυτών. Για τον λόγο αυτό, τόσο η τηλεπισκοπηση όσο και Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, συντελούν τόσο στην εκτίμηση της σοβαρότητας μιας πυρκαγιάς όσο και στην εκτίμηση του κινδύνου εξάπλωσης.

Με τα δεδομένα που έχουν προκύψει, γίνεται αντιληπτό ότι η αναγέννηση του φυσικού τοπιού είναι ζωτικής σημασίας. Στην εργασία γίνεται κατανοητό ότι η παρακολούθηση της αναγέννησης του φυσικού τοπιού παίζει καταλυτικό ρολό στην διαδικασία αποκατάστασης του φυσικού οικοσυστήματος αλλά και στην κατανόηση των ελέγχων σχετικά με την αναγέννηση και τη διαδοχή των δασών και την ανίχνευση της αλλαγής στις φυτικές κοινότητες μετά την πυρκαγιά. Για τον λόγο αυτό με τα μέσα δορυφορικής τηλεπισκόπησης που θα χρησιμοποιηθούν θα επιτευχθεί η παρατήρηση της εξέλιξης της αναβλάστησης στην περίοδο των 14 χρονών, αλλά και η αξιολόγηση των οικολογικών και χωρικών επιπτώσεων της πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης. Όπως, έχει γίνει κατανοητό οι τεχνικές τηλεπισκόπησης έχουν ως στόχο να αξιολογήσουν τη δυνατότητα εφαρμογής των εργαλείων της στη διαχείριση μετά την πυρκαγιά κατά την μεγάλη πυρκαγιά που εκδηλώθηκε στο οικοσύστημα της περιοχής μελέτης.

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή περιοχής μελέτης και δεδομένων

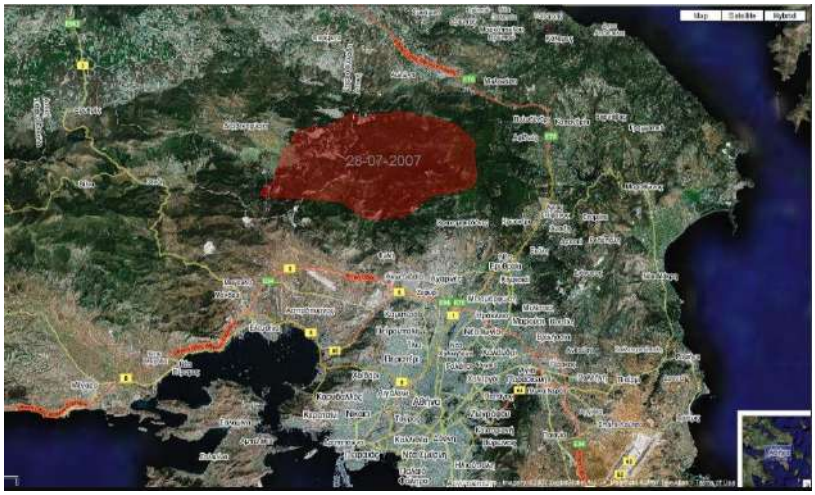
3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο βασικό θέμα ανάλυσης αποτελεί η περιγραφή της περιοχής μελέτης αλλά και η περιγραφή των δεδομένων που έχουν χρησιμοποιηθεί για την ικανοποίηση των στόχων της παρούσης μελέτης.

Όπως είναι γνωστό για να επιτευχθεί η αξιολόγηση των καμένων εκτάσεων απαραίτητη είναι η χαρτογράφηση της καμένης περιοχής. Στην σημερινή εποχή κύρια λύση στην χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων έχουν αποτελέσει οι δορυφορικές εικόνες χαμηλής και μέσης - υψηλής χωρικής ανάλυσης, όπως τα LANDSAT δεδομένα, οπού αντίστοιχα θα χρησιμοποιηθούν και στην υπό μελέτη εργασία.

3.2.Περιγραφή περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε, όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 3.1, ήταν ο Εθνικός δρυμός Πάρνηθας οπού το καλοκαίρι, στις 28 Ιουνίου του 2007 ξέσπασε σε αυτόν μια καταστροφική πυρκαγιά. Η Πάρνηθα αποτελεί το ψηλότερο βουνό της Αττικής, όπου βρίσκεται στα 1413 μέτρα. Είναι γεγονός πως εκτείνεται σε μια έκταση περίπου 300,000 στεμμάτων με έντονο ανάγλυφο. Λόγω του φυσικού και γεωμορφολογικού της πλούτου, η περιοχή περιλαμβάνεται στο Ευρωπαϊκό Οικολογικό Δίκτυο Natura 2000 τόσο ως «Τόπος Ιδιαίτερου Κοινοτικού Ενδιαφέροντος» όσο και ως «Ειδική Ζώνη Διατήρησης» (Οικολογικός απολογισμός της καταστροφικής πυρκαγιάς του Ιουνίου 2007 στην Πάρνηθα, 2017).



Εικόνα 3.1: Περιοχή μελέτης

(Πηγή: https://dasarxeio.com/)

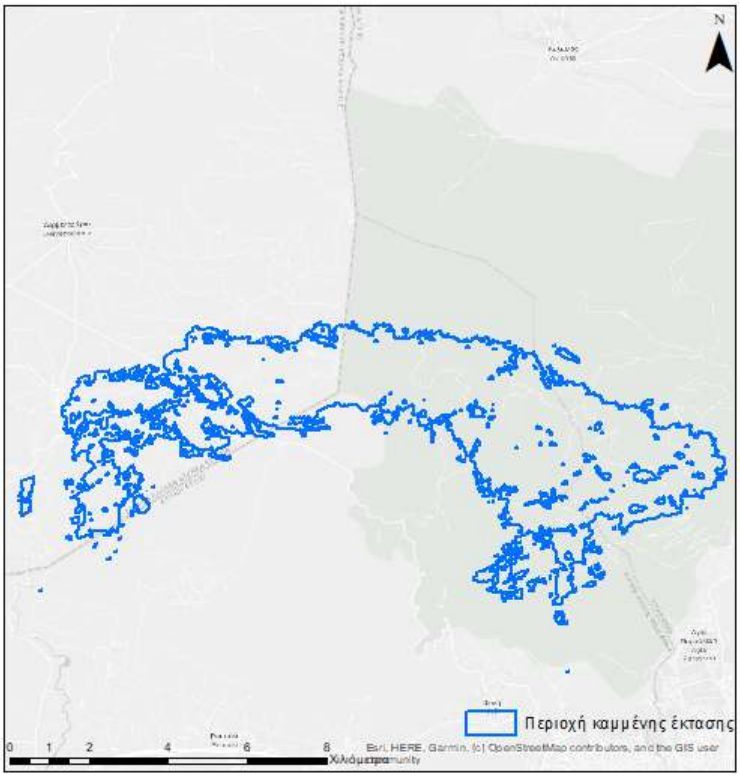
Αξίζει να σημειωθεί πως η Πάρνηθα αποτελεί τον πιο σημαντικό πνεύμονα πρασίνου της Αττικής, αλλά και τον βασικότερο μηχανισμό μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα που ρέει από τον Βορρά προς την Αθήνα. Επιπλέον, αποτελεί ένα φυσικό μνημείο το οποίο βρίσκεται δίπλα στην πρωτεύουσα, ενώ στην περιοχή έχουν καταγραφεί 1,116 περίπου είδη φυτών, εκ των οποίων τέσσερα είναι ενδημικά

είδη που συναντώνται αποκλειστικά στην Πάρνηθα. Συναρτήσει όλων αυτών προκύπτει το συμπέρασμα ότι η Πάρνηθα είναι μια περιοχή υψηλής περιβαλλοντικής σημασίας διασφαλίζοντας τις καλύτερες δυνατές συνθήκες ζωής αλλά και περιβαλλοντική ισορροπία στον ευρύτερο αστικό ιστό (https://dasarxeio.com/).

Η περιοχή αποτελεί το πιο εκτεταμένο και ψηλότερο βουνό στην περιοχή της Αθήνας και διακρίνεται για τον φυσικό της πλούτο, καθώς έχει χαρακτηριστεί ως Εθνικός Δρυμός από το 1961. Η Πάρνηθα με υψόμετρο 1,410 μ., είναι το ψηλότερο από τα τέσσερα βουνά που περιβάλλουν το λεκανοπέδιο της Αττικής και βρίσκεται 30 χλμ. βορειοδυτικά του κέντρου της Αθήνας. Τα κύρια υποστρώματα είναι ο ασβεστόλιθος και το μάρμαρο, ακολουθούμενα από σχιστόλιθους και λίγο φλύσχη. Η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 822 mm, ενώ η χλωρίδα της περιοχής είναι εξαιρετικά πλούσια, με 1,093 είδη φυτών, 93 από τα οποία είναι ελληνικά ενδημικά (Mallinis et al, 2014). Η βασική ζώνη του Natura καλύπτει έκταση 3,800 εκτάρια, με το ελληνικό ελατό να εκτείνεται από υψόμετρο περίπου 800 μέτρων μέχρι την κορυφή του βουνού. Σε χαμηλότερο υψόμετρο, η ουδέτερη ζώνη της αυστηρά προστατευόμενης περιοχής καλύπτεται κυρίως από δάση, που επεκτείνονται μέχρι τους πρόποδες του βουνού (Christopoulou et al, 2018). Παράλληλα, η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη μεταβλητότητα στα τοπογραφικά χαρακτηριστικά, καθώς περιλαμβάνει πεδινές και ορεινές περιοχές με κλίσεις που κυμαίνονται μεταξύ 3% και 90% (Karamesouti et al., 2016).

Έτσι γίνεται αντιληπτό πως το καλοκαίρι του 2007 άλλαξε ριζικά η φυσιογνωμία της περιοχής, καθώς η πυρκαγιά είχε ολέθριες επιπτώσεις στην περιοχή, καθώς στις 28 Ιουνίου της χρονιάς σημειώθηκε η δριμύτερη ιστορικά πυρκαγιά στον Εθνικό Δρυμό της Πάρνηθας. Η φωτιά ξεκίνησε στα Δερβενοχώρια Αττικής, ενώ εξαπλώθηκε γρήγορα στα δυτικά του βουνού, περνώντας στον Εθνικό Δρυμό. Κατά τον απολογισμό της πυρκαγιάς, σημειώθηκε ότι 48,744 στρέμματα γης κάηκαν συνολικά στην περιοχή, εκ των οποίων περίπου τα 36.338 αποτελούσαν τμήμα του Εθνικού Δρυμού Πάρνηθας. Η δενδρώδης και θαμνώδης βλάστηση της περιοχής κάηκε ολοσχερώς, αφήνοντας ελάχιστες νησίδες πρασίνου. Αξίζει να σημειωθεί, ότι τα 27,200 στρέμματα της καμένης αυτής έκτασης βρίσκονταν εντός των ορίων της περιοχής Natura 2000 που βρίσκεται στην Πάρνηθα, γεγονός που δείχνει ότι κάηκε περίπου το 18% της περιοχής Natura (https://dasarxeio.com). Από τα παραπάνω διαφαίνεται ο χαρακτήρας της πυρκαγιάς, καθώς χαρακτηρίστηκε σαρωτικής μορφής που κατέστρεψε το σύνολο της βλάστησης. Ωστόσο,

μετά από το μέγεθος της φυσικής καταστροφής που προκλήθηκε γρηγορά ακολούθησαν ενέργειες για την αποκατάσταση του περιβάλλοντος. Αρχικά, εντατικοποιήθηκε η συνεργασία των αρμόδιων φορέων, εθελοντών και οργανώσεων μέσω της εφαρμογής έργων αντιπυρικής προστασίας, της προμήθειας σχετικού εξοπλισμού αλλά και της δημιουργίας αντιπλημμυρικών και αντιδιαβρωτικών έργων(https://dasarxeio.com). Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται η θέση της περιοχής μελέτης. Η δημιουργία του περιγράμματος της περιοχής μελέτης, πραγματοποιηθηκε στο πρόγραμμα Envi, όπου μέσω του **BasicTools->Region of Interest->ROI Tool**, απομονωθηκε η περιοχη μελέτης και στην συνέχεια μετατράπηκε σε αρχείο shapefile ώστε να επεξεργαστεί στο Arcmap Gis.



Εικόνα 3.2.: Χάρτης περιοχής μελέτης

Όπως έχει προκύψει η πυρκαγιά που ξέσπασε στην Πάρνηθα, άλλαξε για πάντα την περιοχή, καθιστώντας δύσκολη την αποκατάσταση του φυσικού τοπίου και την επιστροφή του στην πρότερη του μορφή. Παρακάτω απεικονίζονται πρόσφατες εικόνες της περιοχής μελέτης. Στις εικόνες 3.3 και 3.4, παρατηρούνται αναδασώσεις που έχουν υλοποιηθεί από διάφορες δράσεις. Στις εικόνες 3.5 και 3.6 φαίνεται ότι οι περιοχές όπου πριν την πυρκαγιά υπήρχαν έλατα τώρα έχουν μόνο χαμηλή βλάστηση.

Εικόνα 3.2.: Η Πάρνηθα το 2022(Προσωπικό αρχείο)

Εικόνα 3.3:Η Πάρνηθα το 2022(Προσωπικό αρχείο)

Εικόνα 3.4.: Η Πάρνηθα το 2022(Προσωπικό αρχείο)

Εικόνα 3.5:Η Πάρνηθα το 2022(Προσωπικό αρχείο)

Η αλλαγή της δυναμικής κάλυψης γης θεωρείται επί του παρόντος ως η μοναδική πιο σημαντική μεταβλητή της παγκόσμιας αλλαγής που επηρεάζει τα οικολογικά συστήματα. Οι πυρκαγιές καθώς θεωρούνται από τις πιο διαδεδομένες οικολογικές διαταραχές των φυσικών οικοσυστημάτων, επηρεάζουν δραματικά τη δυναμική της κάλυψης γης σε ποικίλες χωρικές και χρονικές κλίμακες ως αποτέλεσμα της πλήρους ή μερικής απομάκρυνσης της φυτικής κάλυψης.

Για τον λόγο αυτό η γνώση της χωροχρονικής κατανομής της βλάστησης μετά το πέρας της πυρκαγιάς είναι καίριας σημασίας, καθώς είναι απαραίτητη για την εκτίμηση των επιπτώσεων της πυρκαγιάς και για την κατανόηση των δυνάμεων που προκαλούν αλλαγές στα οικοσυστήματα μετά την πυρκαγιά (P. Petropoulos et al, 2014).

3.2. Περιγραφή Δεδομένων

3.2.1.Δορυφορικά Δεδομένα

Τα δορυφορικά δεδομένα χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρονιά για την παρατήρηση της διαταραχής των δασών και την αναγέννηση αυτών, με τα Landsat 2008, που είναι διαθέσιμα ατμοσφαιρικά και ραδιομετρικά διορθωμένα, παρέχοντας νέες ευκαιρίες για βελτιωμένη κατανόηση των μηχανισμών των δασικών αλλαγών (Viana-Soto et al, 2020).

Το σύστημα Landsat έχει παράσχει τις πιο μακροχρόνιες χρονοσειρές συστηματικά συλλεγόμενων δεδομένων τηλεπισκόπησης σε ανάλυση 30 m, κάτι που ωφελεί σε μεγάλο βαθμό τις υπηρεσίες διαχείρισης γης. Τα τελευταία χρόνια, το αρχείο δεδομένων Landsat είναι πιο εύκολα διαθέσιμο, καθιστώντας δυνατή τη λήψη μεγάλου όγκου των εικόνων για παρακολούθηση της κάλυψης και της αλλαγής χρήσης γης, τα οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την ανάπτυξη καλύτερης κατανόησης των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων των διαταραχών πυρκαγιάς (Chen et al., 2011). Παράλληλα, η χωρική ανάλυση Landsat επιτρέπει την ανίχνευση τόσο μεγάλων όσο και μικρών πυρκαγιών και το μεγάλο οπτικό πεδίο αισθητήρα του επιτρέπει την παρατήρηση πολλών καμένων περιοχών σε μία εικόνα (Petropoulos et al, 2014).

Έχει αποδειχθεί ότι πολλές φασματικές ζώνες είναι ευαίσθητες σε σημαντικές αλλαγές στη φασματική ακτινοβολία ως απόκριση στην καύση. Αυτές οι φασματικές ζώνες δύνανται να ανιχνεύσουν αξιόπιστα τις καμένες περιοχές, τη σοβαρότητα της καύσης και τις αλλαγές στη βλάστηση. Για παράδειγμα, οι εγγύς υπέρυθρες (Band 4-5), οι μεσαίες υπέρυθρες (Band 7) και οι θερμικές ζώνες (Band 6) είναι ευαίσθητες στις αλλαγές μεγέθους της καύσης και χρησιμοποιούνται συχνά για μελέτες επιπτώσεων πυρκαγιάς σε περιοχές με βλάστηση. Παράλληλα, φασματικοί δείκτες, όπως ο κανονικοποιημένος λόγος καύσης (NBR), ο δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης (NDVI) και ο ενισχυμένος δείκτης βλάστησης (EVI), όπως αναφέρθηκαν και στην βιβλιογραφική ανασκόπηση, συνδυάζουν και εξάγουν χρήσιμες

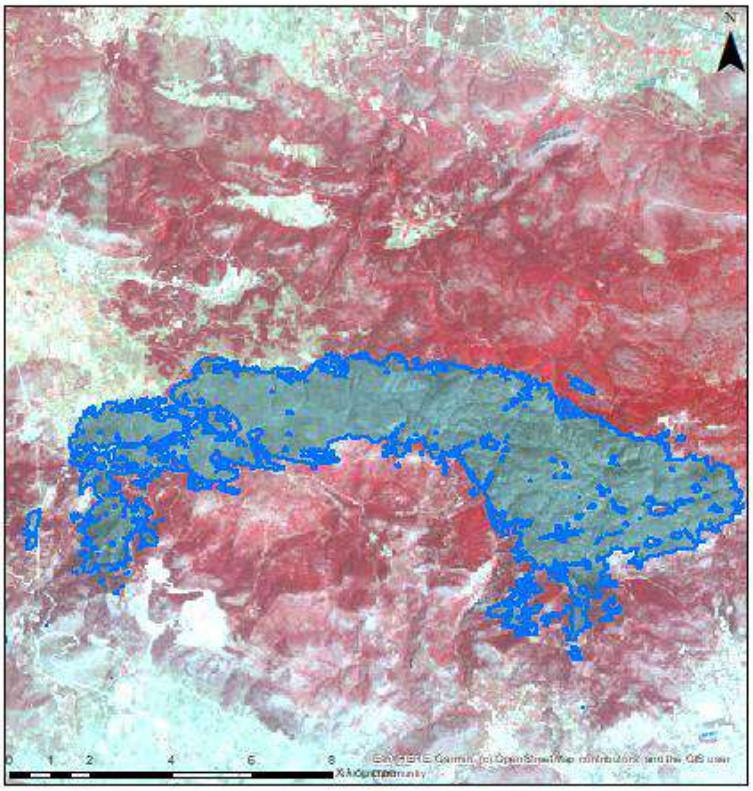
πληροφορίες από διάφορες φασματικές ζώνες, ενώ έχουν χρησιμοποιηθεί και για τη διερεύνηση αλλαγών βλάστησης που προκαλούνται από φωτιά (Chen et al., 2011).

Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα Landsat για πέντε διαφορετικές ημερομηνίες ώστε να καλύπτουν χρονικά το φαινόμενο της πυρκαγιάς που έπληξε την Πάρνηθα, τόσο πριν όσο και μετρά. Πηγή των δεδομένων ήταν το USGS, και επιλέχθηκαν δεδομένα του αισθητήρα Landsat 5 και Landsat 8, Level 2 και Collection 2,τα οποία ήταν γεωμετρικά και ατμοσφαιρικά διορθωμένα. Τα παρακάτω δεδομένα, όπως φαίνονται και στον πίνακα 3.1, είναι κατάλληλα για την επεξεργασία και ανάλυση της αναγέννησης της βλάστησης που θα ακολουθηθεί, καθώς δίνουν την δυνατότητα να παρατηρηθεί ο ρυθμός αναγέννησης της βλάστησης του φυσικού τοπιού της περιοχής ανά το διάστημα των πέντε χρόνων. Ακόμη ένα πλεονέκτημα των εικόνων είναι η άμεση διαθεσιμότητά τους και το μηδαμινό κόστος χρήσης αυτών, καθώς η πρόσβαση σε αυτές είναι ελεύθερη.

Πίνακας 3.1: Ημερομηνίες Landsat εικόνων της περιοχής μελέτης

	Ημερομηνία	Τύπος Εικόνας	Path	Row
1η Εικόνα	17-06-2007	Landsat 5	183	033
2η Εικόνα	03-07-2007	Landsat 5	183	033
3η Εικόνα	15-08-2011	Landsat 5	183,	033
4η Εικόνα	30-07-2017	Landsat 8	183	033
5η Εικόνα	10-08-2021	Landsat 8	183	033

Όπως είναι ευδιάκριτο πρόκειται για μια καθαρά δασική περιοχή οπού κατά κύριο λόγο απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα η βλάστηση. Χαρακτηριστική είναι η εικόνα λίγες μέρες μετά την πυρκαγιά, όπου απεικονίζει την καμένη περιοχή της Πάρνηθας, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7:Εικόνα 03-07-2007

3.3.2.Χρήσεις γης (Corine)

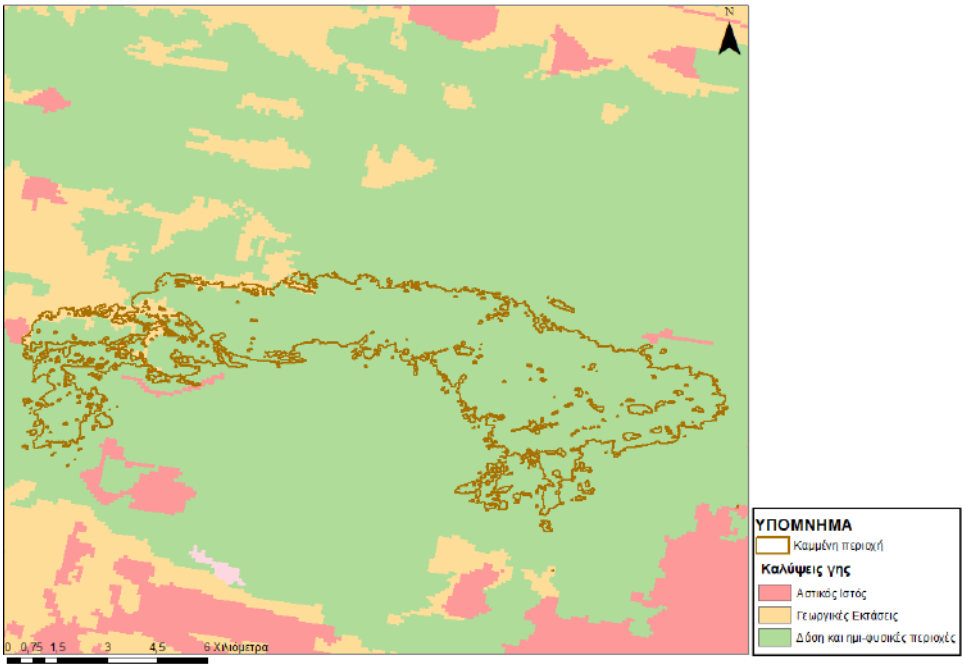
Οι καλύψεις γης αποτελούν βασική μεταβλητή του γήινου συστήματος που έχει γενικά δείξει στενή συσχέτιση με τις ανθρώπινες δραστηριότητες και το φυσικό περιβάλλον (Petropoulos et al., 2020).

Οι αλλαγές στις καλύψεις γης σχετίζονται με τον κίνδυνο πυρκαγιάς μέσω των αλλαγών στο φορτίο καυσίμου που σε συνάρτηση με την τοπογραφία και τον καιρό, είναι οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ένταση και τον ρυθμό εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Η βάση δεδομένων CORINE Land Cover χρησιμοποιείται για την ανάλυση των αλλαγών στην κάλυψη της γης στη νότια Ευρώπη μεταξύ 1990 και 2006 (San-Miguel-Ayanz et al., 2012). Αυτή η βάση δεδομένων έχει χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση αλλαγών των χρήσεων γης, ενώ έχει επιβεβαιωθεί και η χρησιμότητά της για την υποστήριξη περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών αναλύσεων πολύ διαφορετικών χαρακτηριστικών. Το CLC έχει χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση της ρύπανσης, για την κατάρτιση δασυμμετρικών χαρτών πυκνότητας πληθυσμού για τον αποκλεισμό μη κατοικημένων περιοχών από την ανάλυση και τη λήψη ακριβών γεωδημογραφικών δεδομένων, για την υποστήριξη των οικονομετρικών

υπολογισμών για το περιβαλλοντικό κόστος, τη συσχέτιση της κινητικότητας με την αστική μορφολογία και για την ανάπτυξη του περιβάλλοντος. Είναι γεγονός πως έχει καλύψει την ανάγκη προσθήκης χωρικών πληροφοριών στη μελέτη των δυναμικών διαδικασιών αλλαγής στη χρήση γης και των σχετικών φαινομένων (Pacheco and, 2013).

Όσον αφορά τη σύνθεση τοπιού της Πάρνηθας, το δάσος και οι θαμνώδεις εκτάσεις ήταν οι κυρίαρχες κατηγορίες του τοπίου το 1945, ενώ οι μη φυσικές περιοχές, συμπεριλαμβανομένων των τεχνητών και ασυνεχών τμημάτων αστικού ιστού, αντιπροσώπευαν μόνο το 0,17% του τοπίου. Παρατηρήθηκε μια αλλαγή την περίοδο του 1996, με μια επέκταση των τεχνητών επιφανειών, που τότε καταλάμβαναν σχεδόν το 3,90% του τοπίου, με τις δασικές εκτάσεις συνέχισαν να κυριαρχούν, καλύπτοντας τότε το 50,99% της περιοχής. Τέλος, την περίοδο μελέτης, δηλαδή το 2007 το δάσος εξακολουθούσε να είναι η κυρίαρχη τάξη, αν και με μικρότερη παρουσία, με μια αύξηση στις περιοχές με αραιά βλάστηση (Mallinis et al, 2014).

Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα 3.12, απεικονίζονται οι χρήσεις γης σύμφωνα με το Corine 2018, που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης. Όπως παρατηρείται, το μεγαλύτερο τμήμα αποτελείται από δασικές εκτάσεις και αστικό ιστό. Ενώ οι υδάτινες επιφάνειες είναι ελάχιστες στην περιοχή.



Εικόνα 3.8:Χάρτης καλύψεων γης (Corine Land Cover,2018)

(Πηγή: https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover)

3.3.3.Τοπογραφικά δεδομένα (ASTER DEM)

Η τοπογραφία αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι στη δυναμική αναγέννησης της βλάστησης μετά την πυρκαγιά, όπου είναι ένας σημαντικός φυσιογραφικός παράγοντας που επηρεάζει την ανάκτηση της βλάστησης, καθώς και την επιρρεπή σε φωτιά μιας περιοχής. Παράλληλα, η τοπογραφία συντελεί σημαντικά στον έλεγχο για το μικρόκλιμα μιας περιοχής, την τοπική υδρολογική μεταβλητότητα και την υδροφοβία του εδάφους, που επηρεάζει τις συνθήκες βλάστησης και επίσης την επιδεκτικότητα μια περιοχής στην εκδήλωση πυρκαγιάς. Ωστόσο, αποτελεί γεγονός πως οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της τοπογραφίας και της αναγέννησης της βλάστησης, καθώς και η σοβαρότητα της καύσης είναι ελάχιστα γνωστές, ειδικά στην κλίμακα μιας ολόκληρης, μεγάλης πυρκαγιάς (Ireland and Petropoulos, 2015). Παράλληλα, οι περιοχές με νότιο προσανατολισμό παρουσιάζουν υψηλότερους ρυθμούς ηλιοφάνειας και εξατμισοδιαπνοής από τις περιοχές με βόρειο προσανατολισμό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η βλάστηση να τείνει να αναπτύσσεται πιο γρήγορα σε βόρειες πλαγιές με ευνοϊκότερες συνθήκες υγρασίας (Fox et al, 2005). Η κλίση έχει επίσης επίδραση και στα επίπεδα σοβαρότητας της καύσης λόγω της σχέσης της με τη συμπεριφορά του ανέμου και την ακτινοβολία (Ireland, 2013).

Στην εργασία το ανάγλυφο που χρησιμοποιήθηκε προήλθε από το site https://dwtkns.com/srtm30m/, και συνέβαλλε στην δημιουργία του παραγομένου χάρτη κλίσεων και προσανατολισμού. Στην επόμενη ενότητα θα αναλυθεί η διαδικασία δημιουργίας των παραγομένων που αναφέρθηκαν.

Κεφάλαιο 4: Μέθοδοι

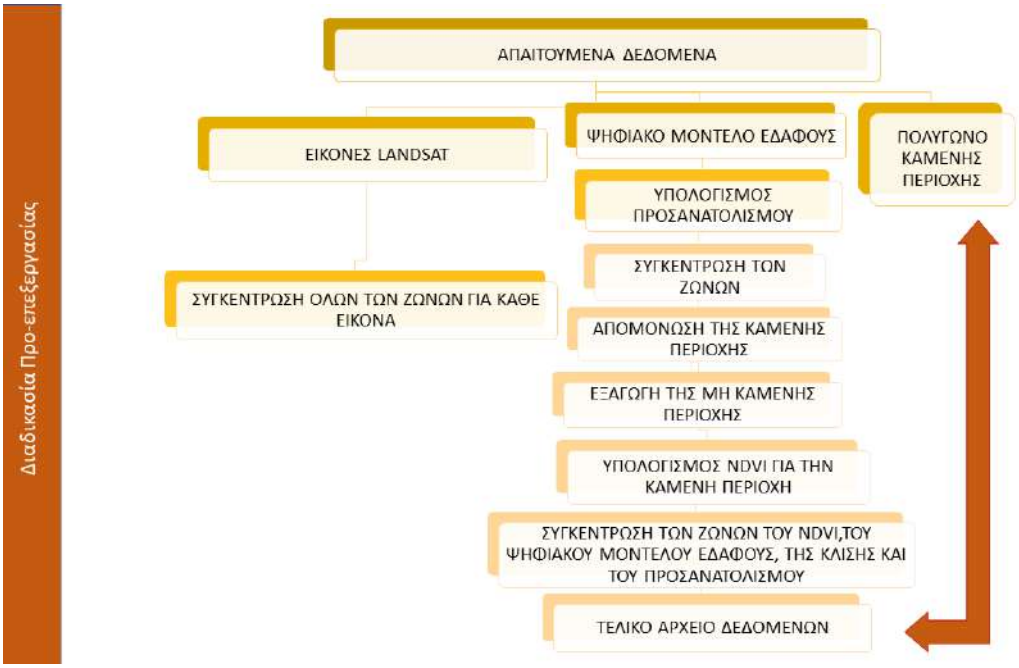
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα δεδομένα Landsat TM παίζουν καταλυτικό ρολό στις μεθόδους τόσο της χαρτογράφησης των καμένων περιοχών όσο και στην αποτύπωση της αναγέννησης του φυσικού τοπιού αυτών.

4.1. Μεθοδολογία χαρτογράφησης καμένων περιοχών

Οι Landsat TM ανήκουν σε μια μεγάλη ποικιλία αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της καμένης περιοχής, κατέχοντας μια σειρά από πλεονεκτήματα που το καθιστούν μοναδικό για την εξαγωγή εκτιμήσεων της καμένης επιφάνειας. Αυτός ο αισθητήρας είναι επί του παρόντος ο μόνος αισθητήρας υψηλής χωρικής ανάλυσης (30 m στα ανακλαστικά κανάλια και 60 m σε ένα θερμικό κανάλι που διαθέτει) που παρέχει, χωρίς κόστος, παγκόσμια δεδομένα εικόνας σε υψηλή φασματική ανάλυση με7 ζώνες από ορατό έως θερμικό υπέρυθρο. Τα δεδομένα Landsat TM έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν σε μεγάλο αριθμό μελετών χαρτογράφησης καμένων περιοχών σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές, μερικές από τις οποίες εφαρμόστηκαν στην περιοχή της Μεσογείου (P Petropoulos et al., 2011). Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αντίστοιχων δεδομένων, αποτελεί η περίπτωση της Πορτογαλίας, οπού το 2016 σημειώθηκαν δασικές πυρκαγιές σε δυο δήμους αυτής. Έτσι λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα Landsat OLI 8 αλλά και Sentinel 2, υπολογίστηκαν οι δυο βασικοί δείκτες NDVI και NBR, οπού χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό των καμένων περιοχών αλλά και την εκτίμηση της σοβαρότητας της πυρκαγιάς (Teodoro and Amaral, 2019).

4.1.1. Βήματα Προ-επεξεργασίας και επεξεργασίας

Τα βασικά βήματα, τα οποία απεικονίζονται στην εικόνα 4.1, για την αποτύπωση των καμένων εκτάσεων είναι η προ επεξεργασία εικόνας με κυριότερα βήματα την ραδιομετρική, ατμοσφαιρική και γεωμετρική (Ireland, 2013). Είναι γεγονός πως με την γεωμετρική διόρθωση αφαιρούνται από τις εικόνες όλες οι σκιάσεις λόγω του ανάγλυφου με αποτέλεσμα ένα αντικείμενο να έχει την ιδιά μορφή ανεξάρτητα από τον προσανατολισμό της (ΚΑΤΑΓΗΣ, 2017). Παράλληλα, ο σκοπός της γεωμετρικής διόρθωσης είναι να αντισταθμίσει τις στρεβλώσεις που εισάγονται από την περιστροφή της γης, την καμπυλότητα καθώς και τη διακύμανση της ταχύτητας, της στάσης, του υψομέτρου και της κλίσης του αισθητήρα του δορυφόρου (Ireland, 2013).



Διάγραμμα 4.1: Βήματα προ – επεξεργασίας

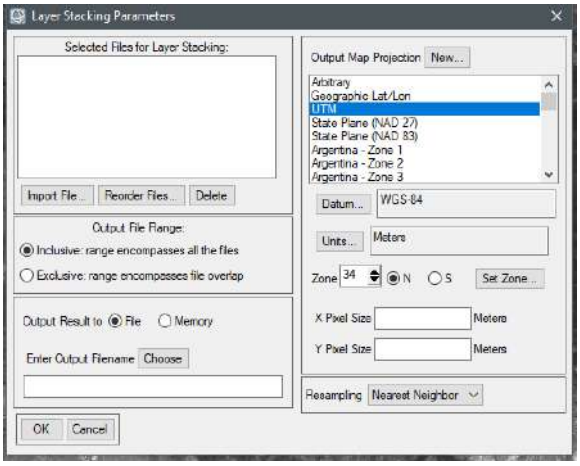
Layer Stacking-Συνδυασμός πολλαπλών ξεχωριστών ζωνών

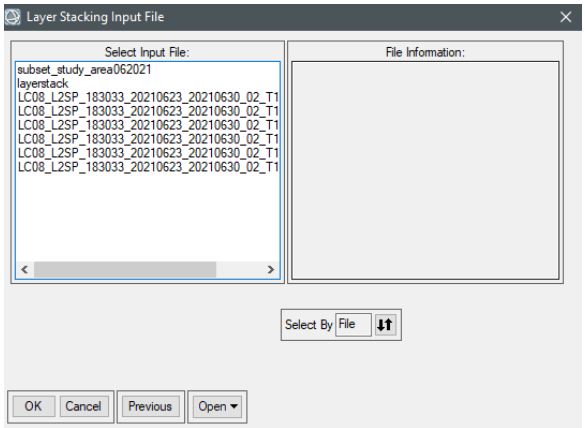
Στην εργασία χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες Level 2 ώστε να είναι ήδη ατμοσφαιρικά διορθωμένες. Στην συνέχεια επιλέχθηκαν όλα τα Κανάλια εκτός από τα θερμικά και πραγματοποιήθηκε η συνένωση των εικόνων το οποίο αποτελεί μια διαδικασία για το συνδυασμό πολλών εικόνων σε μια ενιαία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το θερμικό κανάλι έχει διαφορετική χωρική διακριτική ικανότητα από τα υπόλοιπα έξι.

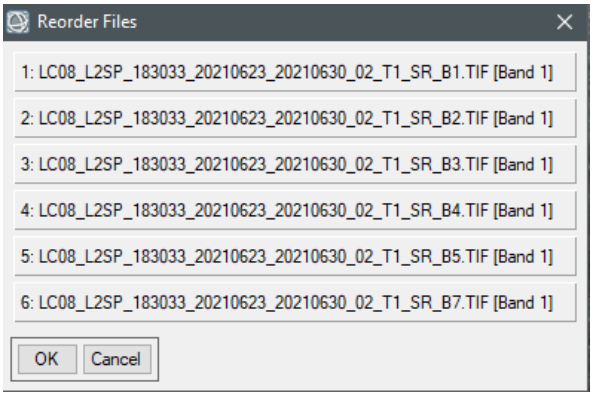
Για να πραγματοποιηθεί το layer stacking, οι εικόνες θα πρέπει να έχουν την ίδια έκταση, δηλαδή αριθμό σειρών και αριθμό στηλών. Έτσι, επιλέχθηκαν τα Κανάλια 1 έως 7 εκτός του 6. Αυτό επαναλήφθηκε για όλες τις εικόνες. Κατά την διεργασία αυτή ακολουθήθηκαν τα εξής βήματα.

Στο Toolbox επιλέγεται το **Layer Stacking** στην συνέχεια όπως φαίνεται και στην εικόνα επιλέχθηκε το Import file, επιλέχθηκαν όλα τα Bands και στην συνέχεια επιλέχθηκε το Reorder

file στο οποίο οι εικόνες ταξινομήθηκαν κατά αύξουσα σειρά.







Surface reflectance-Υπολογισμός επιφανειακής ανάκλασης

Μετά το Layer Stacking πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή του συντελεστή κλίμακας στα προϊόντα ανάκλασης επιφάνειας πριν χρησιμοποιηθούν στην επεξεργασία. Στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν η επιφανειακή ανάκλαση υπολογίστηκε χειροκίνητα μέσω της εφαρμογής της μαθηματικής σχέσης {**B1*0.0000275-0.2**} στο πεδίο του Band Math. Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, ο συντελεστής κλίμακας είναι 0.0000275 και η μετατόπιση είναι 0.2.

Image to image co-registration-Ταυτόχρονη καταχώρηση εικόνων διαφορετικών χρονοσειρών

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η διαδικασία για την καταχώρηση πολλαπλών εικόνων διαφορετικών χρονοσειρών όπου ονομάζεται προσέγγιση εικόνας προς εικόνα, δηλαδή image to image co-registration. Αυτή η διαδικασία αποτελεί προϋπόθεση για οποιαδήποτε ποσοτική ανάλυση εικόνας, έτσι ώστε διαφορετικές εικόνες με διαφορετικά δεδομένα μπορούν να συγχωνευτούν και να αναλυθούν πανομοιότυπα

Subset-Σύνολο δεδομένων

Επόμενο βήμα ήταν η απομόνωση ενός μικρότερου τμήματος της περιοχής μελέτης με την βοήθεια του Subset, όπου έγινε πρωταρχικά στην εικόνα αμέσως μετά την πυρκαγιά ώστε να είναι ευδιάκριτη η καμένη περιοχέ και στην συνέχεια επαναλήφθηκε για τις υπόλοιπες εικόνες.

Απομόνωση της περιοχής μελέτης

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η διαδικασία για την δημιουργία ενός vector αρχείου που απεικονίζει τα όρια της καμένης περιοχής μελέτης. Επιλέχθηκε η περιοχή μελέτης και δημιουργήθηκε ένα πολύγωνο ώστε να προκύψει το επιθυμητό περίγραμμα.

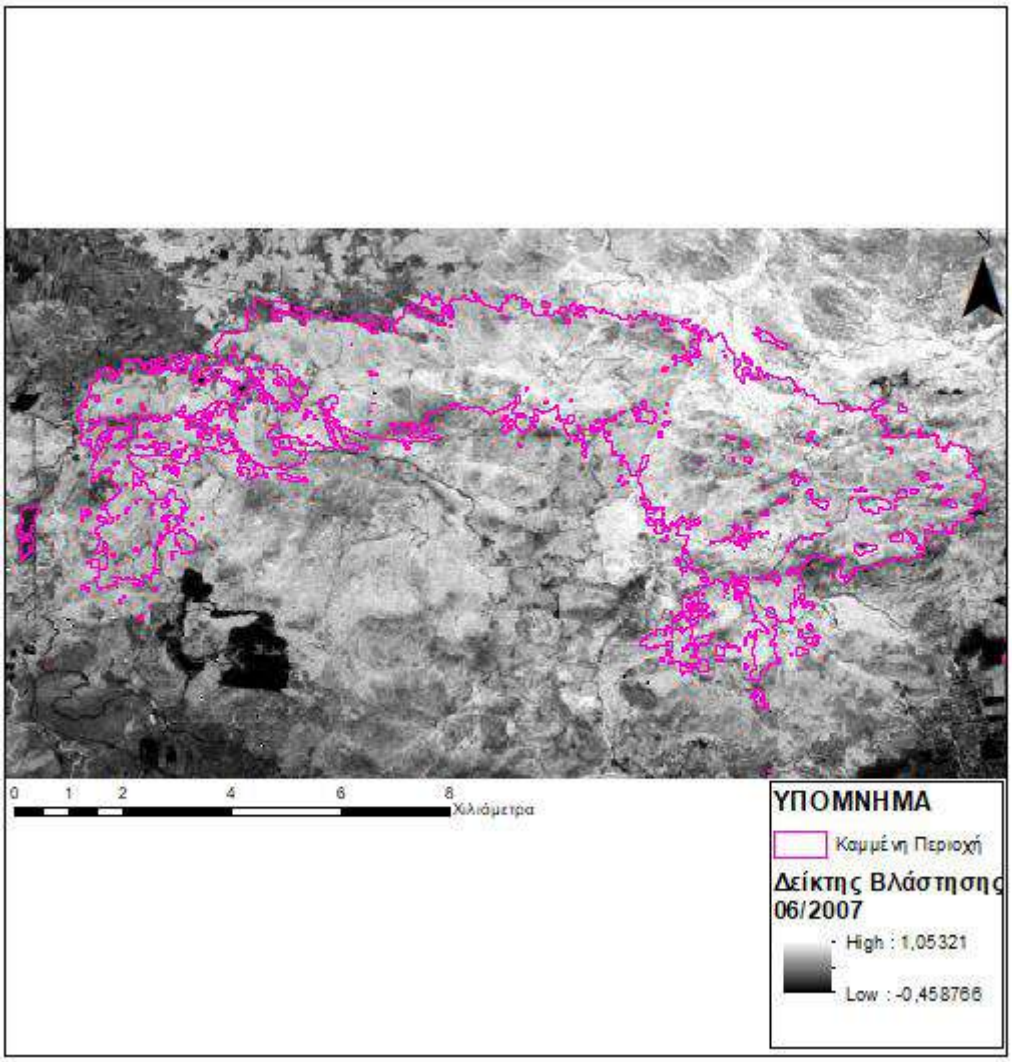
Δείκτης υπολογισμού βλάστησης- NDVI

Αφού δημιουργήθηκε το αρχείο, υπολογίστηκε ο δείκτης NDVI για όλες τις εικόνες. Όπως είναι ευρέως γνωστό ο δείκτης NDVI, είναι ο δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης και χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της βλάστησης στην επιφάνεια της γης. Το NDVI μπορεί να διαφοροποιήσει τα πράσινα φύλλα με υψηλή ανακλαστικότητα των πράσινων μηκών κύματος από τα μαραμένα ή νεκρά φύλλα φυτών. Ο τύπος NDVI φαίνεται στην εξίσωση (Kim et al., 2021):

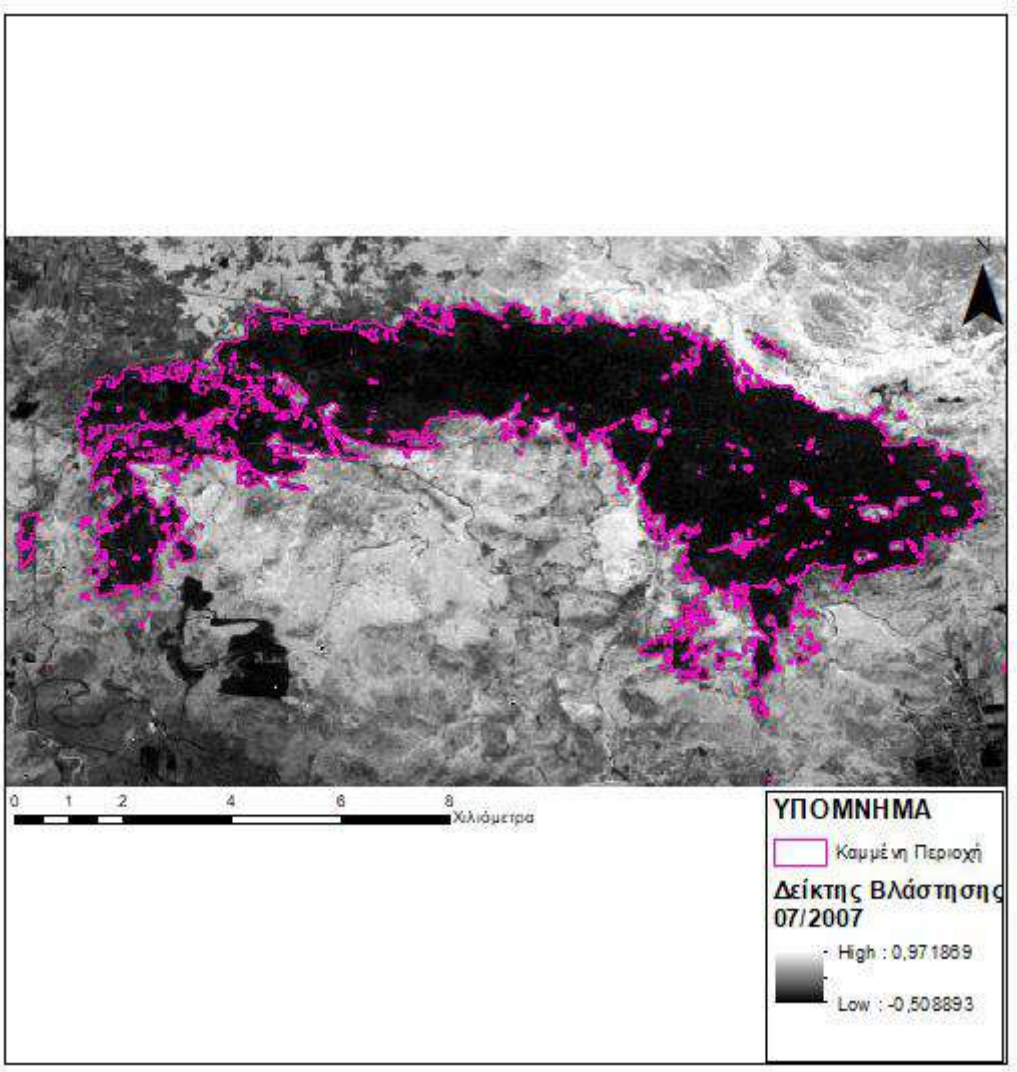
Εξίσωση 4.1***: NDV I = (NIR – Red)/(NIR + Red),***

Όπου το NDVI παίρνει μια τιμή μεταξύ − 1 και 1, και χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της φωτοσυνθετικής ικανότητας των φυτών. Συνήθως, μια τιμή μεταξύ 1 και 0 δείχνει ότι η αναγέννηση των φυτών δεν είναι δυνατή ή ότι δεν υπάρχει βλάστηση.

Στο Envi επιλέχθηκε από το Transform>NDVI και επιλέχθηκε το Subset που είχε δημιουργηθεί για κάθε εικόνα. Τα αποτελέσματα φαίνονται παρακάτω.



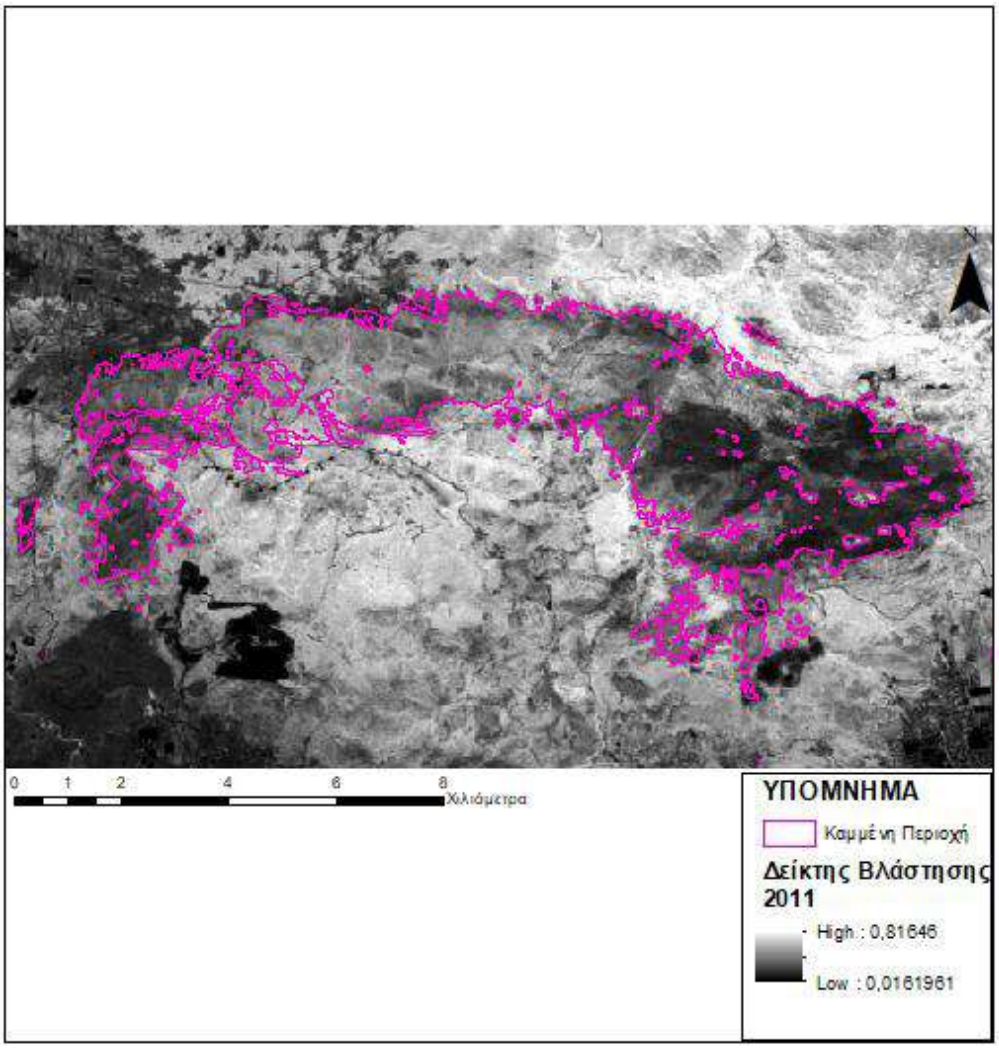
Εικόνα 4.1: NDVI 06/2007



Εικόνα 4.2 NDVI 07/2007

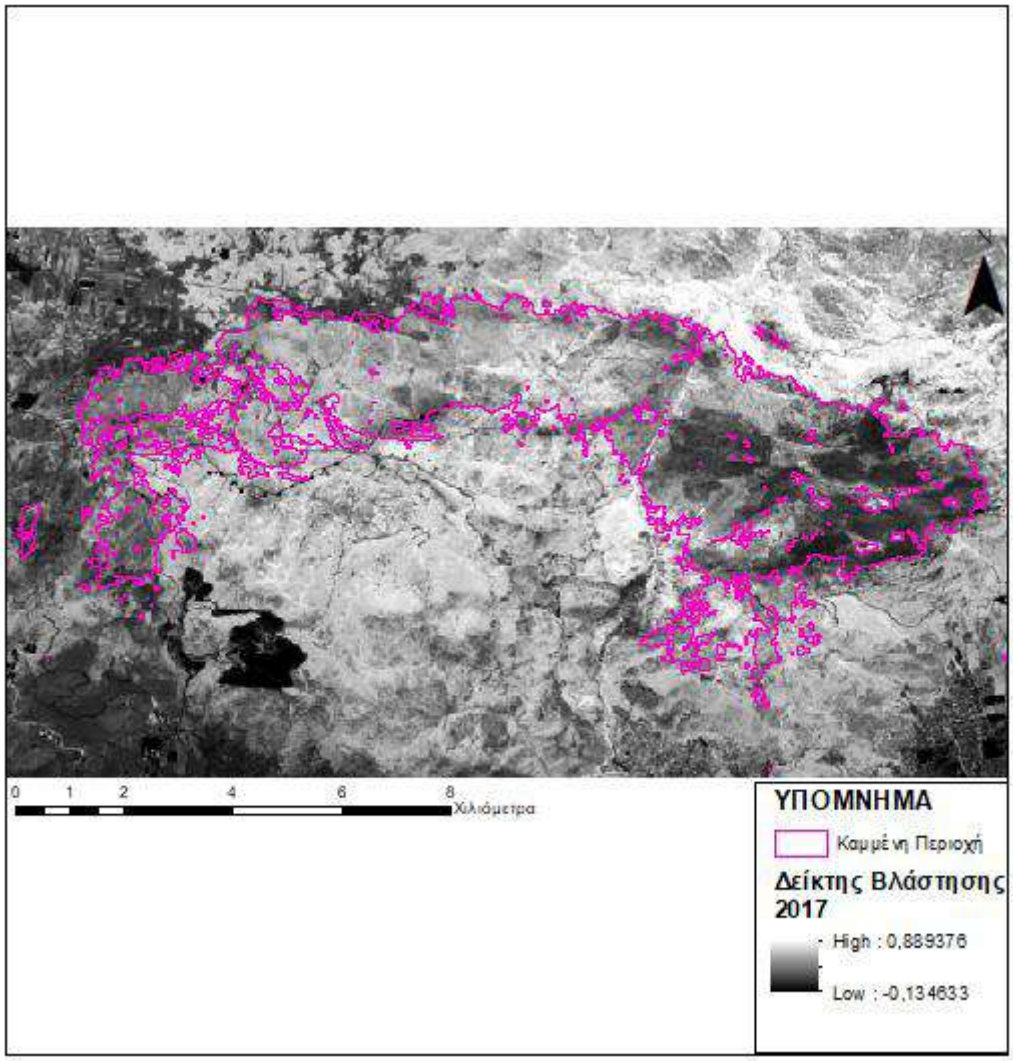
Οι δυο ημερομηνίες στις εικόνες 4.1 και 4.2 απεικονίζουν την περιοχή πριν και μετά την πυρκαγιά. Στην εικόνα μετά την πυρκαγιά, στις 03 Ιουλίου, φαίνεται με μαύρο χρώμα η κατεστραμμένη έκταση στην Πάρνηθα και με μωβ, το περίγραμμα της καμένης περιοχής.

Στην επόμενη απεικονίζεται (εικόνα 4.3) η περιοχή το 2011 όταν έχει αρχίσει να πραγματοποιείται η αναγέννηση της περιοχής σταδιακά.



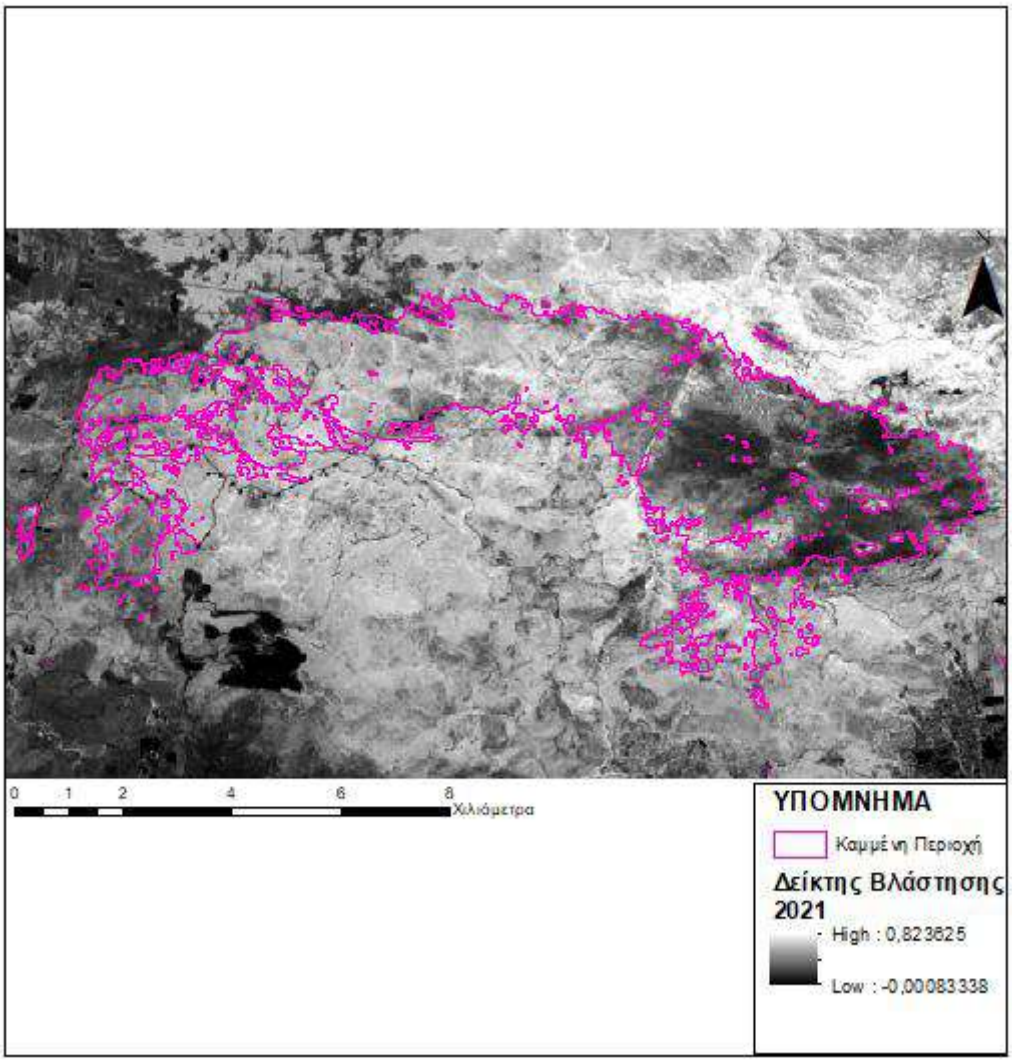
Εικόνα 4.3: NDVI 2011

Στη συνέχεια, 6 χρόνια αργότερα όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4 το φυσικό τοπίο έχει αρχίσει να αποκαθίσταται σε μεγάλο βαθμό, εκτός από την ανατολική πλευρά, η οποία παραμένει αρκετά καμένη.



Εικόνα 4.4: NDVI 2017

Τελευταία εικόνα είναι αυτή του 2021 (εικόνα 4.5), στην οποία όπως είναι φανερό όλη η δυτική πλευρά έχει επανέλθει πλήρως ενώ η ανατολική παραμένει αρκετά καμένη. Σε αυτό οφείλεται το γεγονός ότι στην συγκεκριμένη πλευρά η Πάρνηθα αποτελείται από πυκνό δάσος το οποίο καταστράφηκε ολοσχερώς.



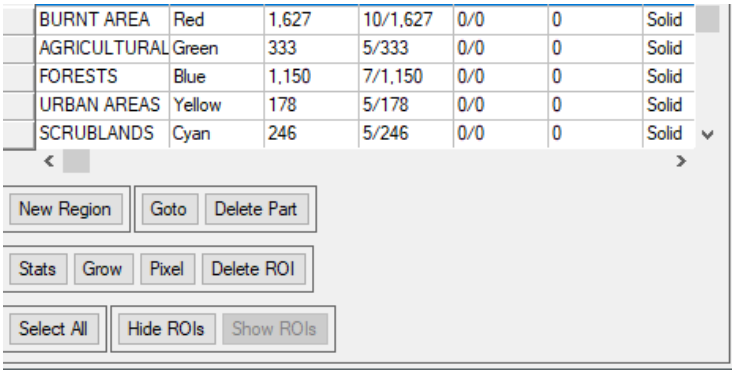
Εικόνα 4.5: NDVI 2021

Όπως γινεται κατανοητό και στις υπόλοιπες εικόνες του NDVI, η βλάστηση στην επιφάνεια της γης δείχνει έναν βαθμό αποκατάστασης με το πέρασμα των χρόνων. Μετά την δημιουργία των ndvi για όλες τις εικόνες, πραγματοποιήθηκε ένα άκομα layer stacking στο οποίο τοποθετήθηκαν οι δείκτες βλάστησης για όλες τις ημερομηνίες κατά αύξουσα σειρά με αποτέλεσμα την δημιουργία ενός συνολικού NDVI.

Classification-Ταξίνομηση

Επόμενος στόχος ήταν η εξαγωγή της καμένης περιοχής. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση της εικόνας μετά την πυρκαγιά βάσει 5 κλάσεων, οι οποίες ήταν η καμένη περιοχή **(BURNT AREA)**, αγροτικές εκτάσεις **(AGRICULTURAL AREAS)**, δάση **(FORESTS)**, θαμνώδεις εκτάσεις **(SCRUBLANDS)** και αστικός ιστός **(URBAN AREAS)**. Έτσι, μετά την ταξινόμηση προέκυψε η απομονωμένη εικόνα της καμένης περιοχής. Στην εργασία πραγματοποιήθηκε επιβλεπομένη ταξινόμηση της εικόνας με σκοπό να πραγματοποιηθεί το περίγραμμα της καμένης περιοχής ώστε να είναι εύκολη η απομόνωση αυτής. Οι περιοχές δημιουργήθηκαν χειροκίνητα ώστε να μπορούν να εξαχθούν ως περιοχές ενδιαφέροντος (**ROIs**) οι οποίες στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν την εφαρμογή της επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Για τη δημιουργία αυτών των δειγμάτων/σημείων, επιλέξτε από τη γραμμή εργαλείων του ENVI, **Basic Tools >Region of Interest >ROI Tool.**

Τα ROI που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα εξής και φαίνονται στην εικόνα 4.6:



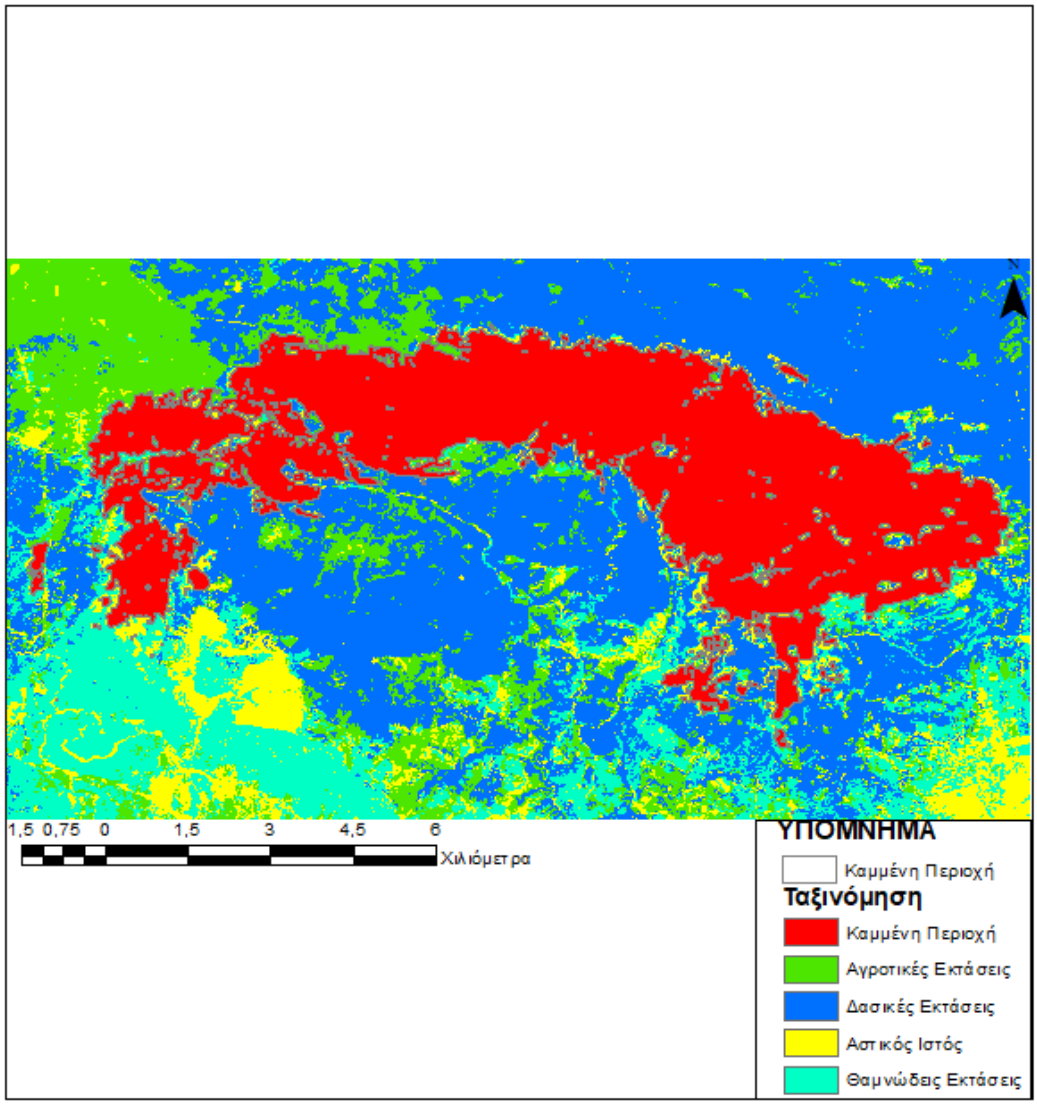
BURNT AREA	Red	1,627	10/1,627	0/0	0	Solid
AGRICULTURAL	Green	333	5/333	0/0	0	Solid
FORESTS	Blue	1,150	7/1,150	0/0	0	Solid
URBAN AREAS	Yellow	178	5/178	0/0	0	Solid
SCRUBLANDS	Cyan	246	5/246	0/0	0	Solid

Εικόνα 4.6: ROI που χρησιμοποιήθηκαν

Ενώ η εικονα από την ταξινομηση είναι η εξης, οπου στο μενου επιλεχθηκε το **Classifiation>Supervised>Maximum Likelihood**. Η μέθοδος αυτή είναι μία ακόμη μέθοδος κατευθυνόμενης ταξινόμησης και βασίζεται σε προηγμένες στατιστικές μεθόδους. Χρησιμοποιεί επίσης πεδία εφαρμογής που αντιστοιχούν στις κατηγορίες διαφορετικής χρήσης γης. Κάθε κατηγορία χρήσης γης έχει το δικό της φασματικό αποτύπωμα, με αποτέλεσμα για κάθε τύπο εδαφικής κάλυψης που πρόκειται να ταξινομηθεί πρέπει να οριστεί τουλάχιστον ένα πεδίο εφαρμογής. Η τεχνική αυτή επιλέχθηκε καθώς αποτελεί μια από τις πιο ακριβείς τεχνικές ταξινόμησης, καθώς άθε εικονοστοιχείο αποδίδεται όσο το δυνατόν περισσότερο στην αντίστοιχη κατηγορία. (http://archive.eclass.uth.gr/eclass/modules/document/file.php/MHXC241/%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%95%CE%A3%

20%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%97%202_LEOWORKS.pdf).

Η ταξινομημένη εικόνα απεικονίζεται στην εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Ταξινομημένη εικόνα

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η αξιολόγηση του σφάλματος ταξινόμησης, με τον υπολογισμό του πίνακα σφαλμάτων, μέσω του **Classification > Confusion Matrix > Using Ground Truth ROIs.** Στην συνέχεια, επιλέχθηκε η ταξινομημένη εικόνα και πραγματοποιήθηκε η αντιστοίχιση των τάξεων των Ground Truth ROis με τις ταξινομημένες τάξεις της εικόνας. Όταν

πραγματοποιήθηκαν οι συνδυασμοί προέκυψε ο πίνακας των σφαλμάτων. Όταν τα **ROIs** έχουν τα ίδια ονόματα με τις τάξεις της ταξινόμησης, το **ENVI** συνέδεσε αυτόματα τις ταξινομημένες και τις εξεταζόμενες τάξεις. Αφού έγινε η επιλογή των παραμέτρων των pixel δημιουργήθηκε ο πίνακας σφαλμάτων (error matrix).

Στην συνέχεια προέκυψε το **Overall Accuracy** = (3472/3534) 98.2456% και **Kappa Coefficient** = 0.9738. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η ταξινόμηση είχε αρκετά ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Masking

Με την βοήθεια της ταξινόμησης πραγματοποιήθηκε και η απομόνωση της περιοχής μελέτης. Για αυτό δημιουργήθηκε μια μάσκα με σκοπό την απομόνωση των τιμών που υπάγονται μόνο στη περιοχή μελέτης, και ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: **Masking-> Build mask->Import Data range**, με **min=1** και **max=4**. Με τον τρόπο αυτό όλες οι τιμές εντός της περιοχής μελέτης έχουν τιμή 1 και οι τιμές εκτός 0.

4.1.2.Μεθοδολογία αποτύπωσης αναβλάστησης

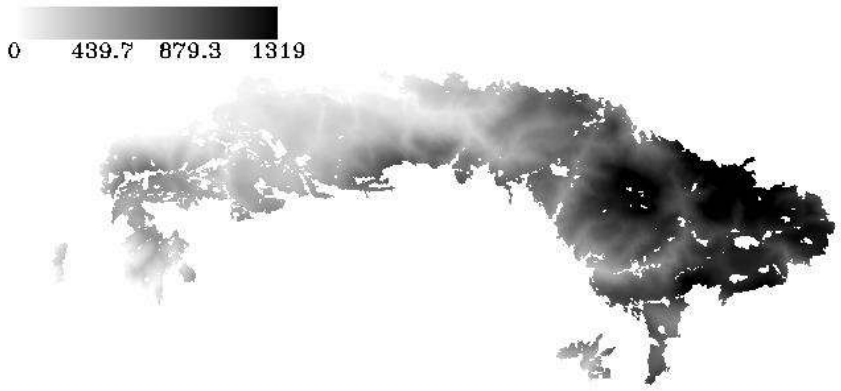
Είναι γεγονός πως στον απόηχο μιας δασικής πυρκαγιάς, η αποκατάσταση των δασών πραγματοποιείται με διάφορες μεθόδους. Οι δορυφορικές εικόνες χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση καταστροφών παγκοσμίως καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση μεγάλων περιοχών μετρά από δασικές πυρκαγιές. Πιο συγκεκριμένα, ο δείκτης NDVI στον οποίο βασίζεται ένα μεγάλο τμήμα της εργασίας μπορεί να διαφοροποιήσει τα πράσινα φύλλα με υψηλή ανακλαστικότητα των πράσινων μηκών κύματος από τα μαραμένα ή νεκρά φύλλα. Οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται μεταξύ − 1 και 1. Συνήθως, μια τιμή μεταξύ− 1 και 0 αντικατοπτρίζει ότι η αναγέννηση των φυτών δεν είναι δυνατή ή ότι δεν υπάρχει βλάστηση, καθώς η βλάστηση προσδιορίζεται ως ζωντανή και παρούσα μόνο εάν η τιμή NDVI είναι μεγαλύτερη από το 0 (Kim et al., 2021).

Στο στάδιο αυτό στόχος αποτελεί η ανάλυση της διαδικασίας αποτύπωσης της αναβλάστησης, αλλά και ο συσχετισμός με τον παράγοντα των καλύψεων γης. Η παρακολούθηση της ανάκτησης της βλάστησης μετρά από μια πυρκαγιά είναι ζωτικής σημασίας καθώς παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την ανάλυση της ανθεκτικότητας του οικοσύστημα της περιοχής μελέτης, με σκοπό τον προσδιορισμό της δυναμικής του τοπιού αλλά και για την διαχείριση των δασών (Pérez-Cabello et al, 2021).

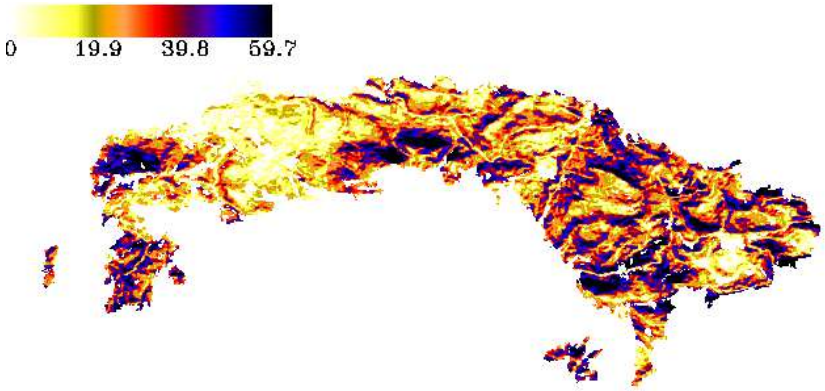
Για τον υπολογισμό του δείκτη αναβλάστησης ακολουθήθηκαν τα εξής: **Transform->NDVI-> Select input file**. Η διαδικασία ακολουθήθηκε για όλες τις ημερομηνίες των εικόνων και στη συνέχεια όλα τα NDVI αρχεία συνδυάστηκαν κατά αύξουσα ημερομηνία και αποτέλεσαν ένα αρχείο.

4.1.3. Μεθοδολογία συσχετισμού με την τοπογραφία

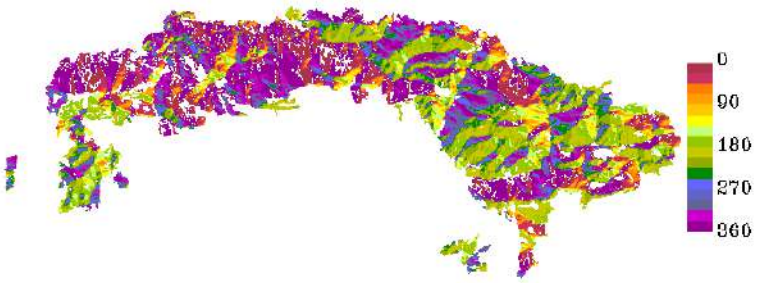
Εφόσον στόχος της εργασίας αποτελεί και ο συσχετισμός με την τοπογραφία, για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε το αρχείο των κλίσεων και του προσανατολισμού με βάση το ανάγλυφο, και στο Envi πραγματοποιήθηκε βάσει της διαδρομής **Topographic>Topographic Modeling>SRTM Elevation>Slope/Aspect**. Στην συνέχεια με την συμβολή του Layer stacking πραγματοποιήθηκε η συνένωση και των τριών επίπεδων. Αφού πραγματοποιήθηκε η συνένωση του αρχείου που προέκυψε με την καμένη περιοχή, στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η συνένωση του αρχείου αυτού με το που περιλάμβανε όλα τα αρχεία NDVI. Επόμενο βήμα ήταν το Masking με βάση το αρχείο της τοπογραφίας που δημιουργήθηκε ώστε να απομονωθεί η περιοχή και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε για δεύτερη φορά ώστε να αφαιρεθεί η περιοχή εκτός της καμένης. Εν συνεχεία, επαναλήφθηκε για ακόμη μια φορά το Layer Stacking για το αρχείο του Masking και του NDVI. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η αλλαγή του Projection ώστε όλα τα αρχεία να ανήκουν στο ίδιο σύστημα συντεταγμένων, το WGS 84. Όπως παρατίθεται στις παρακάτω εικόνες 4.8 έως 4.10, η περιοχή της Πάρνηθας χαρακτηρίζεται από πλούσιο ανάγλυφο με τις μεγαλύτερες κλίσεις να εντοπίζονται στις νότιες και ανατολικές πλάγιες αυτής. Παρατηρώντας την εικόνα , η καμένη περιοχή αποτελείται κατά κύριο λόγο από νότιες και βόρειες πλαγιές.



Εικόνα 4.8: Χάρτης υψομέτρου



Εικόνα 4.9: Χάρτης κλίσεων σε μοίρες



Εικόνα 4.10: Χάρτης προσανατολισμού σε μοίρες

Στον παρακάτω πίνακα απεικονίζονται οι τιμές των στοιχείων της τοπογραφίας όπως σχολιάστηκαν και στην αρχή της ενότητας. Στον παρακάτω πίνακα 4.1 παρουσιάζονται κάποια ποσοτικά στοιχεία για την τοπογραφία της περιοχής.

Πίνακας 4.1: Ποσοτικά στοιχεία υψομέτρου, κλίσεων και προσανατολισμού

Προϊόντα	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση τιμή	Τυπική Απόκλιση
Υψόμετρο	0,00	1319,00	345,01	422,30
Κλίση	0,00	59,67	7,72	11,19
Προσανατολισμός	0,00	360,00	83,27	123,86

4.1.4. Μεθοδολογία συσχετισμού με το NBR

Εκτός από την τοπογραφία, διερευνήθηκε και η συσχέτιση του δείκτη NBR με την διαδικασία της δασικής αναγέννησης. Όπως είναι γνωστό, οι μέθοδοι που βασίζονται στην τηλεπισκόπηση έχουν δείξει τη δυνατότητά τους να αξιολογούν με ακρίβεια τη σοβαρότητα της πυρκαγιάς σε μεγάλες περιοχές (Quintano et al., 2014).

Στο πλαίσιο της τηλεπισκόπησης που εφαρμόζεται στις δασικές πυρκαγιές, παρατηρείται ότι οι αλγόριθμοι φασματικών δεικτών πρέπει να περιέχουν, κυρίως, τις κόκκινες, NIR και SWIR ζώνες με υψηλότερη διαφορά ανάκλασης μεταξύ καμένης και μη καμένης περιοχής. Για το λόγο αυτό, οι φασματικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται είναι NBR και NDVI (Sobrino et al., 2019). Ο δείκτης NBR αποτελεί τον πιο ευαίσθητο δείκτη στην ανίχνευση πυρκαγιών χρησιμοποιώντας τις προσαρμοσμένες φασματικές τροχιές για την εξαγωγή ενός συνόλου μετρήσεων, δηλαδή συνθηκών πριν και μετά το συμβάν αλλαγής χρησιμοποιώντας πληροφορίες που προέρχονται από φασματικές τιμές (Bonannella et al., 2022).

Η σφοδρότητα της πυρκαγιάς μπορεί να οριστεί ως οι άμεσες επιπτώσεις της διαδικασίας καύσης στη βλάστηση, όπως η θνησιμότητα των δέντρων και οι απώλειες βιομάζας με τη μορφή της βλάστησης και του οργανικού υλικού του εδάφους. Επίσης, μπορεί να οριστεί ως ο βαθμός οικολογικής αλλαγής σε ένα τοπίο που προκαλείται από αυτή. Οι άμεσες επιπτώσεις της πυρκαγιάς στη βλάστηση περιλαμβάνουν αλλαγές στη σύνθεση, την πυκνότητα και την μορφή των φυτικών ειδών καθώς και τη συνολική περιεκτικότητα σε υγρασία της βλάστησης, και του εδάφους της καμένης περιοχής (O. Soverel et al, 2010).

Έτσι έχει προκύψει και χρησιμοποιείται ένας δείκτης, ο **Normalized Burn Ratio (NBR)** για την ανίχνευση της σοβαρότητας της πυρκαγιάς, ο οποίος αποτελεί τυπικός φασματικός δείκτης για την αξιολόγηση της σοβαρότητας αυτής, έχοντας εύρος τιμών μεταξύ -1 και 1 (Quintano et al., 2014).

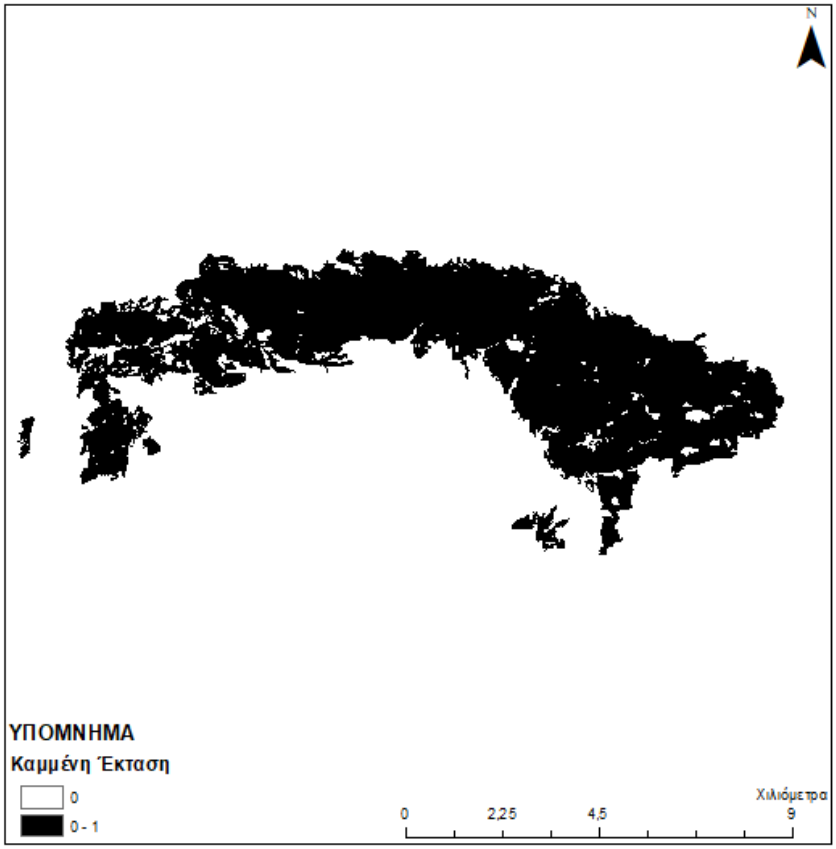
Η εξίσωση για το NBR είναι :

Εξίσωση 4.2: **Basic Tools->Band Math-> (Band 4 – Band 7) / (Band 4 + Band 7).**

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

5.1.Αξιολόγηση της χαρτογραφημένης καμένης περιοχής

Μετά από τις απαραίτητες διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν, το πρώτο αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν αυτό της καμένης περιοχής που παρουσιάζει την καταστροφή που πραγματοποιήθηκε με την πυρκαγιά. Αναμφίβολα η καταστροφή ήταν τεράστια, καθώς η καμένη περιοχή ήταν τεράστια και είναι γεγονός πως το δασογενές περιβάλλον δέχτηκε μεγάλο πλήγμα, καθώς αποτελούσε σημαντικό πνεύμονα πρασίνου.



Εικόνα 5.1:Χαρτογράφηση καμένης περιοχής

Όπως γίνεται αντιληπτό το εύρος της καταστροφής ήταν τεράστιο, και όπως θα φανεί και παρακάτω η διαδικασία της αναβλάστησης σε ένα μεγάλο τμήμα της περιοχής δεν έχει αποκατασταθεί ακόμα. Το μέγεθος της καταστροφής επιβεβαιώνεται και από την επιφάνεια του δάσους που απέμεινε μετά την πυρκαγιά. Ενώ πριν την πυρκαγιά η δασική έκταση έφτανε τα 42,3603 τετραγωνικά χιλιόμετρα, μετά την πυρκαγιά η έκταση που απέμεινε ήταν μόλις 0,0054 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Το δάσος κάηκε ολοσχερώς και πιο συγκεκριμένα κάηκαν 42,3549

τετραγωνικά χιλιόμετρα δασικής έκτασης. Η υπέργεια βλάστηση αφανίστηκε σχεδόν σε όλο το σύνολο της καμένης περιοχής, ενώ έπαιξε καθοριστικό ρόλο και ο σαρωτικός της χαρακτήρας.

5.2.Αξιολόγηση της αναβλάστησης του δασικού τοπίου

Ο υπολογισμός του NDVI έπαιξε καταλυτικό ρολό στην απόδοση του ρυθμού της αναβλάστησης, καθώς ο ρυθμός της αναγέννησης και η χωρική έκταση της αναγεννημένης περιοχής είναι ιδιαιτέρως σημαντικά για την αξιολόγηση της διαδικασίας της αναγέννησης. Η γνώση της δυναμικής της βλάστησης μετά την πυρκαγιά είναι ένα σημαντικό στοιχείο για την επιτυχή διαχείριση του τοπίου της Πάρνηθας. Έτσι απεικονίστηκε ο δείκτης αυτός και για τις πέντε διαφορετικές ημερομηνίες για την καμένη και μόνο περιοχή.

Καθώς η δυναμική της βλάστησης της εκ νέου ανάπτυξης μετά την πυρκαγιά αξιολογήθηκε μέσω μιας πολυχρονικής ανάλυσης του NDVI, στις επόμενες εικόνες αναπαρίσταται η εξέλιξη της αναβλάστησης στον χρονικό άξονα των 14 χρόνων. Στην ημερομηνία πριν την πυρκαγιά, είναι ευδιάκριτο ότι η δυναμική της βλάστησης είναι αρκετά έντονη και όπως φαίνεται και στα στατιστικά στοιχεία, οι τιμές είναι αρκετά υψηλές, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.1. Κατά την ανάλυση των τιμών NDVI των ετών μετά την πυρκαγιά, παρατηρείται μια προφανής και σταδιακή αύξηση εντός της περιοχής που έχει πληγεί από την πυρκαγιά. Οι τιμές υποδηλώνουν ότι η πιο εμφανής αύξηση του NDVI συνέβη τέσσερα χρόνια μετά το γεγονός, όπου υπάρχει αύξηση κατά 0,31 μεταξύ Ιουλίου 2007 και 15 Αυγούστου 2011. Τα επόμενα χρόνια δείχνουν μόνο μικρή αύξηση της τάξεως του 0,15 μεταξύ 15 Αυγούστου 2011 και 30 Ιουλίου 2017 και μία ελάχιστη μείωση της τάξεως του 0,04 μεταξύ 30 Ιουλίου 2017 και 10 Αυγούστου 2021, η οποία ενδέχεται να οφείλεται σε ποικίλους παράγοντες.

Πίνακας 5.1: Στατιστικά NDVI

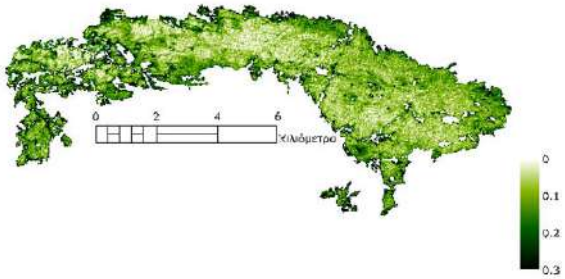
Βασικά Στατιστικά	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση τιμή	Τυπική Απόκλιση
16 Ιουνίου 2007	0,03	1,05	0,57	0,10
03 Ιουλίου 2007	0,03	0,31	0,13	0,04
15 Αυγούστου 2011	0,11	0,69	0,35	0,11
30 Ιουλίου 2017	0,08	0,84	0,47	0,14
10 Αυγούστου 2021	0,12	0,78	0,45	0,14

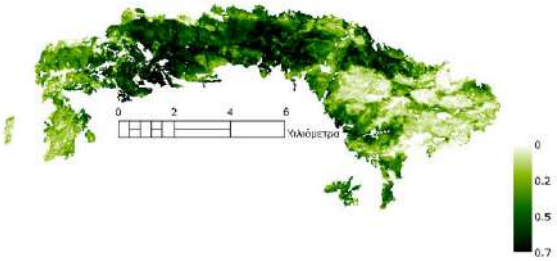
Η πορεία της αναβλάστησης φαίνεται και από τις εικόνες, στον χρονικό άξονα των 14 χρόνων. Στην ημερομηνία πριν την πυρκαγιά, είναι ευδιάκριτο ότι η δυναμική της βλάστησης είναι αρκετά έντονη και όπως φαίνεται και στα στατιστικά στοιχεία, οι τιμές είναι αρκετά

υψηλές, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.2. Το αντίθετο συνέβη στην εικόνα 5.3, 5 ημέρες μετά την πυρκαγιά, οπού οι τιμές είναι αρκετά χαμηλές και αντικατοπτρίζουν το γυμνό εδάφους που έμεινε στην περιοχή. Ενώ κανονικά οι τιμές του κυμαίνονται από 0 έως 1, εξαιτίας της πυρκαγιάς η μέγιστη τιμή του είναι πολύ χαμηλή και συγκεκριμένα 0.3. Κατά την οπτική ερμηνεία των χαρτών αλλαγής του NDVI πριν και αμέσως μετά την πυρκαγιά, γίνεται κατανοητό ότι οι έντονες πράσινες περιοχές έχουν αντικατασταθεί από γυμνό έδαφος. Μετά τις δυο ημερομηνίες μεταξύ της πυρκαγιάς, η ανάλυση έγινε με βάση την χρονική ακολουθία των 5 χρόνων. Πρώτη ημερομηνία που επιλέχθηκε ήταν στις 15 Αυγούστου του 2011, οπού και πάλι ο δείκτης έχει χαμηλές τιμές καθώς η αποκατάσταση είναι σχετικά μικρή, και αυτό φαίνεται και στην εικόνα 5.4. Όπως φαίνεται και στον χάρτη η δυτική πλευρά έχει αρχίσει να αποκαθίσταται σε αρκετά μεγάλο βαθμό, ενώ η ανατολική πλευρά της Πάρνηθας είναι αρκετά κατεστραμμένη. Στην συνέχεια, όπως είναι ευδιάκριτο στην εικόνα 5.5 που παρουσιάζει τον δείκτη αναβλάστησης του 2017, η αναβλάστηση έχει σχεδόν αποκατασταθεί στον μεγαλύτερο βαθμό, ενώ στην ανατολική πλευρά υπάρχει αρκετά μεγάλη έκταση από γυμνό έδαφος. Τελευταία ημερομηνία που αναλύθηκε στην εικόνα 5.6 είναι του 2021, οπού η δυτική πλευρά έχει αποκατασταθεί ενώ η ανατολική πλευρά έχει αρκετά μικρό βαθμό αναβλάστησης.

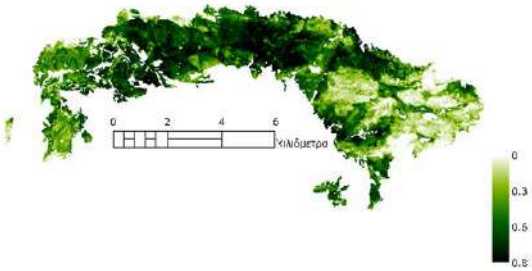
Εικόνα 5.2:NDVI 06-2007

Εικόνα 5.3:NDVI 07-2007

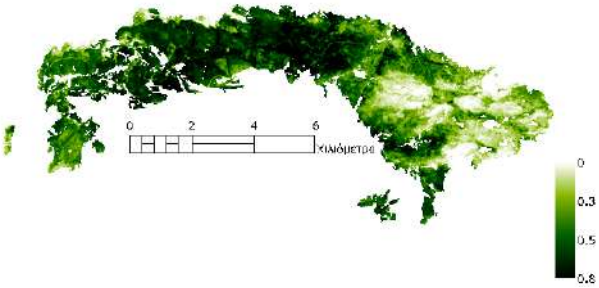




Εικόνα 5.4:NDVI 2011



Εικόνα 5.5:NDVI 2017



Εικόνα 5.6 :NDVI 2021

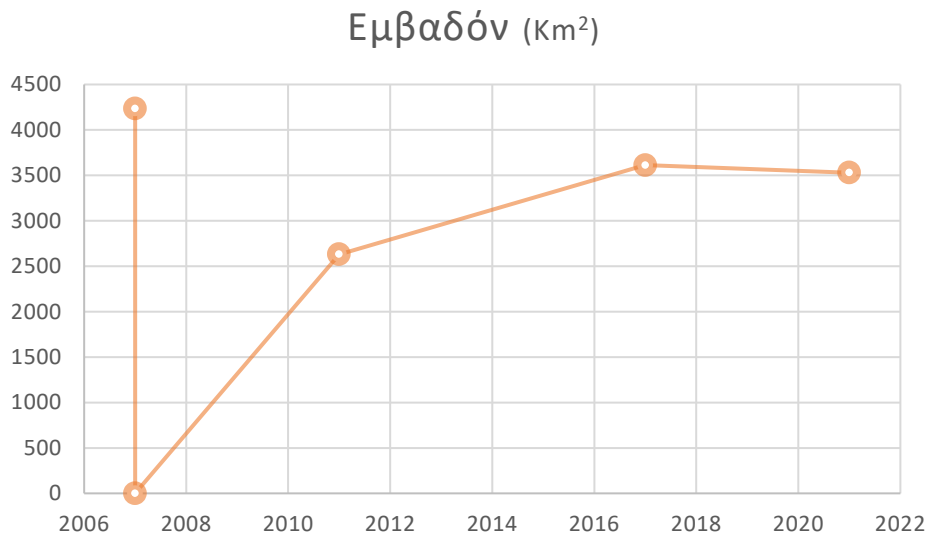
Ιδιαίτερη σημασία είχε και η διερεύνηση του ρυθμού της αναβλάστησης μετά την πυρκαγιά. Για τον σκοπό αυτό έγινε εισαγωγή όλων των NDVI για κάθε ημερομηνία με τον **Raster Calculator** στο λογισμικό Arcmap, εφαρμόστηκε η εξίσωση

Εξίσωση 5.1 : **Band>0.3**

καθώς η κατηγορία αυτή **0.3 – 1** είναι αυτή που αντιστοιχεί στην δασοκάλυψη για όλες τις χρονιές.

Πίνακας 5.2: Εμβαδόν δασοκάλυψης/ημερομηνία

ΕΤΟΣ	Εμβαδόν (Km^2)
06/2007	42,3603
07/2007	0,0054
2011	26,3187
2017	36,1215
2021	35,3025



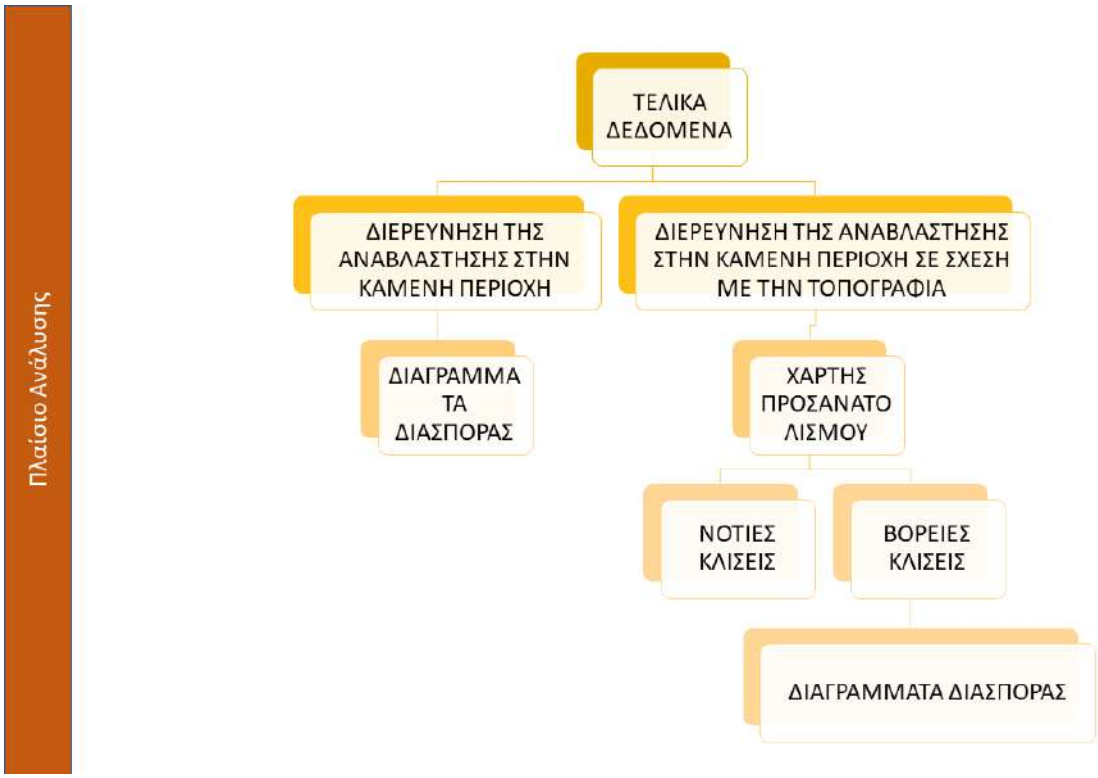
Γράφημα 5.1: Μεταβολή της δασοκάλυψης 2007-2021

Όπως είναι εμφανές και από τον πίνακα 5.2 και από το γράφημα 5.1, την πρώτη ημερομηνία μετά την πυρκαγιά η δασοκάλυψη ήταν απειροελάχιστη, επιβεβαιώνοντας το μέγεθος της καταστροφής. Στην συνέχεια η κάλυψη ανήλθε στο μισό της αρχικής κάλυψης ενώ τα επόμενα χρονιά αυξήθηκε παραπάνω χωρίς όμως να φτάνει στην αρχική έκταση βλάστησης που υπήρχε στην περιοχή.

5.2.1. Στατιστική ανάλυση

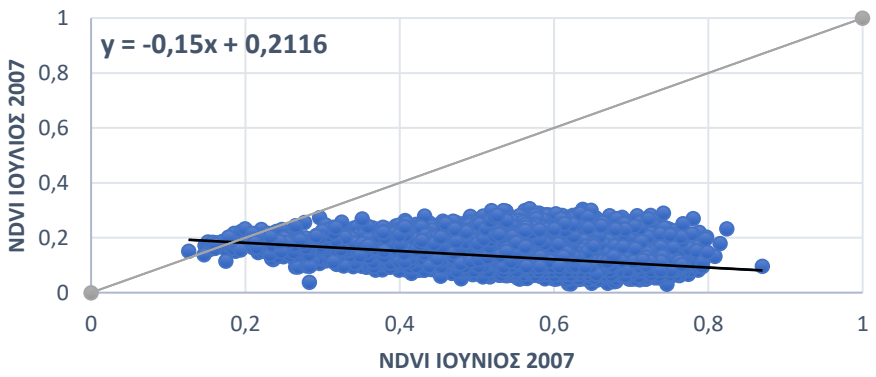
Πέρα από την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων της εξέλιξης της αναγέννησης του φυσικού τοπιού, αναπόσπαστο κομμάτι αποτελεί και η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων με την συνέργεια των μοντέλων παλινδρόμησης. Στο παρακάτω διάγραμμα, απεικονίζεται η διαδικασία της ανάλυσης μετά την δημιουργία του τελικού αρχείου, βάσει της

οποίας διερευνήθηκε η αναγέννηση της βλάστησης στην καμένη περιοχή αλλά και ο συσχετισμός της αναβλάστησης με τα χαρακτηριστικά της τοπογραφίας.

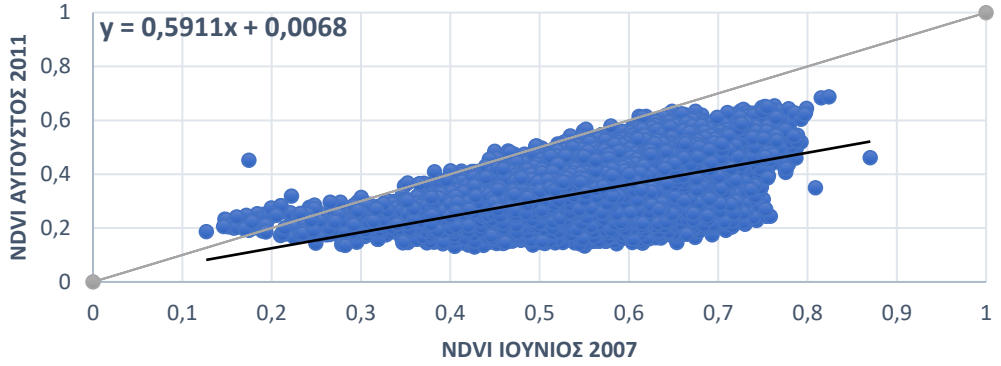


Διάγραμμα 5.2 :Βήματα ανάλυσης

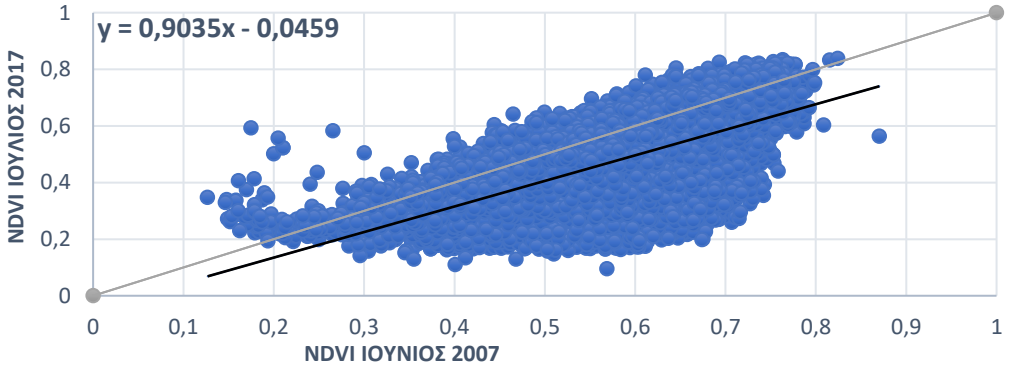
Η σχέση μεταξύ των τιμών εικονοστοιχείων NDVI πριν από την πυρκαγιά και των τιμών μετά την πυρκαγιά απεικονίζεται σε μια σειρά γραφημάτων διασποράς. Η θέση του νέφους των σημείων σε σχέση με τη γραμμή 1 : 1 αντιπροσωπεύει τις συνθήκες βλάστησης πριν από την πυρκαγιά, ενώ ο βαθμός συνοχής στα χωρικά μοτίβα NDVI πριν και μετά την πυρκαγιά για κάθε έτος αντιπροσωπεύεται από το διασπορά των σημείων.



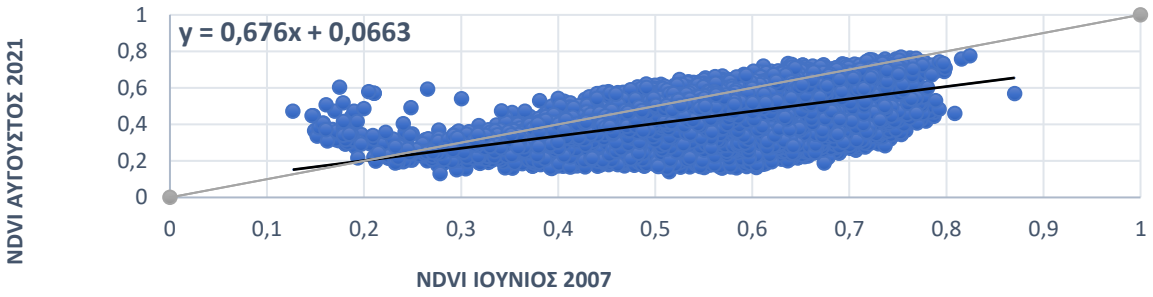
Γράφημα 5.2 : *Διάγραμμα διασποράς* NDVI 06/2007-NDVI 07/2007



Γράφημα 5.3:Διάγραμμα διασποράςNDVI 06/2007-NDVI 2011



Γράφημα 5.4:Διάγραμμα διασποράςNDVI 06/2007-NDVI 2017



Γράφημα 5.5:Διάγραμμα διασποράς NDVI 06/2007-NDVI 2021

Τα μοντέλα παλινδρόμησης που απεικονίζονται από πάνω έχουν προσαρμοστεί στην δυναμική της διαδικασίας αναγέννησης της βλάστησης, οπού έχει σχεδιαστεί η σχέση μεταξύ των τιμών των εικονοστοιχείων NDVI πριν την πυρκαγιά και των ημερομηνιών μετά την πυρκαγιά. Ο βαθμός συνοχής στα χωρικά πρότυπα NDVI πριν και μετά την πυρκαγιά για κάθε έτος αντιπροσωπεύεται από τη διασπορά των αντίστοιχων διαγραμμάτων. Τα scatterplots δείχνουν ότι πραγματοποιήθηκε σταδιακή αύξηση του NDVI, υποδεικνύοντας ότι τα πρώτα χρονιά η δυναμική της αναγέννησης είναι μεγαλύτερη σε σχέση με το 2021. Όπως φαίνεται στο τελευταίο διάγραμμα παρατηρήθηκε μια σταδιακή μείωση της αναγέννησης της βλάστησης, γεγονός που ενδέχεται να οφείλεται σε διάφορα γεγονότα, όπως το κλίμα της περιοχής και πιο συγκεκριμένα τον ρυθμό βροχόπτωσης.

Στην προσπάθεια προσαρμογής των μοντέλων παλινδρόμησης στην δυναμική της διαδικασίας αναγέννησης, δημιουργήθηκε ο παρακάτω πίνακας στον οποίο παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία γραμμικής παλινδρόμησης που σχετίζονται με τα διαγράμματα σκέδασης. Τα μοντέλα παλινδρόμησης συμφωνούν και με τους χάρτες που παρουσιάστηκαν στην αρχή της ενότητας, καθώς η κίνηση της γραμμής παλινδρόμησης προς με το χρόνο είναι πολύ προοδευτική και σταδιακή, και η αύξηση του R^2 αν και μικρή είναι επίσης σαφής, αν και παρουσιάζει μικρή συσχέτιση.

Πίνακας 5.3: Στατιστικά NDVI

Χρονική Περίοδος	Slope	Intercept	R^2
Ιούνιος 2007-Ιούλιος 2007	-0,15	0,21	0,12
Ιούνιος 2007-Αύγουστος 2011	0,59	0,01	0,27
Ιούνιος 2007-Ιούλιος 2017	0,90	-0,05	0,36
Ιούνιος 2007-Αύγουστος 2021	0,68	0,07	0,23

5.3.Συσχετισμός αναβλάστησης με χαρακτηριστικά καμένης έκτασης

5.3.1.Τοπογραφία (slope, aspect)

Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της προ-επεξεργασίας η ανάκτηση της βλάστησης μετά την πυρκαγιά στα μεσογειακά οικοσυστήματα μπορεί να επηρεαστεί από χρονικές διακυμάνσεις στις μετεωρολογικές συνθήκες, χωρικές διακυμάνσεις στις συνθήκες της τοποθεσίας και διαφορές στον τύπο βλάστησης.

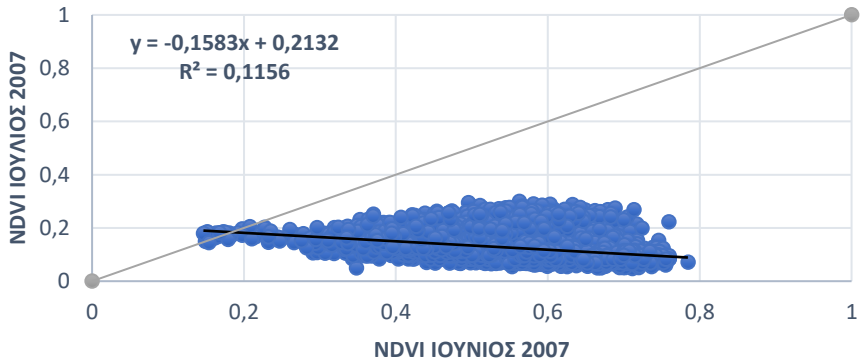
Για τον λόγο αυτόν διερευνήθηκε ο βαθμός επιρροής που είχε η τοπογραφία και ο προσανατολισμός στην διαδικασία της δασικής αναγέννησης. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε η συσχέτιση της δυναμικής ανάκτησης αναβλάστησης και των κλίσεων. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, τα εικονοστοιχεία με προσανατολισμό με προσανατολισμό μεταξύ ΒΔ (315°) και ΒΑ (45°) ταξινομήθηκαν ως πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό, ενώ νότιες κλίσεις αυτές που είχαν προσανατολισμό μεταξύ ΝΑ (135°) και ΝΔ (225°). Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν δύο μάσκες που απεικόνιζαν τα North και South facing slopes, οι οποίες στην συνέχεια εφαρμοστήκαν στους δείκτες αναγέννησης.

Πίνακας 5.4: Στατιστικά North/South facing slopes

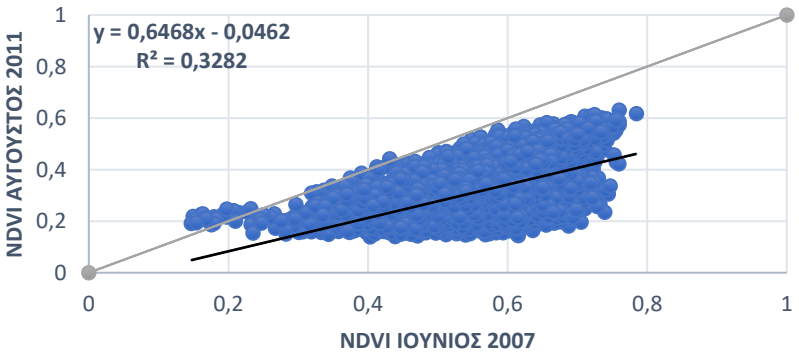
Περίοδος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση τιμή	Τυπική Απόκλιση
NDVI με βόρειο προσανατολισμό				
16 Ιουνίου 2007	0	0,82	0,05	0,17
03 Ιουλίου 2007	0	0,30	0,01	0,04
15 Αυγούστου 2011	0	0,68	0,03	0,10
30 Ιουλίου 2017	0	0,84	0,04	0,14
10 Αυγούστου 2021	0	0,76	0,04	0,13
NDVI με νότιο προσανατολισμό	**Ελάχιστο**	**Μέγιστο**	**Σημασία**	**Τυπική Απόκλιση**
16 Ιουνίου 2007	0	0,78	0,03	0,12
03 Ιουλίου 2007	0	0,30	0,01	0,03
15 Αυγούστου 2011	0	0,65	0,02	0,07
30 Ιουλίου 2017	0	0,82	0,02	0,10
10 Αυγούστου 2021	0	0,74	0,02	0,09

Από τα παραπάνω δεδομένα δημιουργήθηκαν τα μοντέλα παλινδρόμησης ώστε να περιγράφουν και τα στατιστικά στοιχεία για τον δείκτη αναβλάστησης σχετικά με τον νότιο και βόρειο προσανατολισμό.

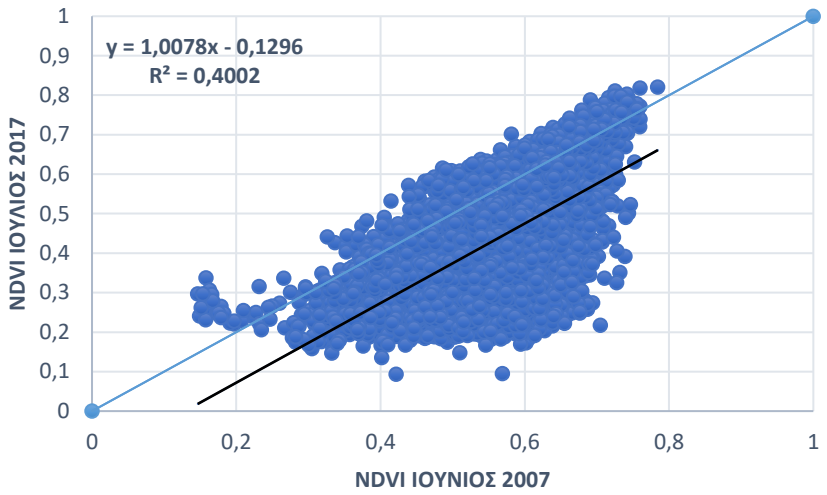
Εικόνα 5.7:NDVI 08/2021 για βόρειες πλαγιές σε μοίρες *Εικόνα 5.8:NDVI 08/2021 για νότιες πλαγιές σε μοίρες*



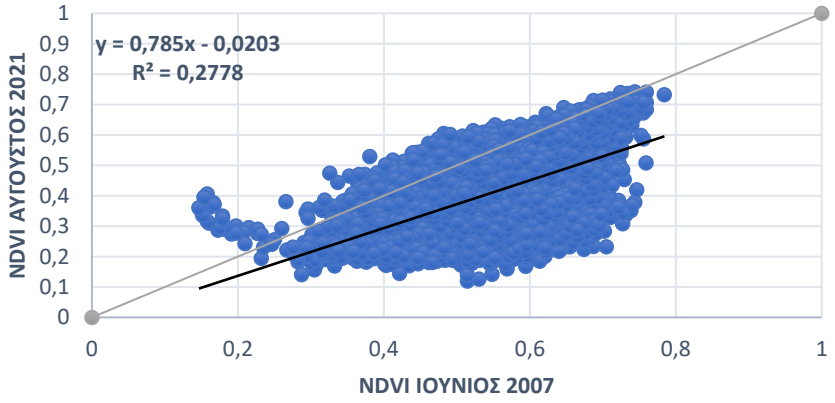
Γράφημα 5.7:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό 06/2007-07/2007



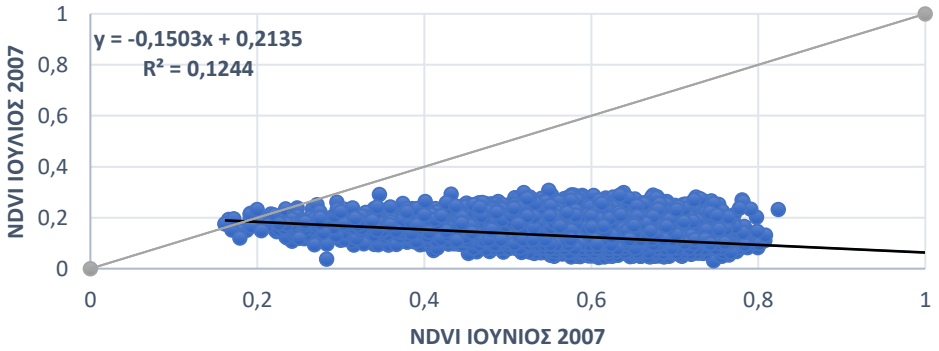
Γράφημα 5.8: Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό 06/2007-08/2011



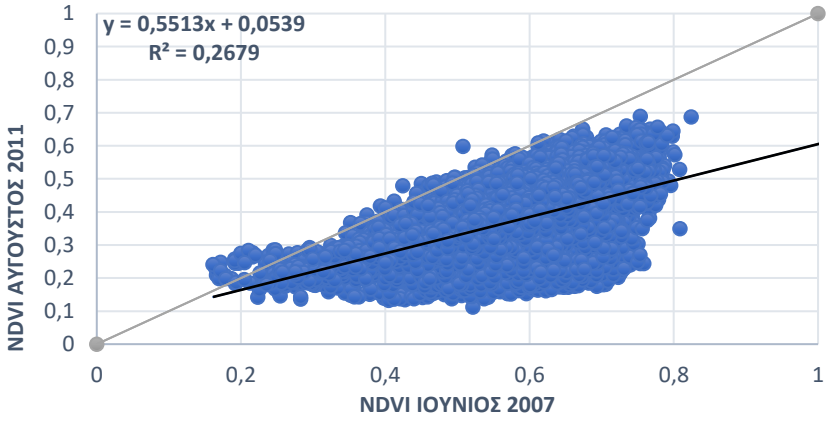
Γράφημα 5.9:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό 06/2007-07/2017



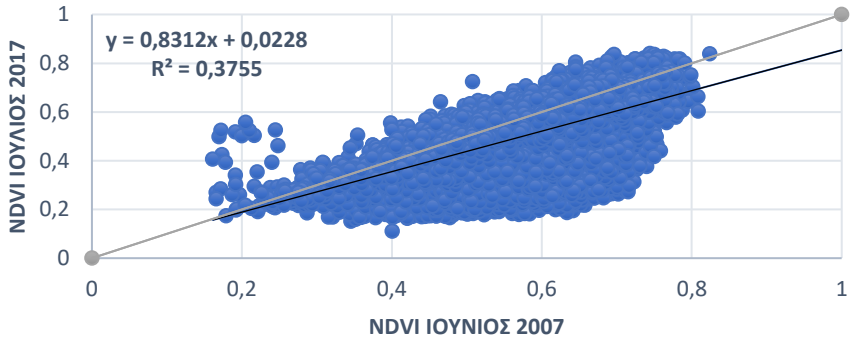
Γράφημα 5.10:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό 06/2007-08/2021



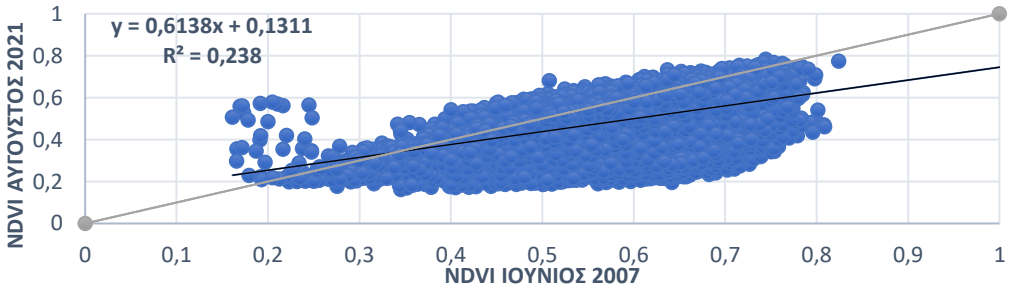
Γράφημα 5.11:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με νότιο προσανατολισμό 06/2007-07/2007



Γράφημα 5.12:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με νότιο προσανατολισμό 06/2007-08/2011



Γράφημα 5.13:Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με νότιο προσανατολισμό 06/2007-07/2017



Γράφημα 5.14: Διάγραμμα διασποράς για τις πλαγιές με νότιο προσανατολισμό 06/2007-08/2021

Μέσω της ανάλυσης που διεξήχθη παραπάνω, βασικός στόχος είναι να πραγματοποιηθεί η ποσοτική συσχέτιση μεταξύ της δυναμικής ανάκτησης μετά την πυρκαγιά

και των κλίσεων. Όπως φαίνεται από αυτά τα αποτελέσματα η δυναμική της αναγέννησης στις πλαγιές με βόρειο και νότιο προσανατολισμό φαίνεται αρκετά αργή. Ωστόσο, παρατηρούνται ορισμένες διαφορές, καθώς το υψηλότερο επίπεδο καταστροφής είναι ευδιάκριτο στις πλάγιες με βόρειο προσανατολισμό σε σχέση με αυτές με νότιο. Όπως, φαίνεται στον πίνακα 5.2 , στην ημερομηνία μετά την πυρκαγιά ο μέγιστος ρυθμός αναγέννησης είναι 0,303 στις πλάγιες με βόρειο προσανατολισμό, ενώ 0,299 στις πλάγιες με νότιο. Όπως παρατηρεί κάνεις και από τα μοντέλα παλινδρόμησης αλλά και από την απεικόνιση του NDVI όπως φαίνεται στις εικόνες 5.8 και 5.9, για την χρονολογία του 2021, η αναγέννηση της βλάστησης μετά από την πυρκαγιά φαίνεται να είναι ταχύτερη στις πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό σε σύγκριση με τις νότιες. Παράλληλα, σύμφωνα με τον πίνακα 5.4, το R^2 υποδεικνύει επίσης την ταχύτερη αναγέννηση στις πλάγιες με βόρειο προσανατολισμό σχετικά με τις πλάγιες με νότιο. Ωστόσο, παρατηρήθηκε ξανά μια μικρή μείωση την τελευταία ημερομηνία.

Πίνακας 5.5: Στατιστικά R^2 North/South facing slopes

Περίοδος	**R^2**
NDVI με βόρειο προσανατολισμό	
16 Ιουνίου 2007-03 Ιουλίου 2007	0,12
16 Ιουνίου 2007-15 Αυγούστου 2011	0,33
16 Ιουνίου 2007-30 Ιουλίου 2017	0,40
16 Ιουνίου 2007-10 Αυγούστου 2021	0,28
NDVI με νότιο προσανατολισμό	**R^2**
16 Ιουνίου 2007-03 Ιουλίου 2007	0,12
16 Ιουνίου 2007-15 Αυγούστου 2011	0,27
16 Ιουνίου 2007-30 Ιουλίου 2017	0,38
16 Ιουνίου 2007-10 Αυγούστου 2021	0,24

5.3.2. Συσχέτιση Normalized Burn Ratio με την δασική αναγέννηση

Ένας ακόμα παράγοντας που συσχετίστηκε με την δασική αναγέννηση ήταν ο δείκτης NBR. Κατά την συσχέτιση, όπως γίνεται αντιληπτό και από τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.6), η μεγαλύτερη μείωση στην βλάστηση σημειώθηκε μεταξύ των ημερομηνιών πριν και αμέσως μετρά την πυρκαγιά. Στην συνέχεια με το πέρασμα των χρόνων παρουσιάστηκε μια σταδιακή αύξηση, καθώς η περιοχή μελέτης έχει αρχίσει να αναγεννάται.

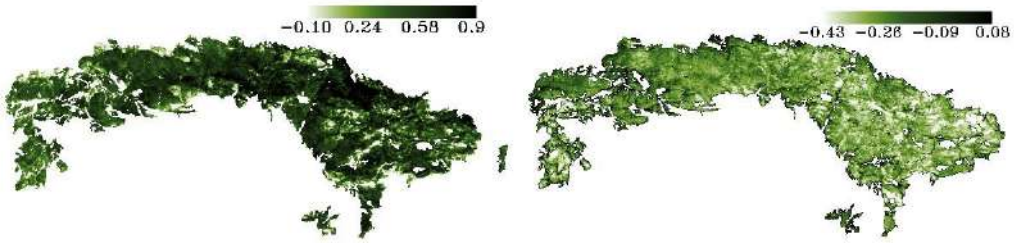
Ο παραπάνω δείκτης υπολογίστηκε ως εξής:

Εξίσωση 5.2: **Basic Tools->Band Math-> (Band 4 – Band 7) / (Band 4 + Band 7).**

Πίνακας 5.6: Στατιστικά NBR

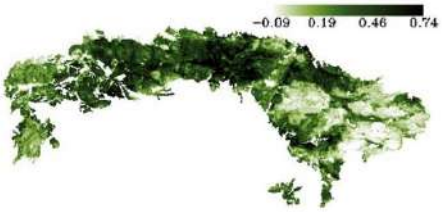
Nbr	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση τιμή	Τυπική Απόκλιση
16 Ιουνίου 2007	-0,10	0,91	0,70	0,06
03 Ιουλίου 2007	-0,43	0,08	-0,22	0,06
15 Αυγούστου 2011	-0,09	0,74	0,24	0,15
30 Ιουλίου 2017	-0,13	0,64	0,18	0,12
10 Αυγούστου 2021	-0,04	0,71	0,28	0,16

Το γυμνό έδαφος φαίνεται και από τις εικόνες που παρατίθενται παρακάτω. Γίνεται ξεκάθαρο πως την πρώτη ημερομηνία μετά τη πυρκαγιά το επίπεδο καμένης έκτασης είναι αρκετά υψηλό, αλλά με το πέρασμα των χρονών έχει ξεκινήσει να αποκαθίσταται.



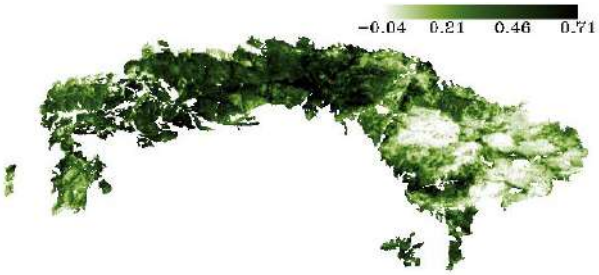
Εικόνα 5.9 :NBR 06/2007

Εικόνα 5.10:NBR 07/2007



Εικόνα 5.11:NBR 2011

Εικόνα 5.12:NBR 2017



Εικόνα 5.13:NBR 2021

Με σκοπό να επιτευχθεί η συσχέτιση των δύο μεταβλητών χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής συσχέτισης **(correlation coefficient) Pearson r** ο οποίος είναι ο σημαντικότερος συντελεστής συσχέτισης. Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson r λαμβάνει τιμές στο διάστημα [-1,+1]. Επομένως για κάθε ζεύγος μεταβλητών, η τιμή του συντελεστή συσχέτισης θα είναι $-1 \leq r \leq 1$. Συντελεστής r = -1 ή r = 1 σημαίνει ότι υπάρχει τέλεια γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών ενώ η τιμή r=0 αντιστοιχεί σε ένα νέφος σημείων τα οποία είναι ασυσχέτιστα. Θετικός συντελεστής συσχέτισης σημαίνει ότι οι δύο μεταβλητές είναι θετικά συσχετιζόμενες και οι τιμές τους μεταβάλλονται προς την ίδια κατεύθυνση, δηλαδή όταν μεγαλώνουν οι τιμές της μίας μεταβλητής μεγαλώνουν και οι τιμές της άλλης μεταβλητής και το αντίστροφο. Αρνητικός συντελεστής συσχέτισης σημαίνει αρνητική σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών, δηλαδή όταν αυξάνουν οι τιμές της μίας μεταβλητής μειώνονται οι τιμές της άλλης. Η μηδενική συσχέτιση σημαίνει ότι δεν υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν και φαίνονται στον παρακάτω πίνακα προκύπτει το συμπέρασμα ότι παρατηρείται μια αρνητική συσχέτιση μεταξύ των δυο μεταβλητών, καθώς όσο αυξάνεται η αναγέννηση της βλάστησης τόσο μειώνεται το καμένο και γυμνό έδαφος (Ηλιοπούλου, 2015).

Πίνακας 5.7: Συσχέτιση NDVI και NBR

NDVI/NBR	r
16 Ιουνίου 2007	-0,99
03 Ιουλίου 2007	-0,99
15 Αυγούστου 2011	-1,00
30 Ιουλίου 2017	-0,97
10 Αυγούστου 2021	-0,99

Κεφάλαιο 6: Συζήτηση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την παραπάνω εργασία και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζουν το επίπεδο στο οποίο επηρεάζεται η αναγέννηση του φυσικού τοπίου της Πάρνηθας μετά από μια δασική πυρκαγιά. Παρουσιάζεται επίσης και ο καταλυτικός ρόλος που παίζουν οι πυρκαγιές στα φυσικά οικοσυστήματα, καθώς αποτελούν παράγοντα καταστροφής της βλάστησης, επηρεάζοντας ριζικά το φυσικό τοπίο και καθιστώντας δύσκολο να επανέλθει στην αρχική του μορφή. Καθώς οι πυρκαγιές είναι ένας σημαντικός παράγοντας διαμόρφωσης της δυναμικής των δασικών οικοσυστημάτων, η κατανόηση των άμεσων και έμμεσων, βραχυπρόθεσμων έως μακροπρόθεσμων επιπτώσεών τους στη φυτική κάλυψη είναι ιδιαίτερα σημαντική για την πρόβλεψη αλλαγών στο κλίμα και το οικοσύστημα (V Kirdyanov et al., 2020).

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μας καταδεικνύουν την σφοδρότητα του φαινομένου που εξετάστηκε καθώς όπως παρουσιάστηκε η φυσική βλάστηση καταστράφηκε ολοσχερώς, επιβεβαιώνοντας ότι η πυρκαγιά τροποποίησε ριζικά το τοπίο.

6.1.Αξιολόγηση της αναβλάστησης της περιοχής

Τα αποτελέσματα της εργασίας έδειξαν ότι η πυρκαγιά είναι ένας σημαντικός παράγοντας αλλαγής της περιοχής μελέτης, καθώς η απότομη μείωση των τιμών NDVI αμέσως μετά την πυρκαγιά είναι απόδειξη αυτών των επιπτώσεων. Τα κύρια ευρήματα υποδεικνύουν επίσης ότι η αναγέννηση της βλάστησης μπορεί δυνητικά να πάρει δεκαετίες για να επανέλθει στην αρχική κατάσταση. Πράγματι, τέσσερα χρόνια μετά την πυρκαγιά, τα επίπεδα NDVI είχαν επιστρέψει περίπου στο 60% των επιπέδων πριν από την πυρκαγιά και η χωρική έκταση της βλάστησης είχε μόνο μερικώς επανέλθει στην αρχική της κατάσταση. Όπως προέκυψε τον Ιούνιο του 2007 η περιοχή μελέτης κάλυπτε 4236,03 τετραγωνικά χιλιόμετρα βλάστησης, το Ιούλιο του 2007, τον εμβαδόν της δασοκάλυψης ήταν μόλις 0,54, δηλαδή κάηκαν 4235,49 τετραγωνικά χιλιόμετρα. Το καλοκαίρι του 2021 η δασοκάλυψη δεν έχει επανέλθει ολοκληρωτικά, γεγονός που αποδεικνύει ότι η πλήρης αποκατάσταση ενός φυσικού τοπίου μετά από μια τέτοια καταστροφή είναι αρκετά δύσκολη. Διερευνώντας τον ρυθμό μεταβολής της δασοκάλυψης, προέκυψε ότι την πρώτη πενταετία, έως δηλαδή τον Ιούλιο του 2011, η βλάστηση είχε αποκατασταθεί κατά το 62%. Στην επόμενη πενταετία η αύξηση ήταν μικρότερη δηλαδή μόλις 23% ενώ την τελευταία πενταετία παρατηρήθηκε μια μικρή μείωση του 1%,

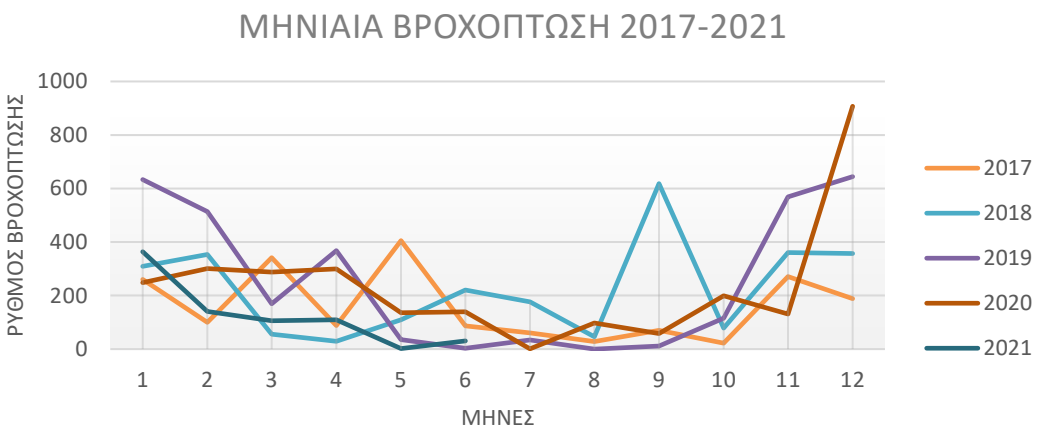
γεγονός που ενδεχομένως να οφείλεται στις ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες, στις μειωμένες βροχοπτώσεις που σημειωθήκαν το 2021 καθώς και σε ενδεχόμενες αναζωπυρώσεις που σημειώθηκαν στην περιοχή.

Όσον αφορά στην εκτίμηση της καμένης έκτασης σημαντικό εργαλείο αποτελεί ο δείκτης αναβλάστησης του φυσικού τοπίου. Όπως έχει αποδειχθεί, ο δείκτης NDVI θεωρείται κατάλληλος δείκτης για την μελέτη της βλάστησης για μοτίβα σε χωρικές και χρονικές κλίμακες, ενώ έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τις μελέτες μετά από πυρκαγιές στις οποίες διερευνάται η δυναμική της βλάστησης.

Χαρακτηριστική είναι η μελέτη που διεξήχθη στην κοινωνικά και γεωγραφικά απομονωμένη χερσόνησο του Αγίου Όρους, και είχε ως αντικείμενο μελέτης την δυναμική της βλάστησης σε μια περίοδο 30 χρόνων μετά την πυρκαγιά. Χρησιμοποιήθηκαν 4 εικόνες για τον υπολογισμό του δείκτη και η μελέτη είχε ως στόχο να διερευνήσει τον τρόπο που επηρεάζει η πυρκαγιά τις διαφορετικές φυτικές κοινότητες (M. Meneses, 2021). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ακόμα και 30 χρόνια μετά η πλήρης αποκατάσταση στο φυσικό τοπίο είναι δύσκολη.

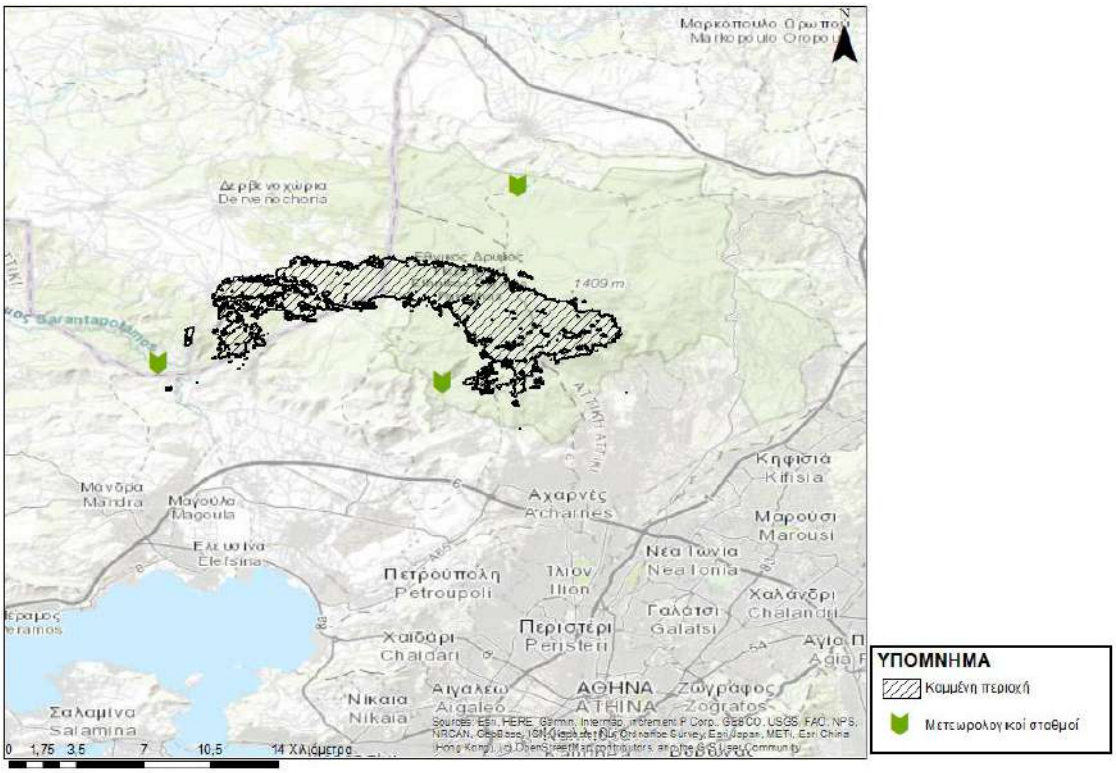
Στην συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην παρούσα εργασία έγινε αντιληπτό ότι η πλήρης αναγέννηση της βλάστησης στην περιοχή μπορεί να αργήσει πολύ. Η δυσκολία αυτή εξηγείται καθώς η ανατολική πλευρά της Πάρνηθας, ανήκει στην ζώνη με τον πυκνό δάσος. Σύμφωνα με το ΠΔ για τον ‘’Καθορισμό ζωνών προστασίας του ορεινού όγκου Πάρνηθας’’ η περιοχή μελέτης ανήκει στο μεγαλύτερο τμήμα της στην ζώνη προστασία Α2 οπού είναι απολύτου προστασίας, αποτελώντας κατά βάση την ανατολική πλευρά. Η δυτική πλευρά της περιοχής μελέτης η οποία έχει αποκατασταθεί και στον μεγαλύτερο βαθμό ανήκει στην ζώνη Β2 στην οποία επιτρέπονται και κάποιες δυνατότητες αναψυχής (https://www.euro2day.gr/news/economy/article/96673/ypehode-zones-prostasias-separnhthatatoi.html). Ενώ το τοπίο καταστράφηκε ολοσχερώς, η βλάστηση μόλις 4 χρόνια μετά, δηλαδή το 2011, άρχισε να αποκαθίσταται σε μεγάλο τμήμα της περιοχής, όπου η δασοκάλυψη είχε αποκατασταθεί στο 62%, ενώ 6 χρόνια μετά είχε ανακάμψει στο μεγαλύτερο ποσοστό στο βόρειο τμήμα της περιοχής, ενώ ακόμα και σήμερα το νότιο τμήμα δεν έχει επανέλθει. Αξίζει να σημειωθεί, πως συνολικά έως το καλοκαίρι του 2021 στην περιοχή μελέτης η βλάστηση έχει αποκατασταθεί κατά 83,3%. Παράλληλα, είναι εμφανές ότι για τις

περισσότερες χρονικές περιόδους που εξετάστηκαν ο δείκτης ακολουθεί μια αυξητική τάση. Αυτά τα αποτελέσματα υποδηλώνουν ότι επιτεύχθηκε μεγαλύτερη αναγέννηση κατά τη διάρκεια των πρώτων 6 χρόνων μετά την πυρκαγιά καθώς ο δείκτης διπλασιάστηκε. Ωστόσο, το 2021 παρατηρήθηκε μια μικρή μείωση, η οποία ενδεχομένως προκλήθηκε από φυσικές ή ανθρωπογενείς αλλαγές μικρής κλίμακας εντός της περιοχής μελέτης. Όπως γίνεται αντιληπτό στο παρακάτω διάγραμμα από το 2019 έως και τον Ιούνιο του 2021 παρατηρήθηκε μια ραγδαία μείωση της βροχόπτωσης, γεγονός που ενδεχομένως σχετίζεται και με την ευρύτερη κλιματική αλλαγή.



Γράφημα 6.1: Μηνιαίος ρυθμός βροχόπτωσης 2017-2021

Οι πληροφορίες για τον ρυθμό της βροχόπτωσης ελήφθησαν από το meteoview (https://stratus.meteo.noa.gr/front) και στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται οι τρεις σταθμοί από τους οποίες ελήφθησαν τα στατιστικά στοιχεία. Οι σταθμοί αυτοί ήταν του Τατοΐου, της Πάρνηθας και της Ιπποκράτειου Πολιτείας. Στον παρακάτω χάρτη φαίνονται οι μετεωρολογικοί σταθμοί στην περιοχή μελέτης.



Εικόνα 6.1:Χάρτης απεικόνισης σταθμών βροχόπτωσης

Όπως αναφέρουν και οι (Christopoulou et al., 2019) η αναγέννηση της βλάστησης μετά την πυρκαγιά έχει μελετηθεί διεξοδικά στη λεκάνη της Μεσογείου. Παράλληλα, είναι γεγονός πως σε επίπεδο τοπίου, πολλαπλοί περιβαλλοντικοί παράγοντες επηρεάζουν την ανάκτηση της βλάστησης μετά την πυρκαγιά. Έτσι, στη λεκάνη της Μεσογείου, έχει βρεθεί ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του φαινομένου της πυρκαγιάς και των χαρακτηριστικών των φυτικών ειδών παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία.

Άλλη έρευνα που αποτελεί εξίσου μια μελέτη ανάκτησης της βλάστησης μετά από μια πυρκαγιά με διαχρονικά δεδομένα τηλεπισκόπησης, αφορά την περιοχή μελέτης του Ταΰγετου στον οποίο η πυρκαγιά σημειώθηκε το 2007, όπως και στην υπό μελέτη περιοχή.

6.2.Συσχετισμός της αναβλάστησης με την κλίση και τον προσανατολισμό

Όπως παρατηρήθηκε στο στάδιο της ανάλυσης ένας από τους βασικούς παράγοντες που επηρέασαν την αναγέννηση του φυσικού οικοσυστήματος μετά την πυρκαγιά είναι η τοπογραφία της περιοχής. Είναι εμφανές από τα αποτελέσματα της διερευνητικής στατιστικής ανάλυσης ότι οι κλίσεις με προσανατολισμό προς τον Βορρά έχουν μεγαλύτερο ρυθμό αναγέννησης σε σύγκριση με τις κλίσεις που είναι προσανατολισμένες προς τον Νότο.

Έχει καταστεί σαφές ότι η κλίση αποτελεί βασικό έλεγχο του ρυθμού αναγέννησης της βλάστησης, αντανακλώντας τις επιδράσεις του μικροκλίματος στις υδρολογικές διεργασίες. Η κλίση επηρεάζει επίσης τα ποσοστά σοβαρότητας της πυρκαγιάς λόγω της σχέσης της με τη συμπεριφορά του ανέμου, τη μεταφορά και την ακτινοβολία. Οι διαφορές στην αναγέννηση μετά την πυρκαγιά μπορούν να αντανακλούν και να επηρεάσουν και την συμπεριφορά του εδάφους, προκαλώντας εξίσου διάφορες επιπτώσεις, όπως αυξημένη απορροή, πλημμύρες αλλά και αλλαγές στα χερσαία πρότυπα ροής και διάβρωση του εδάφους, λόγω της αλλαγής των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων αυτού. Αυτά τα δευτερεύοντα φαινόμενα αν και κρίνονται μικρής ανησυχίας, αποτελούν σημαντικό παράγοντα στη δυναμική αναγέννησης της βλάστησης. Η βροχόπτωση διαδραματίζει εξίσου μεγάλο ρολό καθώς στις βόρειες κλίσεις σημειώνεται μεγαλύτερο ποσοστό σχετικά με τις νότιες, διευκολύνοντας την ανανέωση του εδάφους. Ταυτόχρονα, η κλίση επηρεάζει τα ποσοστά σοβαρότητας της καύσης λόγω του συσχετισμού με τη συμπεριφορά του ανέμου, τη μεταφορά και την ακτινοβολία (James Ireland, 2013).

Τόσο από την στατιστική ανάλυση όσο και από την χαρτογράφηση των δεδομένων στην μελέτη αυτή ήταν εμφανές ότι ο δείκτης αναβλάστησης συσχετίζεται με την τοπογραφία της περιοχής, όπου αποδεικνύεται ότι οι Βόρειες εκθέσεις έχουν μεγαλύτερο ρυθμό αναγέννησης σε σύγκριση με τις Νότιες. Ωστόσο, θα περίμενε κανείς να πραγματοποιείται το αντίθετο, καθώς οι πλαγιές με νότιο προσανατολισμό δέχονται μεγαλύτερη ακτινοβολία με αποτέλεσμα να ευνοείται σε μεγαλύτερο βαθμό η αναγέννηση της βλάστησης. Όπως αναφέρει και η βιβλιογραφία ωστόσο, σύμφωνα με τους (Viana-Soto et al, 2017), στα μεσογειακά οικοσυστήματα οι βόρειες πλάγιες και οι μεγάλες κλίσεις τείνουν να παρουσιάζουν μεγαλύτερα ποσοστά αναγέννησης λόγω της υψηλότερης περιεκτικότητας σε υγρασία που υπάρχει στις περιοχές με αυτά τα χαρακτηριστικά. Φαίνεται συνεπώς ότι στην περιοχή μελέτης η υγρασία

του εδάφους (και όχι η σχετικά μεγαλύτερη έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία) είναι ο καθοριστικός παράγοντας που ελέγχει την αναβλάστηση της φυσικής βλάστησης.

Στο τέλος διερευνήθηκε η συσχέτιση του δείκτη NBR με τον δείκτη αναγέννησης. Συσχετίζοντας τις τιμές NDVI με τα αποτελέσματα σοβαρότητας καύσης εδάφους, αποδεικνύεται ότι η γνώση σχετικά με τις επιπτώσεις της σοβαρότητας καύσης είναι ένα σημαντικό ζήτημα που απαιτείται για τη διαχείριση φυσικών και ημιφυσικών τοπίων για σκοπούς διατήρησης του οικοσυστήματος. Όπως φαίνεται από τα ευρήματα της εργασίας, ο δείκτης NBR συσχετίζεται με τον δείκτη αναβλάστησης.

Όπως φαίνεται και παραπάνω οι δείκτες NBR και NDVI ήταν ιδιαιτέρως σημαντικοί για τη χαρτογράφηση δασικών πυρκαγιών και συνιστούν ένα από τα καλά μέσα μέτρησης στο πεδίο όταν η φυσική προσέγγιση διαταράσσεται ή γίνεται δύσκολη (Sandamali and Chathuranga, 2021).

Από όσα αναπτύχθηκαν παραπάνω, είναι κατανοητό πως η απώλεια βλάστησης μειώνει τη βιοποικιλότητα, ενισχύει τη διάβρωση του εδάφους και ακόμη αυξάνει την πιθανότητα πλημμύρας. Επιπρόσθετα, σε μακροπρόθεσμο επίπεδο, μπορεί να ενισχύσει την υπερθέρμανση του πλανήτη (Au Yeung and Li, 2018). Τα κλιματικά πρότυπα, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες και οι χρήσεις γης έχουν παίξει καθοριστικό ρόλο στην αύξηση της συχνότητας των πυρκαγιών έως το 2050, επηρεάζοντας πολλές περιοχές του κόσμου.

Στην περιοχή της Μεσογείου, οι πυρκαγιές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του τοπίου και στον καθορισμό των οικοσυστημάτων και της κατανομής των ειδών ενώ θεωρείται μία από τις πιο επιρρεπείς σε πυρκαγιές περιοχές στον κόσμο. Μετά την σταθεροποίηση του χαρακτηριστικού μεσογειακού κλίματος στην περιοχή, περίπου πριν από 2,8 εκατομμύρια χρόνια, η πυρκαγιά έχει γίνει μια από τις κύριες δυνάμεις επιλογής για τη μεσογειακή χλωρίδα και είναι η προσαρμογή πολλών ειδών σε επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές που τους εξασφαλίζει επιμονή. Οι δύο βασικοί λόγοι για τη συχνότητα των πυρκαγιών στα μεσογειακά οικοσυστήματα είναι η καλοκαιρινή ξηρασία και η μακρά ανθρώπινη παρουσία στην περιοχή (Xofis et al, 2021).

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα & Μελλοντικές κατευθύνσεις

7.1.Κύρια συμπεράσματα εργασίας

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο να καταγράψει και να αξιολογήσει την αναγέννηση της βλάστησης μετά την πυρκαγιά που σημειώθηκε στην Πάρνηθα το καλοκαίρι του 2007, με την συμβολή των δορυφορικών εικόνων Landsat. Βασική επιδίωξη ήταν η παρακολούθηση του ρυθμού αναγέννησης της βλάστησης κατά την χρονική περίοδο 2007-2021. Στην συνέχεια ο ρυθμός της αναγέννησης μελετήθηκε ως προς την συσχέτισή του με τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής αλλά και με τον δείκτη καμένης έκτασης.

Τα δορυφορικά δεδομένα αποτελούν το βασικό εργαλείο, αφού με την κατάλληλη επεξεργασία μέσω Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, καθιστούν δυνατή την ανάλυση των αλλαγών στον δείκτη αναβλάστησης, NDVI. Αυτό προκύπτει και από το γεγονός ότι δίνει βασικές πληροφορίες για την ποσότητα της βλάστησης σε μια περιοχή, αποτελώντας απαραίτητο στοιχείο για τον ανασχεδιασμό των δασών.

Στην παρούσα εργασία τα δορυφορικά δεδομένα ενσωματώθηκαν στο GIS ώστε να καταστεί δυνατή η ανάλυση των αλλαγών στον δείκτη του NDVI για μια περιοχή μελέτης στο όρος της Πάρνηθας, πριν και μετά την πυρκαγιά του 2007. Ο προσδιορισμός των αλλαγών που σημειώθηκαν στην βλάστηση βοήθησε στην διαχρονική αξιολόγηση του ρυθμού αναγέννησης και στην αλλαγή της δυναμικής της αναγέννησης σε σχέση με την τοπογραφία. Τα αποτελέσματα αυτής της ανάλυσης έδειξαν ότι με βάση τις τιμές του δείκτη NDVI μετά την πυρκαγιά παρατηρείται σχετικά γρήγορη αναγέννηση τα τέσσερα πρώτα χρόνια μετά την πυρκαγιά, (η αναγέννηση της βλάστησης έφτασε στο 62%), ενώ τα επόμενα χρόνια ο ρυθμός αναγέννησης ήταν μικρότερος. Η ανάλυση επεκτάθηκε και στην εξέταση της συσχέτισης της δυναμικής της αναβλάστησης με την τοπογραφία της περιοχής, με βάση την κλίση και τον προσανατολισμό. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πλαγιές με βόρειο προσανατολισμό εμφάνισαν ταχύτερο ρυθμό ανάκαμψης συγκριτικά με αυτές με νότιο προσανατολισμό. Πιο συγκεκριμένα την πρώτη ημερομηνία μετά την πυρκαγιά οι βόρειες πλαγιές είχαν μέγιστη τιμή για τον δείκτη αναγέννησης 0,68 ενώ οι νότιες 0,65. Αυτή η μικρή διαφορά παρατηρήθηκε και για τις υπόλοιπες χρονιές, καθώς έξι χρόνια μετά σημειώθηκε παρόμοια διαφορά στον δείκτη αναγέννησης, με τιμές 0,84 για τις βόρειες πλαγιές και 0,82 για τις νότιες. Ορισμένοι παράγοντες που παίζουν καθοριστικό ρολό σε αυτή την διαφοροποίηση, αφορούν κυρίως στις

μικροκλιματικές συνθήκες που σημειώνονται στις βόρειες πλαγιές σχετικά με τις νότιες, και επηρεάζουν σημαντικά τα πρώτα στάδια της αναβλάστησης.

Όπως είναι γεγονός μέσω της κατανόησης των χωροχρονικών προτύπων της δυναμικής της αναβλάστησης είναι εύκολη η διενέργεια εκτιμήσεων για την αναγέννηση του τοπίου μετά την πυρκαγιά. Τέλος, στην παρούσα εργασία επιβεβαιώνεται ότι οι τεχνολογίες παρακολούθησης της γης και οι τεχνικές ανάλυσης GIS μπορούν να παρέχουν λύση για την υποστήριξη μελετών αποκατάστασης κάλυψης εδάφους μετά από πυρκαγιές, υπό την προϋπόθεση ότι οι δορυφορικές εικόνες μπορούν να ληφθούν σε τακτά χρονικά διαστήματα σε μια δεδομένη περιοχή.

7.2.Κατευθύνσεις συνέχισης της εργασίας

Η παρούσα μελέτη θα μπορούσε να επεκταθεί και σε άλλες κατευθύνσεις καθώς μετά από μια πυρκαγιά η δυναμική της αναβλάστησης δεν διενεργείται με τον ίδιο τρόπο στις καμένες περιοχές μιας περιοχής μελέτης. Γίνεται αντιληπτό ότι είναι πολλοί οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ρυθμό αναβλάστησης μιας πυρκαγιάς, όπως η σοβαρότητα της πυρκαγιάς, τα είδη βλάστησης και τα περιβαλλοντικά βιοφυσικά χαρακτηριστικά αυτών των περιοχών.

Τα είδη βλάστησης που υπάρχουν στις καμένες περιοχές πριν από την πυρκαγιά παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαδικασία της αναγέννησης επειδή ορισμένα είδη αναγεννούνται πιο γρήγορα σε σύγκριση με άλλα, για παράδειγμα, ο ευκάλυπτος αναγεννάται σε σύντομο χρονικό διάστημα σε σύγκριση με τα κωνοφόρα, τη βελανιδιά ή είδη. Επίσης στα βασικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την διαδικασία της αναγέννησης είναι οι κλιματολογικές συνθήκες καθώς παρουσιάζουν εξίσου σημαντικά την αναγεννητική ικανότητα της περιοχής. Έτσι, προκύπτει ότι θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μελέτη που θα εξετάσει τη σχέση της αναβλάστησης με το μικροκλίμα της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Οι παραπάνω παράγοντες είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για τον δασικό σχεδιασμό με σκοπό την ανάκαμψη των οικοσυστημάτων και για την αποτροπή εμφάνισης νέων μεγάλων δασικών πυρκαγιών, το οποίο θα επιτευχθεί με την υιοθέτηση νέων στρατηγικών δασοκομίας και την τροποποίηση ανθρωπογενών πρακτικών.

8.Βιβλιογραφία

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ

Addison, P. and Oommen, T., 2018. *Utilizing satellite radar remote sensing for burn severity estimation*. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030324341830432X> [Accessed 28 January 2022].

Bilgili, E., Mouillot, F., Xanthopoulos, G., Vaz, P., Corona, P., Barbati, A., Rigolot, E., Koutsias, N., Curt, T., Arianoutsou, M., Viedma, O. and Moreira, F., 2011. Landscape e wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/51479381_Landscape-wildfire_interactions_in_southern_Europe_Implications_for_landscape_management> [Accessed 4 October 2022].

Bivolarski, B., 2019. *ENVIRONMENTAL AND SOCIAL ECONOMIC CONSEQUENCES OF FOREST FIRES ON THE TERRITORY OF STARA ZAGORA REGION*. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/335324521_ENVIRONMENTAL_AND_SOCIAL_ECONOMIC_CONSEQUENCES_OF_FOREST_FIRES_ON_THE_TERRITORY_OF_STARA_ZAGORA_REGION> [Accessed 6 February 2022].

Bonannella, C., Chirici, G., Travaglini, D., Pecchi, M., Vangi, E., D'Amico, G. and Giannetti, F., 2022. *Characterization of Wildfires and Harvesting Forest Disturbances and Recovery Using Landsat Time Series: A Case Study in Mediterranean Forests in Central Italy*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2571-6255/5/3/68> [Accessed 12 June 2022].

Boogert, F., 2016. Evaluation of vegetation recovery after fire: a case study in Calde, central region of Portugal. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/316087535_Evaluation_of_vegetation_recovery_after_fire_a_case_study_in_Calde_central_region_of_Portugal> [Accessed 14 November 2022].

Butsic, V., Kelly, M. and A Moritz, M., 2015. *Land Use and Wildfire: A Review of Local Interactions and Teleconnections*. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/272790284_Land_Use_and_Wildfire_A_Review_of_Local_Interactions_and_Teleconnections> [Accessed 4 February 2022].

Casanova, J., 2008. Forest Fires And Remote Sensing. [ebook] Available at:<https://www.researchgate.net/publication/225901301_Forest_Fires_And_Remote_Sensing> [Accessed 15 November 2022].

Chatzichristaki, C., 2011. Η συμβολή της φυσικής και τεχνητής αναγέννησης στην αποκατάσταση του πυρόπληκτου τμήματος του δάσους του Κεδρηνού λοφου Θεσσαλονικης. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/307606615_E_symbole_tes_physikes_kai_technetes_anagenneses_sten_apokatastase_tou_pyroplektou_tmematos_tou_dasous_tou_Kedrenou_lophou_Thessalonikes> [Accessed 6 November 2022].

Chen, X., E. Vogelmann, J., Rollins, M., Ohlen, D., H. Key, C., Yang, L., Huang, C. and Shi, H., 2011. Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest. [ebook] Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2010.524678> [Accessed 4 December 2022].

Christopoulou, A., Kazanis, D. and Arianoutsou, M., 2018. *Post-fire recovery of Abies cephalonica forest communities: the case of Mt Parnitha National Park, Attica, Greece*. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/329269110_Post-fire_recovery_of_Abies_cephalonica_forest_communities_the_case_of_Mt_Parnitha_National_Park_Attica_Greece> [Accessed 6 February 2022].

Christopoulou, A., Mallinis, G., Vassilakis, E., Farangitakis, G., Fyllas, N., Kokkoris, G. and Arianoutsou, M., 2019. *Assessing the impact of different landscape features on post-fire forest recovery with multitemporal remote sensing data: the case of Mount Taygetos (southern Greece)*. http://scholar.uoa.gr/evasilak/publications/assessing-impact-different-landscape-features-post-fire-forest-recovery.

Chu, T. and Guo, X., 2014. *Remote Sensing Techniques in Monitoring Post-Fire Effects and Patterns of Forest Recovery in Boreal Forest Regions: A Review*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/6/1/470> [Accessed 29 January 2022].

Daşdemir, İ., Aydın, F. and Ertuğrul, M., 2021. *Factors Affecting the Behavior of Large Forest Fires in Turkey*. [ebook] Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33200252/> [Accessed 27 January 2022].

Díaz Pacheco, J. and Gutiérrez, J., 2013. Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/264157123_Exploring_the_limitations_of_CORINE_Land_Cover_for_monitoring_urban_land-use_dynamics_in_metropolitan_areas> [Accessed 1 March 2022].

Edemir Shimabukuro, Y., Arai, E., Duarte, V., Jorge, A., Ghizoni dos Santos, E., Allan Cruz Gasparini, K. and Cerqueira Dutra, A., 2018. *Monitoring deforestation and forest degradation using multi-temporal fraction images derived from Landsat sensor data in the Brazilian Amazon*. [ebook] Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2019.1579943?journalCode=tres20> [Accessed 6 June 2022].

Efthimiou, N., Psomiadis, E. and Panagos, P., 2019. *Fire severity and soil erosion susceptibility mapping using multi-temporal Earth Observation data: The case of Mati fatal wildfire in Eastern Attica, Greece*. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S034181621930462X> [Accessed 4 February 2022].

Efthimiou, N., Psomiadis, E. and Panagos, P., 2019. *Fire severity and soil erosion susceptibility mapping using multi-temporal Earth Observation data: The case of Mati fatal wildfire in Eastern Attica, Greece*. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S034181621930462X> [Accessed 4 February 2022].

Elhag, M., Yimaz, N., Bahrawi, J. and Boteva, S., 2020. *Evaluation of Optical Remote Sensing Data in Burned Areas Mapping of Thasos Island, Greece*. [ebook] Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41748-020-00195-1> [Accessed 25 June 2022].

ESA 2013. TRACKING A BURNING ISSUE FROM SPACE. [ebook] Available at: <https://www.copernicus.eu/sites/default/files/documents/Copernicus_Briefs/Copernicus_Brief_Issue15_Fires_Sep2013.pdf> [Accessed 28 October 2022].

Evelpidou, N., Tzouxanioti, M., Gavalas, T., Spyrou, E., Saitis, G., Petropoulos, A. and Karkani, A., 2021. *Assessment of Fire Effects on Surface Runoff Erosion Susceptibility: The Case of the Summer 2021 Forest Fires in Greece*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2073-445X/11/1/21/htm> [Accessed 10 February 2022].

Fernández-Guisuraga, J., Calvo, L., Fernández-García, V., , Marcos-Porras, E., Taboada, Á. and Suárez-Seoane, S., 2019. Efficiency of remote sensing tools for post-fire management along a climatic gradient. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112718318231> [Accessed 29 January 2022

Fox, D., Maselli, F. and Carrega, P., 2008. Using SPOT images and field sampling to map burn severity and vegetation factors affecting post forest fire erosion risk. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/248379392_Using_SPOT_images_and_field_sampling_to_map_burn_severity_and_vegetation_factors_affecting_post_forest_fire_erosion_risk> [Accessed 15 December 2022].

Franks, S., Masek, J. and Turner, M., 2017. Monitoring forest regrowth following large scale fire using satellite data-A case study of Yellowstone National Park, USA. [ebook] Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5721/EuJRS20134632> [Accessed 25 January 2022].

Fria.gr. 2022. Η Σχέση Δασικών Καυσίμων και Πυρκαγιών. [online] Available at: <http://www.fria.gr/mmfria/index.php?id=100&catid=41&lan=GR&tl=CATEGORYID> [Accessed 23 October 2022].

G. Masek, J.,F. Shannon, G. Turner, M., 2017. Monitoring forest regrowth following large scale fire using satellite data-A case study of Yellowstone National Park, USA. [ebook] Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.5721/EuJRS20134632> [Accessed 23 November 2022].

Gai, C., Weng, W. and Yuan, H., 2011. GIS-Based Forest Fire Risk Assessment and Mapping. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/224248567_GIS-Based_Forest_Fire_Risk_Assessment_and_Mapping> [Accessed 30 October 2022].

Gaitanis, A., Kalogeropoulos, K., Detsis, V. and Chalkias, C., 2015. Monitoring 60 Years of Land Cover Change in the Marathon Area, Greece. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2073-445X/4/2/337> [Accessed 21 December 2022].

Ganteaume, A., Barbero, R., Jappiot, M. and Maillé, E., 2021. *Understanding future changes to fires in southern Europe and their impacts on the wildland-urban interface*. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666449621000013> [Accessed 29 January 2022].

Ganteaume, A., Camia, A., Jappiot, M., SanMiguel-Ayanz, J., Long-Fournel, M. and Lampin, C., 2013. *A ReviewoftheMainDrivingFactorsofForestFire Ignition OverEurope*. [ebook] Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23086400/> [Accessed 28 January 2022].

Gibsona, R., Danahera, T., Hehir, W. and Collins, L., 2020. *A remote sensing approach to mapping fire severity in south-eastern Australia using sentinel 2 and random forest*. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425720300717> [Accessed 29 January 2022].

Gülçina, D. and Deniza, B., 2022. *Remote sensing and GIS-based forest fire risk zone mapping: The case of Manisa, Turkey*. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/340209726_Remote_sensing_and_GIS-based_forest_fire_risk_zone_mapping_The_case_of_Manisa_Turkey> [Accessed 6 June 2022].

Hafedh Hamza, M. and Chmit, M., 2022. *GIS-Based Planning and Web/3D Web GIS Applications for the Analysis and Management of MV/LV Electrical Networks (A Case Study in Tunisia)*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/5/2554> [Accessed 25 June 2022].

Hernández, L., 2019. The Mediterranean burns. [ebook] Available at: <http://awsassets.panda.org/downloads/wwf__the_mediterranean_burns_2019_eng_final.pdf > [Accessed 29 January 2022].

Hussain Shah, F., Ali, A. and Iqbal, M., 2020. *A review on hazard risk assessment using remote sensing and GIS*. [ebook] Available at: <https://www.cas-press.com/article_122583_3905cdd78d24e3baff7efafe082b36b6.pdf> [Accessed 6 June 2022].

Ireland, G. and P. Petropoulos, G., 2015. Exploring the relationships between post-fire vegetation regeneration dynamics, topography and burn severity: A case study from the Montane Cordillera

Ecozones of Western Canada. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/270107975_Exploring_the_Relationships_Between_Post-fire_Vegetation_Regeneration_Dynamics_Topography_and_Burn_Severity_A_case_study_from_the_Montane_Cordillera_Ecozones_of_Western_Canada> [Accessed 8 December 2022].

Ireland, G., 2013. Assessing Post-fire Vegetation Regeneration Dynamics Following the 2003 Okanagan Mountain Park Wildfires Using Multi-temporal Landsat TM Imagery.

James Ireland, G., 2013. *Assessing Post-fire Vegetation Regeneration Dynamics Following the 2003 Okanagan Mountain Park Wildfires Using Multi-temporal Landsat TM Imagery*.

Kalabokidis, K., Athanasis, N., Gagliardi, F., Karayiannis, F., Parastatidis, S., Palaiologou, P. and Vasilakos, C., 2013. *Virtual Fire: A web-based GIS platform for forest fire control*. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1574954113000332> [Accessed 1 February 2022].

Karamesouti, M., P. Petropoulos, G., D. Papanikolaou, I., Kairis, O. and Kosmas, K., 2016. Erosion rate predictions from PESERA and RUSLE at a Mediterranean site before and after a wildfire: Comparison & implications. [ebook] Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0016706115300112?token=D8463B42BF460B2A4AAFC0A777B3C1D9AF7B89FFD25CB1FBCA3F11D502C930A7F4EDFFFD8500F8EAB75FD52E37113329&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220123175448> [Accessed 11 December 2022].

Kim, Y., Jeong, M., Youm, M., Kim, J. and Kim, J., 2021. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/350068447_Recovery_of_Forest_Vegetation_in_a_Burnt_Area_in_the_Republic_of_Korea_A_Perspective_Based_on_Sentinel-2_Data> [Accessed 22 December 2022].

Kim, Y., Jeong, M., Youm, M., Kim, J. and Kim, J., 2021. *Recovery of Forest Vegetation in a Burnt Area in the Republic of Korea: A Perspective Based on Sentinel-2 Data*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/6/2570> [Accessed 31 January 2022].

Libertà D., de Rigo, G., Houston, Durrant, T, Artes Vivancos, T, San-Miguel-Ayanz, J 2017. *Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty*. [ebook]

Available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC108974> [Accessed 6 February 2022].

Lourenço, L., Sousa, A., Nunes, A. and Meira Castro, A., 2020. *Mapping the Causes of Forest Fires in Portugal by Clustering Analysis*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3263/10/2/53> [Accessed 28 January 2022].

M. Meneses, B., 2021. *Vegetation Recovery Patterns in Burned Areas Assessed with Landsat 8 OLI Imagery and Environmental Biophysical Data*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2571-6255/4/4/76> [Accessed 13 June 2022].

Mallinis, G., Koutsias, N. and Arianoutsou, M., 2014. Monitoring land use/land cover transformations from 1945 to 2007 in two peri-urban mountainous areas of Athens metropolitan area, Greece. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/262610093_Monitoring_land_useland_cover_transformations_from_1945_to_2007_in_two_peri-urban_mountainous_areas_of_Athens_metropolitan_area_Greece> [Accessed 9 December 2022].

Mangiameli, M., Mussumeci, G. and Cappello, A., 2021. *Forest Fire Spreading Using Free and Open-Source GIS Technologies*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2673-7418/1/1/5> [Accessed 25 June 2022].

Moore, P., 2005. Forest Landscape Restoration After Fires. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/226402131_Forest_Landscape_Restoration_After_Fires> [Accessed 22 January 2022].

Morresi, D., Vitali, A., Urbinati, C. and Garbarino, M., 2019. Forest Spectral Recovery and Regeneration Dynamics in Stand-Replacing Wildfires of Central Apennines Derived from Landsat Time Series. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/3/308> [Accessed 29 November 2022].

Moya, D., González-De Vega, S., Lozano, E., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Lucas-Borja, M. and de las Heras, J., 2019. *The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of Pinus halepensis Mill. stands in the short and midterms after wildfire*. [ebook] Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719300295> [Accessed 13 June 2022].

Moyaa, D., González-De Vega, S., Lozano, E., García-Orenes, F., Mataix-Solera, J., Lucas-Borja, M. and de las Herasa, J., 2019. *The burn severity and plant recovery relationship affect the biological and chemical soil properties of Pinus halepensis Mill. stands in the short and midterms after wildfire*. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479719300295> [Accessed 19 May 2022].

O. Soverel, N., D.B. Perrakis, D. and C. Coops, N., 2010. *Estimating burn severity from Landsat dNBR and RdNBR indices across western Canada*. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425710001100> [Accessed 29 May 2022].

P Petropoulos, G., Prasad Vadrevu, K., Xanthopoulos, G., Karantounias, G. and Scholze, M., 2011. A comparison of Spectral Angle Mapper and Artificial Neural Network classifiers combined with Landsat TM imagery analysis for obtaining burnt area mapping. [ebook] Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22294909/> [Accessed 12 December 2022].

P. Petropoulos, G., Kontoes, C. and Keramitsoglou, I., 2010. Burnt area delineation from a uni-temporal perspective based on Landsat TM imagery classification using Support Vector Machines. [ebook] Available at: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0303243410000784?token=F43CC8F2AFC4E560A10CF00D59D00019F5BD1BE7F605746238E4C0301CB5E634402809AAF6F0D71F4688D3A998A17624&originRegion=eu-west-1&originCreation=20220123155752> [Accessed 28 November 2022].

P. Petropoulos, G., M. Griffiths, H. and P. Kalivas, D., 2014. Quantifying spatial and temporal vegetation recovery dynamics following a wildfire event in a Mediterranean landscape using EO data and GIS. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/261183988_Quantifying_Spatial_and_Temporal_Vegetation_Recovery_Dynamics_Following_a_Wildfire_Event_in_a_Mediterranean_Landscape_using_EO_Data_and_GIS> [Accessed 19 October 2022].

P. Petropoulos, G., P. Kalivas, D., Karpouzas, S., K. Srivastava, P., Louka, P., Stathopoulos, N., Kalogeropoulos, K. and Fragou, 2020. Quantifying Land Cover Changes in a Mediterranean Environment Using Landsat TM and Support Vector Machines. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/7/750> [Accessed 10 December 2022].

Palaiologou, P., A. Ager, A., Nielsen-Pincus, M., R. Evers, C. and KalabokidisD, K., 2018. *Using transboundary wildfire exposure assessments to improve fire management programs: a case study in Greece*. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/326550370_Using_transboundary_wildfire_exposure_assessments_to_improve_fire_management_programs_A_case_study_in_Greece> [Accessed 6 February 2022].

Palaiologou, P., Kalabokidis, K., A. Day, M. and Kopsachilis, V., 2020. *Evaluating Socioecological Wildfire Effects in Greece with a Novel Numerical Index*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2571-6255/3/4/63> [Accessed 5 February 2022].

Palaiologou, P., Kalabokidis, K., A. Day, M. and Kopsachilis, V., 2020. *Evaluating Socioecological Wildfire Effects in Greece with a Novel Numerical Index*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2571-6255/3/4/63> [Accessed 5 February 2022].

Palaiologou, P., Kalabokidis, K., Troumbis, A., A. Day, M., Nielsen-Pincus, M. and A. Ager, A., 2021. *Socio-Ecological Perceptions ofWildfire Management and Effects in Greece*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2571-6255/4/2/18> [Accessed 5 February 2022].

Pérez-Cabello, F., Montorio, R. and Borini Alves, D., 2021. Remote sensing techniques to assess post-fire vegetation recovery. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/350237322_Remote_Sensing_Techniques_to_assess_Post-Fire_Vegetation_Recovery> [Accessed 29 January 2022].

Pérez-Cabello, F., Montorio, R. and Borini Alves, D., 2021. *Remote sensing techniques to assess post-fire vegetation recovery*. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/350237322_Remote_Sensing_Techniques_to_assess_Post-Fire_Vegetation_Recovery> [Accessed 29 January 2022].

Petropoulos, G., Kontoes, C. and Keramitsoglou, I., 2011. Burnt area delineation from a uni-temporal perspective based on Landsat TM imagery classification using Support Vector Machines. [ebook] Available at:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243410000784> [Accessed 29 January 2022].

Polychronaki, A. and Z. Gitas, I., 2012. Burned Area Mapping in Greece Using SPOT-4 HRVIR Images and Object-Based Image Analysis. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/4/2/424> [Accessed 16 October 2022].

Qarallah, B., Al-Ajlouni, M., Al-Awasi, A., Alkarmy, M., Al-Qudah, E., Bani Naser, A., Al-Assaf, A., Gevaert, C., Al Asmar, Y., Belgiu, M. and Othman, Y., 2021. *Evaluating post-fire recovery of Latroon dry forest using Landsat ETM+, unmanned aerial vehicle and field survey data*. [ebook] Available at: <https://research.utwente.nl/en/publications/evaluating-post-fire-recovery-of-latroon-dry-forest-using-landsat> [Accessed 29 January 2022].

Quintano, C., Fernández-Manso, A., Calvo, L., Marcos, E. and Valbuena, L., 2014. *Land surface temperature as potential indicator of burn severity in forest Mediterranean ecosystems*. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243414002384> [Accessed 29 May 2022].

Riaño, D., Chuvieco, E., Salas, J. and Aguado, I., 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat-TM data for mapping vegetation types (2003). [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/3203171_Assessment_of_different_topographic_corrections_in_Landsat-TM_data_for_mapping_vegetation_types_2003> [Accessed 20 December 2022].

Sandamali, J. and Chathuranga, M., 2021. *Quantification of Burned Severity of the Forest Fire using Sentinel-2 Remote Sensing Images: A Case Study in the Ella Sri Lanka*. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/354687310_Quantification_of_Burned_Severity_of_the_Forest_Fire_using_Sentinel-2_Remote_Sensing_Images_A_Case_Study_in_the_Ella_Sri_Lanka> [Accessed 17 May 2022].

San-Miguel-Ayanz, J., n.d. Comprehensive Monitoring of Wildfires in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS). [ebook] Available at: <https://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/InTech.pdf> [Accessed 19 October 2022].

San-Miguel-Ayanz, J., Rodrigues, M., Santos de Oliveira, S., Kemper Pacheco, C., Moreira, F., Duguy, B. and Camia, A., 2012. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/258241140_Land_Cover_Change_and_Fire_Regime_in_the_European_Mediterranean_Region> [Accessed 2 December 2022].

Sobrino, J., Llorens, R., Fernández, C., M. Fernández-Alonso, J. and Vega, J., 2019. Relationship between Soil Burn Severity in Forest Fires Measured In Situ and through Spectral Indices of Remote Detection. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/1999-4907/10/5/457> [Accessed 18 September 2022].

Szpakowski, D. and Jensen, J., 2019. *A Review of the Applications of Remote Sensing in Fire Ecology*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/22/2638> [Accessed 28 January 2022].

Teodoro, A. and Amaral, A., 2019. *A Statistical and Spatial Analysis of Portuguese Forest Fires in Summer 2016 Considering Landsat 8 and Sentinel 2A Data*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3298/6/3/36> [Accessed 30 January 2022].

Trouve, R., Sherriff, R., Holt, L. and Baker, P., 2021. *Differing regeneration patterns after catastrophic fire and clearfelling: Implications for future stand dynamics and forest management*. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112721006459> [Accessed 21 May 2022].

Twele, A. and Barbosa, P., 2004. Monitoring vegetation regeneration after forest fires using satellite imagery. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/231338244_Monitoring_vegetation_regeneration_after_forest_fires_using_satellite_imagery> [Accessed 22 October 2022].

Vega, J., Fern´andez-Alonso, J., Fern´andez, C., Sobrino, J. and Llorens, R., 2021. A methodology to estimate forest fires burned areas and burn severity degrees using Sentinel-2 data. Application to the October 2017 fires in the Iberian Peninsula. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243420308862> [Accessed 29 January 2022].

Veraverbeke, S., Dennison, P., Gitas, I., Hulley, G., Kalashnikova, O., Katagis, T., Kuai, L., Men, R., Roberts, D. and Stavros, N., 2018. *Hyperspectral remote sensing of fire: State-of-the-art and*

future perspectives. [ebook] Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425718302980> [Accessed 27 January 2022].

Veraverbeke, S., Somers, B., Gitas, I., Katagis, T., Polychronaki, A. and Goossens, R., 2012. *Spectral mixture analysis to assess post-fire vegetation regeneration using Landsat Thematic Mapper imagery: Accounting for soil brightness variation*. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/220492043_Spectral_mixture_analysis_to_assess_post fire_vegetation_regeneration_using_Landsat_Thematic_Mapper_imagery_Accounting_for_soil_brightness_variation> [Accessed 29 January 2022].

Viana-Soto, A., Aguado, I. and Martínez, S., 2017. Assessment of Post-Fire Vegetation Recovery Using Fire Severity and Geographical Data in the Mediterranean Region (Spain). [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/321757469_Assessment_of_Post-Fire_Vegetation_Recovery_Using_Fire_Severity_and_Geographical_Data_in_the_Mediterranean_Region_Spain> [Accessed 19 November 2022].

Viana-Soto, A., Aguado, I. and Martínez, S., 2017. *Assessment of Post-Fire Vegetation Recovery Using Fire Severity and Geographical Data in the Mediterranean Region (Spain)*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2076-3298/4/4/90> [Accessed 29 May 2022].

Viana-Soto, A., Aguado, I., Salas, J. and García, M., 2020. Identifying Post-Fire Recovery Trajectories and Driving Factors Using Landsat Time Series in Fire-Prone Mediterranean Pine Forests. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/9/1499> [Accessed 6 December 2022].

Vigna, I., Besana, A., Comino, E. and Pezzoli, A., 2021. *Application of the Socio-Ecological System Framework to Forest Fire Risk Management: A Systematic Literature Review*. [ebook] Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2121> [Accessed 5 February 2022].

VKirdyanov, A., Saurer, M., Siegwolf, R., A Knorre, A., S Prokushkin, A., V Churakova (Sidorova), O., V Fonti, M. and Büntgen, U., 2020. *Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia*. [ebook] Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab7469> [Accessed 19 May 2022].

Yves Birot, 2009. Η Ζωή Μας με τις Δασικές Πυρκαγιές: Η Άποψη της Επιστήμης. [ebook] Available at: <https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/efi_dp15_gre_net.pdf> [Accessed 7 November 2022].

Zhenga, Z., Zenga, Y., Lic, S. and Huangc, W., 2015. *A new burn severity index based on land surface temperature andenhanced vegetation index*. [ebook] Available at: <https://www.researchgate.net/publication/284246593_A_new_burn_severity_index_based_on_land_surface_temperature_and_enhanced_vegetation_index> [Accessed 31 January 2022].

ΕΛΛΗΝΟΓΛΩΣΣΗ

2017. Οικολογικός απολογισμός της καταστροφικής πυρκαγιάς του Ιουνίου 2007 στην Πάρνηθα. [ebook] Available at: <http://politics.wwf.gr/images/stories/fireparnisreport2007_14.pdf> [Accessed 30 November 2022].

dasarxeio.com. 2017. Πάρνηθα 2007-2017: 10 χρόνια μετά τη μεγάλη πυρκαγιά. [online] Available at: <https://dasarxeio.com/2017/06/28/45938/> [Accessed 4 December 2022].

Sinkevičius, V. and Gabriel, M., 2021. *Πρόληψη των ανεξέλεγκτων πυρκαγιών βάσει χερσαίων λύσεων Αρχές και διδάγματα από τη διαχείριση των τοπίων και των δασικών εκτάσεων με σκοπό την ασφάλεια και την ανθεκτικότητα στην Ευρώπη*. [ebook] Available at: <https://ec.europa.eu/environment/system/files/2021-03/SR45_broch_EL_v6.0_signed.pdf> [Accessed 6 February 2022].

Α. Τάτσινας, Γ., 2017. Χρήση Δορυφορικών Δεδομένων στη μελέτη καταστροφικών φαινομένων. Η περίπτωση των πυρκαγιών.. [ebook] Available at: <http://ikee.lib.auth.gr/record/295157?ln=el> [Accessed 23 November 2022].

Βαλλάτου, Μ., 2016. Χωρική ανάλυση του κινδύνου και των αναμενόμενων απωλειών των οικοτόπων από δασικές πυρκαγιές στο νησί της Κεφαλονιάς.

Γ. Περάκης, Κ., Ν. Φαρασλής, Ι. and Κ. Μωυσιάδης, Α., 2015. Η Τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες. [ebook] Available at: <https://repository.kallipos.gr › 164-Perakis_29-1-16> [Accessed 23 October 2022].

Η συμβολή της δορυφορικής τηλεπισκόπησης στη χαρτογράφηση των δασικών πυρκαγιών. [ebook] Available at: <http://www.nagref.gr/images/ioanna/periodiko/Teyxos_28/12-13_DORIFORIKH_EPISKOPHSH.PDF> [Accessed 23 November 2022].

Ηλιοπούλου, Π., 2015. *Κεφάλαιο 5 Ανάλυση Συσχέτισης - Παλινδρόμησης*. [ebook] Available at: *<https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2064/2/02_chapter_05-Iliopoulou_%CE%91%CE%9D%CE%91%CE%98%CE%95%CE%A9%CE%A1%CE%97%CE%A3%CE%97.pdf>* [Accessed 29 May 2022].

Καλλίρης, Π. 2017,. Η αποκατάσταση-αναβλάστηση των καμένων εκτάσεων-Μύθος και πραγματικότητα. [ebook] Available at:

<http://www.fria.gr/ApokatastasiKamenwnEktasewn_PraktikaSYnedriou/Kalliris.pdf> [Accessed 23 November 2022].

ΚΑΤΑΓΗΣ, Θ., 2017. *ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΚΑΜΕΝΩΝ ΕΚΤΑΣΕΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΩΝ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ*. [ebook] Available at: <https://ikee.lib.auth.gr/record/288093/files/GRI-2017-18746.pdf> [Accessed 6 February 2022].

Μ. ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ, Γ., 2011. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΜΕΝΩΝ ΕΚΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ. [ebook] Available at: <http://file:///C:/Users/USER/Downloads/Athanasiou_G.pdf> [Accessed 17 October 2022].

Χ. Παπαγεωργίου, Α., Καρέτσος,, Γ. and Κατσαδωράκης, Γ., 2012. Το Δάσος Μια Ολοκληρωμένη Προσέγγιση. [ebook] Available at: <https://www.contentarchive.wwf.gr/images/pdfs/to-dasos_mia-oloklirromeni-proseggisi.pdf> [Accessed 20 October 2022]