



# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
(Δ.Π.Μ.Σ.) "ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ"

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΜΕ ΣΚΟΠΟ ΤΗ  
ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΧΑΡΤΗ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΠΥΡΚΑΓΙΑΣ

**Φανδρίδη Χριστίνη**

Μεταπτυχιακή Εργασία η οποία υποβάλλεται  
για μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων  
για το Διεπιστημονικό – Διατμηματικό  
Δίπλωμα Ειδίκευσης  
του Δ.Π.Μ.Σ. του ΕΜΠ  
«Περιβάλλον και Ανάπτυξη»

Αθήνα, Οκτώβριος 2020

Επιβλέπων: Καθηγητής Δ. Αργιαλάς

**Περιβάλλον  
και  
Ανάπτυξη**



## Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία ανατέθηκε από το Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης του Τομέα Τοπογραφίας. Εκπονήθηκε μέσα στο πλαίσιο των προβλεπόμενων εκπαιδευτικών διαδικασιών που αφορούν στους μεταπτυχιακούς σπουδαστές του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών (ΔΠΜΣ) του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου "Περιβάλλον και Ανάπτυξη".

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιών για μια περιοχή μελέτης μέσω ανάλυσης τηλεπισκοπικών και χαρτογραφικών δεδομένων. Για την υλοποίηση της εργασίας αυτής, θα εξεταστούν οι υφιστάμενοι δείκτες πρόβλεψης πυρκαγιάς, θα επιλεγθούν οι πιο κατάλληλοι για την περιοχή μελέτης και θα δημιουργηθούν οι αντίστοιχοι θεματικοί χάρτες. Στη συνέχεια θα αξιολογηθούν, θα διαπιστωθούν τυχόν αδυναμίες εφαρμογής τους και θα προταθούν λύσεις για την περιοχή μελέτης.

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Κύριο Αργιαλά Δημήτριο, Καθηγητή ΕΜΠ του Τμήματος Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών στον Τομέα Τοπογραφίας και Διευθυντή του Εργαστηρίου Τηλεπισκόπησης, για την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για τη συστηματική καθοδήγηση που μου παρείχε και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε μέσω των παραδόσεων των μαθημάτων «Μέθοδοι και Τεχνικές Παρατήρησης και Παρακολούθησης του Περιβάλλοντος» και «Προχωρημένες Μέθοδοι Ψηφιακής Τηλεπισκόπησης».

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. Πολυχρόνη Κολοκούση, για την πολύτιμη συνδρομή και στήριξή του, καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας, για την υπομονή του και την εμπιστοσύνη του.

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκαν διάφοροι δείκτες επικινδυνότητας πυρκαγιάς και αξιολογήθηκαν για την περιοχή του Ν. Χανίων μέσω ανάλυσης τηλεπισκοπικών και χαρτογραφικών δεδομένων. Σκοπός ήταν η δημιουργία ενός χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιάς για την περιοχή μελέτης, ο οποίος μέσω της συχνής ενημέρωσης, θα μπορούσε να βοηθήσει στην πρόληψη και στην έγκαιρη αντιμετώπιση μιας φυσικής καταστροφής.

Από την επισκόπηση των υπαρχόντων δεικτών εκτίμησης επικινδυνότητας έναρξης δασικών πυρκαγιών, διαπιστώνουμε ότι πρόκειται για ένα πολύ-παραγοντικό πρόβλημα στο οποίο δίνεται ποικιλία απαντήσεων. Οι δείκτες πρόγνωσης πυρκαγιάς χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τους δείκτες υγρασίας καυσίμου, που έχουν ως μεταβλητές εισόδου τους μετεωρολογικούς παράγοντες της περιοχής, και τους τοπογραφικούς δείκτες πρόβλεψης, οι οποίοι λαμβάνουν ως μεταβλητές εισόδου τα τοπογραφικά στοιχεία της περιοχής ενώ κάποιοι συνυπολογίζουν και την επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα. Για όλους τους δείκτες που μελετήθηκαν, η επιλογή των μεταβλητών και η στάθμιση τους με σκοπό τη δημιουργία ενός δείκτη επικινδυνότητας βασίστηκε στα διαθέσιμα ιστορικά στατιστικά στοιχεία. Οι δείκτες παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους που οφείλονται στις μεταβλητές που ο καθένας περιέχει και στο κλίμα της περιοχής για την οποία έχει σχεδιαστεί.

Στη συνέχεια, έγινε αξιολόγηση των δεικτών με βασικό κριτήριο την καταλληλότητα τους για την περιοχή μελέτης και υλοποιήθηκαν εκείνοι για τους οποίους ήταν διαθέσιμες οι τιμές μεταβλητών τους. Αφού αποτυπώθηκαν σε θεματικούς χάρτες, ακολούθησε η αξιολόγηση τους με βάση τα ιστορικά δεδομένα των πυρκαγιών για την περιοχή μελέτης.

Σε όλους τους χάρτες επικινδυνότητας που υλοποιήθηκαν, οι καμένες εκτάσεις περιλαμβάνονταν σε περιοχές πολύ χαμηλής επικινδυνότητας. Οπότε κρίθηκε ότι δεν ήταν κατάλληλοι για την πρόβλεψη πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης.

Για αυτόν το λόγο έγινε μια προσπάθεια να δημιουργηθεί ένα καινούργιο μοντέλο επικινδυνότητας, το οποίο να προβλέπει με ακρίβεια τις πιθανές περιοχές εκδήλωσης πυρκαγιάς στον Νομό Χανίων. Από την ανάλυση των ιστορικών δεδομένων για τις πυρκαγιές στην περιοχή μελέτης, προέκυψε ότι στην πλειοψηφία τους αυτές εκδηλώνονται σε βοσκότοπους ή κοντά σε δρόμο καθώς και ότι οι βοσκότοποι που βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από το κεντρικό οδικό δίκτυο δεν έχουν ιστορικό πυρκαγιάς. Με βάση αυτή την ανάλυση δημιουργήθηκε ένα νέος δείκτης επικινδυνότητας που επαληθεύεται από τις θέσεις των καμένων εκτάσεων και ο οποίος θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την πρόβλεψη και την έγκαιρη αντιμετώπιση μελλοντικών πυρκαγιών.

Τα τηλεσκοπικοσκοπικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή την εργασία είναι απεικονίσεις του δορυφορικού συστήματος Landsat 8 OLI/TIRS. Στα χαρτογραφικά δεδομένα περιλαμβάνονται οι χρήσεις γης του Corine Land Cover 2018, το DEM αρχείο με την απεικόνιση του υψομέτρου της επιφάνειας της περιοχής μελέτης, με βάση το οποίο υπολογίστηκαν οι τοπογραφικές μεταβλητές του προσανατολισμού και της κλίσης καθώς και οι θεματικοί χάρτες των δρόμων και των οικισμών. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν online δεδομένα από τον WMS server

του Ευρωπαϊκού Πληροφοριακού Συστήματος Δασικών Πυρκαγιών. Η επεξεργασία τους έγινε με το λογισμικό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών Ανοικτού Κώδικα QGIS.

**Λέξεις κλειδιά:**

μοντέλο πρόβλεψης πυρκαγιάς, ψηφιακή τηλεπισκόπηση, δασικές πυρκαγιές, δείκτες βλάστησης, δείκτες κινδύνου πυρκαγιάς, δείκτες υγρασίας καυσίμου, τοπογραφικοί δείκτες

## Abstract

In the current thesis, various fire risk indicators were studied and evaluated for the area of Chania through the analysis of remote sensing data. The scope was to find the optimal forest fire risk map for the study area, which if updated frequently, could help address this natural disaster. Following the analysis of the fire danger indices, it is obvious that the prognosis of forest fires is a multi-factorial problem to which a variety of answers have been given. The fire danger indices are divided in two main categories, the forest fuel indices, and the topographic indices. The first type combine meteorological factors while the second one is implemented with topographic data such as elevation, slope, etc. All indices were based on the available local historical statistics and that is the reason why they differ so much.

As a next step, the indices were evaluated for their suitability for the selected area. Only the indices that were well defined were calculated and evaluated. For this process, each index was represented in the form of a fire risk map. Unfortunately, all the risk maps represented the burned areas as very low risk areas. Thus, they cannot be used to predict fire risk in the Chania region.

For this reason, it was deemed necessary to create and implement a new fire risk model for the study area, which predicts with accuracy the possible areas of fire ignition. From the analysis of the fire history data for the study area, it was observed that the majority of wildland fires occurred either on permanent pasture land or close to the main road network. Also, no fire record was found for pasture areas that were in great distance from the national highway. Based on the above observations, a new risk index was invented that is verified by the historical data and can be used to predict future fires.

In this model, land images of the Landsat 8 OLI / TIRS satellite system were used in combination with the digital elevation model (D.E.M.) and Corine Land Cover data. Also, online data from the WMS server of the European Forest Fire Information System were used. All layers were processed with the QGIS Open Source Geographic Information Systems software.

### **Key words:**

digital remote sensing, forest fires, wildfire risk index, forest fire risk index, fire danger index, fuel moisture index, fire risk topographic index

## Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	1
Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract .....	5
Κατάλογος εικόνων .....	9
Κατάλογος πινάκων.....	12
Κατάλογος χαρτών .....	14
1.Εισαγωγή.....	15
Σκοπός εργασίας .....	17
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	18
Δασικές πυρκαγιές .....	18
Το τρίγωνο της φωτιάς.....	18
Είδη δασικών πυρκαγιών .....	19
Ανατομία πυρκαγιάς .....	20
Αίτια των δασικών πυρκαγιών .....	21
Παράγοντες που επιδρούν στις δασικές πυρκαγιές .....	24
Δασοπροστασία .....	32
Δορυφορική τηλεπισκόπηση .....	38
Γενικά.....	38
Τηλεπισκόπηση και αντιμετώπιση πυρκαγιών .....	40
Εικόνες Landsat 8 OLI/TIRS.....	42
Φασματικές ιδιότητες των επιφανειών .....	42
Συνδυασμός φασματικών καναλιών.....	43
Φασματικοί λόγοι.....	44
Ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων .....	44
Το λογισμικό QGIS.....	45
Το λογισμικό SAGA.....	45
Το πρόγραμμα Corine Land Cover 2018 .....	46
Δείκτες βλάστησης .....	48
Κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (NDVI).....	48
Κανονικοποιημένος δείκτης υγρασίας (NDMI).....	50
Forest Canopy Density Model .....	51



Vegetation Index (VI).....	53
Bare Soil Index (BI).....	53
Shadow Index (SI) .....	54
Scaled shadow index (SSI) .....	54
Thermal Index (TI) .....	54
Vegetation Cover Density (VD).....	55
Δείκτες κινδύνου πυρκαγιάς.....	57
Δείκτες υγρασίας καυσίμου και αξιολόγηση κινδύνου πυρκαγιάς.....	58
Επιλογή κατάλληλου μοντέλου εφαρμογής υγρασίας καυσίμου .....	77
Τοπογραφικοί δείκτες και αξιολόγηση κινδύνου πυρκαγιάς.....	79
3. Μεθοδολογία και υλοποίηση .....	82
Περιοχή μελέτης.....	82
Δασικές πυρκαγιές του Νομού Χανίων.....	87
Υπολογισμός δεικτών βλάστησης .....	98
Υπολογισμός δείκτη βλάστησης NDVI .....	98
Υπολογισμός δείκτη υγρασίας βλάστησης NDMI .....	99
Υπολογισμός Forest Canopy Index.....	101
Υπολογισμός Vegetation Density Index .....	101
Υπολογισμός Bare Soil Index.....	103
Υπολογισμός SSI .....	104
Υπολογισμός Vegetation Cover Density.....	104
Υπολογισμός δείκτη Forest Canopy Density .....	105
Παρουσίαση δεικτών υγρασίας καυσίμου .....	107
Παρουσίαση δείκτη Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) .....	107
Παρουσίαση δείκτη Keetch-Byram Drought Index (KBDI).....	110
Παρουσίαση δείκτη Baumgartner Index (BI) .....	112
Παρουσίαση δείκτη Fire Danger Index (FDI).....	114
Υπολογισμός τοπογραφικών δεικτών επικινδυνότητας .....	116
Υπολογισμός δείκτη TDI .....	116
Υπολογισμός δείκτη Fire Risk (FR).....	120
Υπολογισμός δείκτη Risk Index .....	123
Υπολογισμός δείκτη Cumulative Fire Risk Index (CFRISK).....	124
Αξιολόγηση του κινδύνου πυρκαγιάς με βάση τις χρήσεις γης.....	126

Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των δεικτών με βάση τις πυρκαγιές της εικοσαετίας 2000 - 2019.....	130
Προτεινόμενος χάρτης επικινδυνότητας για το Ν. Χανίων.....	137
Συμπεράσματα.....	142
Προοπτικές.....	143
Αναφορές.....	144

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1 Καμένη δασική έκταση.....	16
Εικόνα 2 Το τρίγωνο της φωτιάς (Wikipedia, 2019).....	18
Εικόνα 3 Πυρκαγιές επιφάνειας, εδάφους και κόμης (Griffith, 2004) .....	20
Εικόνα 4 Ανατομία πυρκαγιάς .....	21
Εικόνα 5 Πυρκαγιά από κεραυνό.....	21
Εικόνα 6 Φωτιά από καύση απορριμμάτων .....	22
Εικόνα 8 Φωτιά από τσιγάρο .....	22
Εικόνα 7 Φωτιά από εμπρησμό .....	22
Εικόνα 9 Φωτιά από σιδηρόδρομο .....	23
Εικόνα 10 Φωτιά από κατασκήνωση .....	23
Εικόνα 11 Βλάβη ηλεκτρικού δικτύου .....	23
Εικόνα 12 Αυτανάφλεξη σε σκουπιδότοπο .....	24
Εικόνα 13 Θερμοκρασία εδάφους (Auburn University at Montgomery, 2004) .....	25
Εικόνα 14 Η ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα στη διάρκεια μιας κανονικής ημέρας και μιας μέρας με σύννεφα (διακεκομμένη) (Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών). .....	25
Εικόνα 15: Σχέση θερμοκρασίας και ειδικής υγρασίας (Βορίσης, Δασικές Πυρκαγιές, 2012).....	26
Εικόνα 16 Σταθερότητα της ατμόσφαιρας (Auburn University at Montgomery, 2004).....	27
Εικόνα 17 Επίδραση στην ταχύτητα της φωτιάς της κλίσης του εδάφους στη φορά του ανέμου (Country Fire Authority, n.d.) .....	28
Εικόνα 18 Επίδραση της κλίσης εδάφους σε συνδυασμό με τον άνεμο, στην εξάπλωση της πυρκαγιάς (Aatmesh, 2016).....	29
Εικόνα 19 Τυπικές συνθήκες δημιουργίας λίβα (Φλόκας, 1986) .....	30
Εικόνα 20 Φαινόμενο καμινάδας (Combe, 2015).....	31
Εικόνα 21 Αντιπυρική ζώνη (Kairis, 2011).....	33
Εικόνα 22 Εναέριο μέσο κατάσβεσης .....	35
Εικόνα 23 Εναέριο μέσο κατάσβεσης και πεζοπόρο τμήμα ΠΣ.....	35
Εικόνα 24 Καμένη δασική έκταση.....	36
Εικόνα 25 Καμένο σπίτι.....	37
Εικόνα 26 Καμένη έκταση κοντά σε οικισμό.....	37
Εικόνα 27 Καμένη έκταση δίπλα σε δρόμο.....	37
Εικόνα 28 Μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας (Μητράκα, 2011).....	38
Εικόνα 29 Ψηφιακή τηλεπισκόπηση με χρήση δορυφόρων (NASA, 2019) .....	39
Εικόνα 30 Παρακολούθηση του κύκλου της φωτιάς (San-Miguel-Ayanz, 2012) .....	41
Εικόνα 31 Έγχρωμη σύνθετη απεικόνιση της πυρκαγιάς του Άσπεν από το δορυφόρο Quickbird της 1ης του Ιουλίου του 2003 (Michele A. Kuester, 2005) .....	41
Εικόνα 32 Φασματικές υπογραφές εδάφους, βλάστησης και νερού και φασματικά κανάλια Landsat 7 (European Space Agency, 2014). .....	43
Εικόνα 33 Αποτύπωση ομοιογενών και ανομοιογενών εικονοστοιχείων (Plaza, Plaza, Valencia, & Paz, 2009) .....	45
Εικόνα 34 Δείκτες βλάστησης με ποσοστό εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (Antognelli, NDVI and NDMI Vegetation Indices: Instuctions for use, 2018) .....	48

Εικόνα 35 Τυπικό φάσμα φωτοσυνθετικής ενεργός ακτινοβολίας PAR, σε σύγκριση με τα φάσματα απορρόφησης για χλωροφύλλη-A, χλωροφύλλη-B και καροτενοειδή (Govindjee, 1995).....	50
Εικόνα 36 Υψηλές τιμές NVDI, υποδηλώνουν πιο υγιή βλάστηση (Makario, 2019) .....	50
Εικόνα 37 Τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων δεικτών ανάλογα την δασική κατάσταση (Jamalabad & Abkar, 2004) .....	52
Εικόνα 38 Διάγραμμα ροής υπολογισμού δείκτη FCD (Pladsrichuay, Suwanwerakamtorn, & Pannucharoenwong, 2018) .....	52
Εικόνα 39 Πυκνότητα βλάστησης εικονοστοιχείου (Rikimaru, Roy, & Miyatake, Tropical forest cover density mapping, 2002) .....	55
Εικόνα 40 Συνδυασμός δεικτών (Rikimaru A. , Concept of FCD Mapping Model and Semi-Expert System, 1999) .....	56
Εικόνα 41 Παράμετροι αξιολόγησης κινδύνου πυρκαγιάς (Auburn University at Montgomery, 2004).....	57
Εικόνα 42 Διάγραμμα υπολογισμού δείκτη FWI (Wagner, 1974) .....	69
Εικόνα 43 Η εξάρτηση του δείκτη ISI από το FFMC και την ταχύτητα του ανέμου (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009) .....	75
Εικόνα 44 Η εξάρτηση του δείκτη BUI από τον DC και τον DMC (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009) .....	75
Εικόνα 45 Η εξάρτηση του δείκτη FWI από τους δείκτες BUI και ISI (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009) .....	76
Εικόνα 46 Ελαφονήσι .....	83
Εικόνα 47 Πάχνες (Xenos, 1999) .....	83
Εικόνα 48 Πόρτες στο φαράγγι πολλές Σαμαριάς .....	84
Εικόνα 49 Το φαράγγι της Σαμαριάς.....	85
Εικόνα 50 Λίμνη Κουρνά .....	86
Εικόνα 51 Υπολογισμός NDVI με Processing Modeller .....	98
Εικόνα 52 Υπολογισμός NDMI.....	100
Εικόνα 53 Διάγραμμα ροής υπολογισμού δείκτη FCD (Pladsrichuay, Suwanwerakamtorn, & Pannucharoenwong, 2018) .....	101
Εικόνα 54 Κανονικοποίηση ζωνών B4 και B5.....	102
Εικόνα 55 Υπολογισμός δείκτη VI .....	102
Εικόνα 56 Δείκτης VI.....	103
Εικόνα 57 Δείκτης BI.....	103
Εικόνα 58 Δείκτης SSI .....	104
Εικόνα 59 Χρήση i.pca για τον υπολογισμό του δείκτη VD .....	104
Εικόνα 60 Δείκτης VD .....	105
Εικόνα 61 Υπολογισμός FCD με χρήση Modeler Processor .....	105
Εικόνα 62 Δείκτης FWI για την ευρύτερη περιοχή της μεσογείου .....	108
Εικόνα 63 Εισαγωγή δείκτη FWI ως WMS layer.....	109
Εικόνα 64 Δείκτης KBDI για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου.....	110
Εικόνα 65 Δείκτης BI στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου .....	112
Εικόνα 66 Τιμές δείκτη FDI για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου .....	114
Εικόνα 67 Δημιουργία Rasters υψομέτρου, προσανατολισμού και κλίσης.....	116

Εικόνα 68 Μηνιαίες τιμές και μέσος όρος αζιμούθιων .....	117
Εικόνα 69 Υπολογισμός δείκτη TDI .....	118
Εικόνα 70 Υπολογισμός TDI με modeler .....	118
Εικόνα 71 Κλάσεις επικινδυνότητας δείκτη FWI από τον wms server του effis.....	119
Εικόνα 72 Band rendering για το TDI raster.....	119

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Μήκη κύματος και χωρική ανάλυση φασματικών καναλιών Landsat 8 (U.S. Geological Survey, 2013).....	42
Πίνακας 2 Συνδυασμοί φασματικών καναλιών .....	44
Πίνακας 3 Ελληνική ονοματολογία Corine Land Cover (Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, 2011).....	47
Πίνακας 4 Κλίμακα δείκτη NDVI (Antognelli, NDVI and NDMI Vegetation Indices: Instructions for use, 2018).....	49
Πίνακας 5 Κλίμακα δείκτη NDMI (Antognelli, NDVI and NDMI Vegetation Indices: Instructions for use, 2018).....	51
Πίνακας 6 Χαρακτηριστικοί συνδυασμοί τεσσάρων δεικτών.....	52
Πίνακας 7 Κλίμακες κινδύνου δείκτη WDI (Patah, Mansor, & Misran, 2006). .....	59
Πίνακας 8 Ταξινόμηση κινδύνου πυρκαγιάς με βάση τον δείκτη NI (Groisman, et al., 2004) .....	60
Πίνακας 9 Τιμές συντελεστή K ανάλογα το επίπεδο της βροχόπτωσης για τον δείκτη Nesterov (Groisman, et al., 2004).....	61
Πίνακας 10 Ταξινόμηση κινδύνου πυρκαγιάς με βάση τον δείκτη MNI (Groisman, et al., 2004).....	61
Πίνακας 11 Τιμές συντελεστή K ανάλογα το επίπεδο της βροχόπτωσης για τον δείκτη Zhdanko (Groisman, et al., 2004).....	62
Πίνακας 12 Κατηγορίες κινδύνου του δείκτη Angstrom (Tošić, et al., 2019). .....	62
Πίνακας 13 Ταξινόμηση επικινδυνότητας πυρκαγιάς για τον Baumgartner Index (Fire Wiki, 2020) .....	63
Πίνακας 14 Τιμές συντελεστή διόρθωσης ανάλογα το επίπεδο βροχόπτωσης για τον Portuguese Index (Fire Wiki, 2020).....	63
Πίνακας 15 Τιμές συντελεστή Ifa ανάλογα την ταχύτητα του ανέμου για τον Portuguese Index (Fire Wiki, 2020) .....	64
Πίνακας 16 Ταξινόμηση επικινδυνότητας για τον δείκτη PI (Fire Wiki, 2020)I .....	64
Πίνακας 17 Γενική περιγραφή των συνθηκών υγρασίας και πιθανότητα εμφάνισης πυρκαγιάς με βάση τις τιμές του δείκτη KBDI (Janis, Johnson, & Forthun, 2002) .....	65
Πίνακας 18 Ταξινόμηση επικινδυνότητας του δείκτη FFDI (Dowdy, Mills, Finklele, & de Groot, 2009).....	65
Πίνακας 19 Χαρακτηριστικά των τριών τύπων καυσίμου (Dowdy, Mills, Finklele, & de Groot, 2009).....	69
Πίνακας 20 Επιλογή μοντέλου υγρασίας καυσίμου .....	78
Πίνακας 21 Επιλογή τοπογραφικού μοντέλου.....	81
Πίνακας 22 Στοιχεία δασικών πυρκαγιών 2000-2019 .....	87
Πίνακας 23 Πυρκαγιές ανά μήνα και ανά έτος.....	91
Πίνακας 24 Μεγάλες πυρκαγιές 2000-2019 .....	93
Πίνακας 25 Μεγάλες πυρκαγιές ανά μήνα .....	93
Πίνακας 26 Καμένη έκταση ανά περιοχή Π.Υ. ανά έτος .....	95
Πίνακας 27 Διαβάθμιση επικινδυνότητας για τον δείκτη FWI (User Guide to EFFIS applications, 2018).....	107
Πίνακας 28 Πληροφορίες EFFIS Layer .....	108
Πίνακας 29 Τιμές αζιμούθιου για τις 15 κάθε μήνα στις 12 το μεσημέρι .....	117
Πίνακας 30 Χρήσεις γης και αντίστοιχο εμβαδόν.....	126

Πίνακας 31 Ταξινόμηση χρήσεων γης με βάση την επικινδυνότητα τους .....	128
Πίνακας 32 Συνδυασμός αποστάσεων από δρόμους και βοσκοτόπους .....	140

## Κατάλογος χαρτών

Χάρτης 1 Γεωγραφία Δήμων Νομού Χανίων .....	82
Χάρτης 2 Χάρτης απεικόνισης ορίων επιχειρησιακής ευθύνης πυροσβεστικών υπηρεσιών, σταθμών και κλιμάκιων .....	94
Χάρτης 3 Χάρτης πυρκαγιών 2000-2019.....	97
Χάρτης 4 Δείκτης βλάστησης NVDI N. Χανίων.....	99
Χάρτης 5 Δείκτης υγρασίας βλάστησης NDMI N. Χανίων.....	100
Χάρτης 6 Δείκτης πυκνότητας βλάστησης FCD N. Χανίων.....	106
Χάρτης 7 Δείκτης επικινδυνότητας υγρασίας καυσίμου FWI.....	109
Χάρτης 8 Χάρτης επικινδυνότητας KBDI .....	111
Χάρτης 9 Χάρτης επικινδυνότητας BI.....	113
Χάρτης 10 Χάρτης επικινδυνότητας FDI.....	115
Χάρτης 11 Τοπογραφικός δείκτης επικινδυνότητας N. Χανίων.....	120
Χάρτης 12 Χάρτης εγγύτητας οικισμών (40μ).....	121
Χάρτης 13 Χάρτης εγγύτητας δρόμων .....	121
Χάρτης 14 δείκτης επικινδυνότητας FR .....	122
Χάρτης 15 Χάρτης επικινδυνότητας RI.....	123
Χάρτης 16 Χάρτης επικινδυνότητας CFRISK.....	124
Χάρτης 17 Χάρτης επικινδυνότητας IR.....	125
Χάρτης 18 Επικινδυνότητα χρήσεων γης N. Χανίων .....	129
Χάρτης 19 Χάρτης επικινδυνότητας FWI και πυρκαγιές.....	130
Χάρτης 20 Χάρτης επικινδυνότητας KBDI και πυρκαγιές .....	131
Χάρτης 21 Χάρτης επικινδυνότητας BI και πυρκαγιές .....	131
Χάρτης 22 Χάρτης επικινδυνότητας FDI και πυρκαγιές.....	132
Χάρτης 23 Χάρτης επικινδυνότητας TDI και πυρκαγιές.....	133
Χάρτης 24 Χάρτης επικινδυνότητας IR και πυρκαγιές .....	134
Χάρτης 25 Χάρτης επικινδυνότητας CFRISK και πυρκαγιές .....	134
Χάρτης 26 Χάρτης επικινδυνότητας RI και πυρκαγιές .....	135
Χάρτης 27 Χάρτης επικινδυνότητας FR και πυρκαγιές .....	135
Χάρτης 28 Επικινδυνότητα χρήσεων γης και πυρκαγιές .....	136
Χάρτης 29 Βοσκότοποι N. Χανίων .....	137
Χάρτης 30 Βοσκότοποι και καμένες εκτάσεις ΝΔ του N. Χανίων .....	138
Χάρτης 31 Χάρτης εγγύτητας σε βοσκότοπους και πυρκαγιές.....	138
Χάρτης 32 Οδικό δίκτυο N. Χανίων και πυρκαγιές .....	139
Χάρτης 33 Χάρτης εγγύτητας σε δρόμους και πυρκαγιές .....	139
Χάρτης 34 Προτεινόμενος χάρτης επικινδυνότητας N. Χανίων.....	141



## 1.Εισαγωγή

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που απειλούν τα δάση της χώρας μας, καταστρέφοντας κάθε χρόνο σημαντικά οικοσυστήματα και εκτάσεις υψηλής κοινωνικής σημασίας.

Το μεσογειακό κλίμα χαρακτηρίζεται από ξηρό και θερμό καλοκαίρι, που ευνοεί την εκδήλωση μεγάλων πυρκαγιών, λόγω της ύλης που έχει συσσωρευτεί και της υψηλής θερμοκρασίας και ξηρασίας.

Η φωτιά δεν αποτελεί μόνο παράγοντα ραγδαίας υποβάθμισης των δασών, αλλά συχνά, στην περίπτωση τουλάχιστον των μεσογειακών δασών, και παράγοντα ανανέωσης που εντάσσεται στο φυσικό οικολογικό τους κύκλο. Το μεσογειακό οικοσύστημα έχει το χαρακτηριστικό ότι μπορεί να ανανεωθεί σε μικρό χρονικό διάστημα 20-30 ετών ανάλογα με το είδος των φυτών. Βέβαια, για να λειτουργήσει ο μηχανισμός επαναφοράς θα πρέπει να μην επανέλθουν οι αρνητικοί παράγοντες, όπως η επανάληψη της πυρκαγιάς, η αλλαγή χρήσης γης και η χρήση της περιοχής για βόσκηση.

Άμεση συνέπεια της φωτιάς είναι η διάβρωση του εδάφους λόγω εξαφάνισης των φυτών τα οποία συγκρατούν με τις ρίζες τους το χώμα. Όταν μάλιστα η κλήση του εδάφους είναι μεγάλη και οι βροχές δυνατές, η διάβρωση είναι τόσο μεγάλη που οδηγεί στην κατάρρευση και ερημοποίηση του οικοσυστήματος.

Αρνητικές επιπτώσεις από τις πυρκαγιές στην ύπαιθρο είναι η αλλαγή του μικροκλίματος, ο περιορισμός της πανίδας και της χλωρίδας, η εμφάνιση πλημμυρικών φαινομένων, η υποβάθμιση της αισθητικής του τοπίου και η αλλαγή χρήσης γης.

Η αύξηση του πληθυσμού, η ανάγκη οικονομικής ανάπτυξης και η δημιουργία εκτεταμένων οικονομικών δικτύων οδηγούν στη δημιουργία ζωνών όπου υπάρχει μίξη δασών και οικισμών. Μεγάλες οικιστικές περιοχές γειτνιάζουν με δασικές περιοχές όπου δημιουργούνται παραθεριστικές κατοικίες. Το γεγονός αυτό, αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την πιθανότητα εμφάνισης πυρκαγιάς από τις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Οι καταστροφικές επιπτώσεις των πυρκαγιών οφείλονται όχι μόνο στην αύξηση της συχνότητας και της έντασής τους αλλά και στην ελλιπή περιφρούρηση των διαδικασιών φυσικής αναγέννησης και χρήσεων γης.

Το καλοκαίρι του 2007 οι καταστροφικές πυρκαγιές που ξέσπασαν σε διάφορες περιοχές της χώρας είχαν σαν αποτέλεσμα να χάσουν τη ζωή τους 84 άνθρωποι και εκατοντάδες να τραυματιστούν, να καούν 1500 σπίτια, 4,5 εκατομμύρια ελαιόδεντρα και 60.000 ζώα. Η καμένη έκταση ήταν 268.000 εκτάρια.

Στην Ηλεία ολόκληρα χωριά εξαφανίστηκαν από το χάρτη και κάποια ξαναχτίστηκαν από την αρχή. Η καταστροφή της τοπικής αγροτικής οικονομίας, των υποδομών ήταν πλήρης για μια ολόκληρη περιοχή.

Τον Ιούνιο του ίδιου έτους καταστροφική πυρκαγιά έκαψε τον εθνικό Δρυμό της Πάρνηθας. 25.000 στρέμματα δάσους, μια περιοχή ιδιαίτερου φυσικού κάλους, που ήταν βασικός τροφοδότης οξυγόνου του λεκανοπεδίου της Αττικής, έγινε στάχτη. Η οικολογική αυτή καταστροφή θα έχει τεράστιες επιπτώσεις στο βίο-περιβάλλον της Αττικής όπου διαβιούν 5.000.000 άνθρωποι. Θα χρειαστούν δεκαετίες για να ξεπεραστούν οι επιπτώσεις.

Στις 23 Ιουλίου 2018, η φονικότερη πυρκαγιά, έκαψε το Μάτι Αττικής με 102 νεκρούς και εκατοντάδες τραυματίες. 1500 σπίτια έπαθαν ζημιές και δεκάδες κήκαν ολοσχερώς. Τα δίκτυα ηλεκτροδότησης, τηλεπικοινωνιών και ύδρευσης υπέστησαν σημαντικές ζημιές, εκατοντάδες στρέμματα πευκοδάσους που αποτελούσαν τον πνεύμονα της Ανατολικής Αττικής, κήκαν.

Ο τρόπος αξιοποίησης και προστασίας του φυσικού πλούτου υποδηλώνει τη μορφωτική και πολιτιστική παιδεία ενός λαού και αποτελεί έναν αξιόπιστο δείκτη της κοινωνικής, πολιτικής και οικονομικής ανάπτυξης μιας χώρας.



*Εικόνα 1 Καμένη δασική έκταση*

## Σκοπός εργασίας

Ο σκοπός της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η δημιουργία ενός χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιών. Είναι γεγονός ότι έχουν διατυπωθεί σε διάφορα επιστημονικά συγγράμματα ένα πλήθος μοντέλων επικινδυνότητας πυρκαγιάς, κάθε ένα από τα οποία καταλήγει σε έναν αντίστοιχο δείκτη επικινδυνότητας και η διασπορά των τιμών αυτών στον γεωγραφικό χάρτη. Οι δείκτες επικινδυνότητας σχηματίζονται με βάση τους παράγοντες που το εκάστοτε μοντέλο θεωρεί ότι επιδρούν στην πρόκληση κινδύνου πυρκαγιάς, όπως για παράδειγμα η πυκνότητα της βλάστησης, η υγρασία της βλάστησης, η τοπογραφία, οι καιρικές συνθήκες ή ο ανθρώπινος παράγοντας. Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια συνεκτίμησης των δεικτών κινδύνου με τις εγχώριες παραμέτρους που θεωρούνται κρίσιμες για την αντιμετώπιση της πυρκαγιάς.

## 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

### Δασικές πυρκαγιές

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μέρος της οικολογίας των δασικών οικοσυστημάτων της χώρας μας και αποτελούν ένα σύνθετο φαινόμενο που ακολουθεί τους νόμους της φύσης. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, έχει διαπιστωθεί ότι οι δασικές πυρκαγιές μπορούν να συμβάλλουν θετικά στη φυσική ανανέωση και αύξηση της βιοποικιλότητας των δασικών οικοσυστημάτων αλλά όταν επαναλαμβάνονται συχνά δρουν αρνητικά οδηγώντας στην ερημοποίηση του δάσους.

Οι δασικές πυρκαγιές είναι ένα φυσικό φαινόμενο που εντάσσεται στην κατηγορία των φυσικών καταστροφών.

### Το τρίγωνο της φωτιάς

Είναι γνωστό ότι για να υπάρξει φωτιά θα πρέπει οπωσδήποτε να συνυπάρχουν οι τρεις παράγοντες του τριγώνου της πυρκαγιάς δηλαδή η καύσιμη ύλη, ο οξειδωτικός παράγοντας (συνήθως οξυγόνο) και η θερμότητα που απαιτείται για την έναρξη της πυρκαγιάς (ανάφλεξη) (Wikipedia, 2019).



Εικόνα 2 Το τρίγωνο της φωτιάς (Wikipedia, 2019)..

Πιο συγκεκριμένα η καύσιμη ύλη στις δασικές πυρκαγιές διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- Στην **υπεδάφια καύσιμη ύλη** που περιλαμβάνει την σε αποσύνθεση οργανική ύλη όπως ο χούμος, η τύρφη και οι νεκρές ρίζες.
- Στην **καύσιμη ύλη επί του εδάφους** μέχρι ύψους δυο μέτρων από αυτό που περιλαμβάνει τον ξηροτάπητα (πεσμένα φύλλα και βελόνες), την ποώδη βλάστηση (το καλοκαίρι βρίσκεται συνήθως σε ξερή κατάσταση), τους θάμνους, τα πεσμένα δένδρα, τα υπολείμματα των υλοτομιών, τα φρύγανα κλπ.
- Στην **εναέρια καύσιμη ύλη** που περιλαμβάνει τα καύσιμα υλικά που βρίσκονται πάνω από τα δυο μέτρα από το έδαφος όπως το φύλλωμα και τα λεπτά κλαδιά των δένδρων (κύρια των

κωνοφόρων), οι λειχήνες, τα αναρριχόμενα φυτά, τα όρθια νεκρά δένδρα κλπ (Βορίσης, Δασικές Πυρκαγιές, 2012).

Αξίζει να αναφερθεί ότι η πυκνότητα της καύσιμης ύλης έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με την ικανότητα ανάφλεξης. Η πυκνότητα της καύσιμης ύλης έχει ιδιαίτερη σημασία στη συμπεριφορά της φωτιάς διότι επηρεάζει τη συνολική ποσότητα θερμότητας που μπορεί να απορροφήσει η καύσιμη ύλη πριν την ανάφλεξή της (Ταμπάκης & Καρανικόλα, 2015).

### Είδη δασικών πυρκαγιών

Ανάλογα με την κατηγορία της καύσιμης ύλης διακρίνουμε τα διάφορα είδη δασικών πυρκαγιών:

- Πυρκαγιές Εδάφους

Σε αυτή την κατηγορία πυρκαγιών, καίγεται η οργανική ύλη κάτω από την επιφάνεια του φυλλοστρώματος του δάσους. Έχουν σαν κύριο χαρακτηριστικό τη βραδεία καύση και είναι δυνατόν να μην υπάρχει παραγωγή καπνού, και κατά συνέπεια, δύσκολα γίνονται αντιληπτές, συνήθως όμως προκαλούν την επόμενη κατηγορία των επιφανειακών πυρκαγιών.

Οι πυρκαγιές αυτές μπορεί να διεισδύουν σε βάθος δυο μέτρων, εξαπλώνονται αργά και είναι πιο δύσκολες στην κατάσβεση. Καταστρέφουν το ριζικό σύστημα των φυτών που συναντούν ή που οδηγούν στην επόμενη κατηγορία των επιφανειακών πυρκαγιών μέσω της εύφλεκτης βλάστησης.

- Πυρκαγιές Επιφάνειας ή Έρπουσες

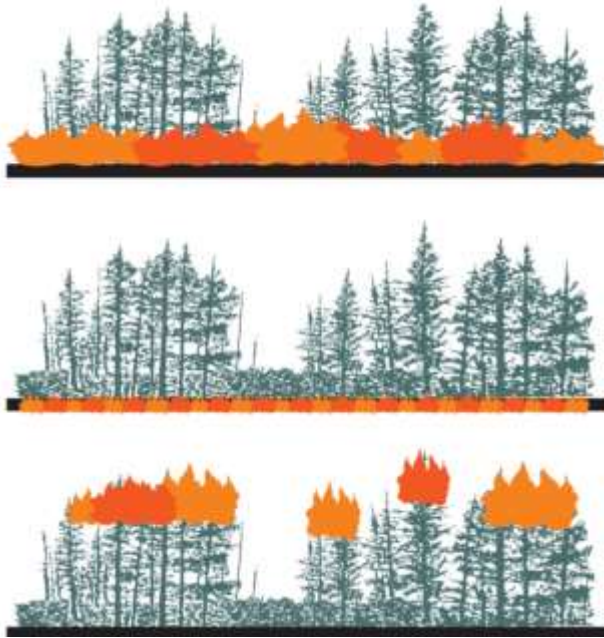
Σε αυτή την κατηγορία πυρκαγιών, η καύσιμη ύλη αποτελείται από τον ξηροτάπητα και τη χαμηλή βλάστηση. Αποτελούν το συνηθέστερο είδος δασικής πυρκαγιάς και από αυτές προέρχεται το επόμενο είδος δασικών πυρκαγιών, οι πυρκαγιές κόμης. Βασικό χαρακτηριστικό των πυρκαγιών επιφάνειας είναι η μεγάλη ταχύτητα διάδοσης με φλόγα και θερμότητα. Ο καπνός τους εξαπλώνεται συνήθως μέχρι το ύψος των δένδρων και έχει σχετικά ανοικτό χρώμα.

- Πυρκαγιές Κόμης ή Επικόρυφες.

Σε αυτή την κατηγορία πυρκαγιών καίγεται η κόμη των δένδρων. Βασικά χαρακτηριστικά τους είναι η πολύ μεγάλη ταχύτητα διάδοσης και ο καπνός που της συνοδεύει είναι πιο σκούρος από της επιφανειακές πυρκαγιές. Είναι από τις πιο καταστροφικές πυρκαγιές.

- Μικτές ή Σαρωτικές Πυρκαγιές.

Όταν συνυπάρχουν τα παραπάνω τρία είδη δασικών πυρκαγιών, δεδομένου ότι το καθένα καταναλώνει μια διαφορετική κατηγορία καύσιμης ύλης, οι πυρκαγιές ονομάζονται μικτές ή σαρωτικές πυρκαγιές. Όταν συνυπάρχει επικόρυφη και έρπουσα πυρκαγιά τότε δημιουργείται ένα μέτωπο φλόγας που επεκτείνεται από το έδαφος έως μερικά μέτρα πάνω από τις κορυφές των δένδρων που κινείται σαρώνοντας την υπάρχουσα βλάστηση. Οι σαρωτικές πυρκαγιές προκαλούν τις πιο μεγάλες καταστροφές (Βορίσης, Δασικές Πυρκαγιές, 2012).

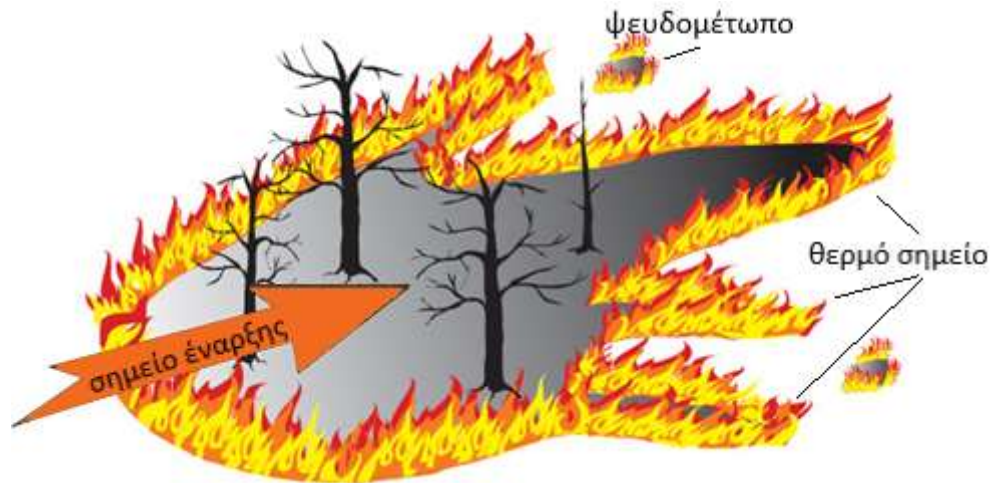


Εικόνα 3 Πυρκαγιές επιφάνειας, εδάφους και κόμης (Griffith, 2004)

### Ανατομία πυρκαγιάς

Στις δασικές πυρκαγιές μπορούμε να διακρίνουμε τα εξής μέρη:

- Κεφαλή ή μέτωπο: το πιο γρήγορα κινούμενο μέρος της δασικής πυρκαγιάς.
- Βάση ή ουρά είναι ή αντιδιαμετρικά αντίθετη πλευρά από το μέτωπο
- Πλευρές είναι τα τμήματα της περιμέτρου που σχηματίζονται παράλληλα με τη φορά διάδοσης της πυρκαγιάς.
- Διασώσεις είναι τμήματα εντός της περιμέτρου της πυρκαγιάς που δεν έχουν καεί, είτε λόγω είδους βλάστησης, είτε λόγω έλλειψης οξυγόνου, είτε λόγω υγρασίας.
- Θερμό σημείο είναι το τμήμα του μετώπου όπου η πυρκαγιά κινείται πιο γρήγορα.
- Ψευδομέτωπα είναι οι φωτιές που προκαλούνται μπροστά από το μέτωπο της πυρκαγιάς εξ αιτίας της εξακόντισης από τον άνεμο και των έντονων θερμικών ανοδικών ρευμάτων αέρα αναμμένων τεμαχίων καύσιμης ύλης (φαινόμενο κηλίδωσης).
- Περίμετρος της πυρκαγιάς είναι τα όρια της καμένης έκτασης.
- Καπνογόνο σημείο είναι σημείο της περιμέτρου που παράγει καπνό και αποτελεί πιθανό σημείο αναζωπύρωσης (Βορίσης, Η καταστολή των δασικών πυρκαγιών, 2001).



Εικόνα 4 Ανατομία πυρκαγιάς

#### Αίτια των δασικών πυρκαγιών

Οι δασικές πυρκαγιές μπορεί να προκληθούν από φυσικά αίτια ή από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Τα φυσικά αίτια είναι απόρροια φυσικών φαινομένων όπως οι κεραυνοί, ηφάιστεια και σπασμένα γυαλιά εκτεθειμένα στον ήλιο. Στις ανθρώπινες δραστηριότητες εντάσσονται οι εμπρησμοί από αμέλεια και από πρόθεση.



Εικόνα 5 Πυρκαγιά από κεραυνό

Στους εμπρησμούς από αμέλεια συνυπολογίζονται οι φωτιές για την καύση ξερόχορτων και διαφόρων σκουπιδιών, η απόρριψη αναμμένου τσιγάρου, οι βολές των ενόπλων δυνάμεων,

βλάβες στο ηλεκτρικό δίκτυο, οι πυρκαγιές για παρασκευή φαγητού στην ύπαιθρο, η χρήση σπινθηροβόλων μηχανημάτων, κ.α. Οι πυρκαγιές από αμέλεια αποτελούν την κυρίαρχη αιτία δασικών πυρκαγιών με ποσοστό περίπου 70% (Σουλιώτης, 2008).



*Εικόνα 6 Φωτιά από καύση απορριμμάτων*



*Εικόνα 8 Φωτιά από τσιγάρο*



*Εικόνα 7 Φωτιά από εμπρησμό*





*Εικόνα 9 Φωτιά από σιδηρόδρομο*



*Εικόνα 10 Φωτιά από κατασκήνωση*



*Εικόνα 11 Βλάβη ηλεκτρικού δικτύου*



Εικόνα 12 Αυτανάφλεξη σε σκουπιδότοπο

Παράγοντες που επιδρούν στις δασικές πυρκαγιές

Η συμπεριφορά μιας δασική πυρκαγιάς, εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, οι οποίοι καθορίζουν, ταυτόχρονα, και τον τρόπο εξάπλωσης και την κατάσβεσή της.

#### *Μετεωρολογικά δεδομένα*

Οι καιρικές συνθήκες επιδρούν θετικά ή αρνητικά στην αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία της καύσιμης ύλης και επομένως, στη δυνατότητα εκδήλωσης και εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών.

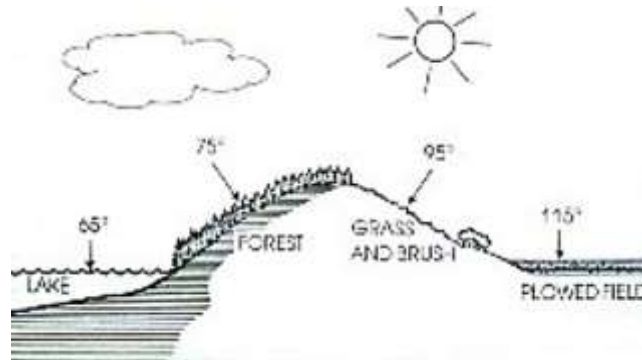
Οι κυριότεροι μετεωρολογικοί παράγοντες που επιδρούν στις δασικές πυρκαγιές είναι:

#### *Θερμοκρασία αέρα και επιφάνειας εδάφους*

Η θερμοκρασία του αέρα αποτελεί το σημαντικότερο κλιματικό στοιχείο και τη βασικότερη παράμετρο σ' όλες τις κλιματικές κατατάξεις. Με τον όρο θερμοκρασία του αέρα εννοούμε τις μεταβολές στην θερμότητα του, οι οποίες καταγράφονται από τα θερμόμετρα. Η θερμοκρασία αέρα επιδρά, τόσο στη σχετική υγρασία του αέρα όσο και στην ταχύτητα του ανέμου. Η θερμοκρασία αέρα συναρτήσεται της απόστασης από το έδαφος, φθίνει κατά 0,6-0,9 °C ανά 100m υψομετρικής διαφοράς. Μετά τα 2000m υψόμετρο, η μεταβολή της θερμοκρασίας είναι 1 °C ανά 100m υψομετρικής διαφοράς.

Η θερμοκρασία του εδάφους έχει ιδιαίτερη σημασία για την πόδη βλάστηση αφού μπορεί να υπερβεί τους 60 °C τους καλοκαιρινούς μήνες. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι στο γυμνό έδαφος η θερμοκρασία εδάφους είναι μεγαλύτερη κατά τουλάχιστον 10 °C. Επίσης, όσο πιο σκούρο είναι το χρώμα του εδάφους, τόσο υψηλότερη είναι και η θερμοκρασία που αναπτύσσεται σε αυτό.

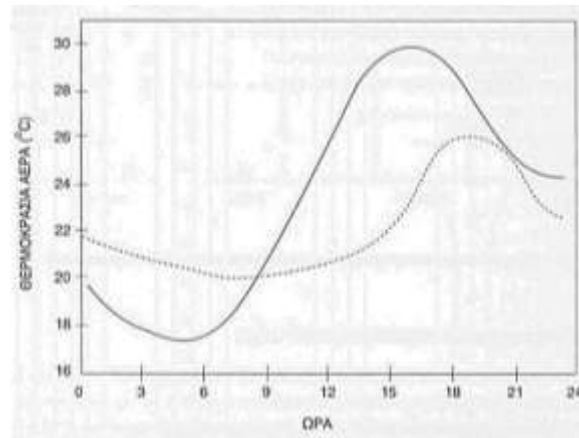
Η θερμοκρασία σε απόσταση περίπου 10 cm από το έδαφος υπολογίζεται περίπου στο μέσο όρο της θερμοκρασίας αέρος και εδάφους (Auburn University at Montgomery, 2004).



Εικόνα 13 Θερμοκρασία εδάφους (Auburn University at Montgomery, 2004)

### Ηλιακή ακτινοβολία

Η ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 14 που ακολουθεί, εξαρτάται από την ημερήσια πορεία της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και της εξερχόμενης γήινης ακτινοβολίας.



Εικόνα 14 Η ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα στη διάρκεια μιας κανονικής ημέρας και μιας μέρας με σύννεφα (διακεκομμένη) (Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών).

Κατά τη διάρκεια της ημέρας, η προσλαμβανόμενη μέσω ηλιακής ακτινοβολίας θερμότητα είναι μεγαλύτερη από αυτή που αποβάλλεται (μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία) με αποτέλεσμα ο αέρας να θερμαίνεται. Τη νύχτα, σταματάει η εισροή της ηλιακής ακτινοβολίας ενώ παράλληλα υπάρχει απώλεια θερμότητας λόγω της γήινης ακτινοβολίας. Η ψύξη συνεχίζεται μέχρι την ανατολή του ήλιου όπου και παρατηρείται το ελάχιστο της θερμοκρασίας. Μετά την ανατολή η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται και παρουσιάζει διακυμάνσεις, παρουσιάζοντας μέγιστες τιμές κατά τις πρώτες μεσημβρινές ώρες. Η χρονική καθυστέρηση εμφάνισης του μέγιστου της θερμοκρασίας σε σχέση με το μέγιστο της ηλιακής ακτινοβολίας σχετίζεται με το γεγονός ότι ο αέρας θερμαίνεται πρωτίστως από την επιφάνεια της γης, καθώς δεν έχει την ικανότητα να

απορροφά μεγάλα ποσά θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία. Η διαφορά φάσης οφείλεται στο γεγονός ότι ο ρυθμός με τον οποίο η επιφάνεια της γης προσφέρει θερμότητα στην ατμόσφαιρα είναι μικρότερος από το ρυθμό που η ατμόσφαιρα χάνει θερμότητα λόγω ακτινοβολίας προς το διάστημα.

### Εξάτμιση

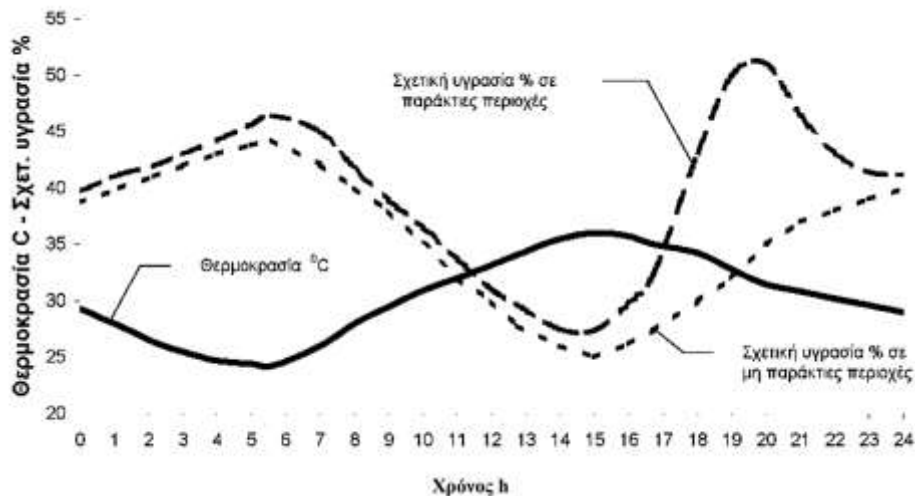
Η εξάτμιση είναι το φαινόμενο με το οποίο μειώνεται η περιεχόμενη υγρασία στην καύσιμη ύλη. Ο ρυθμός εξάτμισης της καύσιμης ύλης εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα.

### Σχετική υγρασία του αέρα

Σχετική υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα ονομάζεται ο λόγος της μάζας  $m_u$  των υδρατμών που περιέχονται σε έναν όγκο υγρού αέρα, προς την μάζα των υδρατμών  $m_{us}$  που θα περιείχε ο όγκος αυτός, αν ήταν κορεσμένος με υδρατμούς, υπό τις ίδιες συνθήκες πίεσης  $P$  και θερμοκρασίας  $T$ , δηλαδή:

$$RH = \frac{m_u}{m_{us}}$$

Η σχετική υγρασία εκφράζει το μέτρο του κατά πόσο η ατμόσφαιρα απέχει από την κατάσταση κορεσμού. Η σχετική υγρασία είναι μία εξαιρετικά μεταβλητή παράμετρος, καθώς επηρεάζεται τόσο από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, όσο και από τις μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η μεταβολή της σχετικής υγρασίας του αέρα είναι αντίστροφη από τη μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα.



Εικόνα 15: Σχέση θερμοκρασίας και ειδικής υγρασίας (Βορίσης, Δασικές Πυρκαγιές, 2012)

Όσο πιο χαμηλή είναι η σχετική υγρασία του αέρα, τόσο πιο ισχυρή γίνεται η πυρκαγιά. Αυτό οφείλεται αφενός μεν γιατί η καύσιμη ύλη γίνεται πιο εύφλεκτη μέσω του φαινομένου της εξάτμισης και αφετέρου μειώνεται η ικανότητα του αέρα να απορροφήσει την εκλυόμενη θερμότητα.

### Σταθερότητα της ατμόσφαιρας

Η σταθερότητα της ατμόσφαιρας εκφράζει την κατανομή της υγρασίας και των υδρατμών συναρτήσει του υψομέτρου. Οι κύριες καταστάσεις σταθερότητας της ατμόσφαιρας είναι:

#### Σταθερή

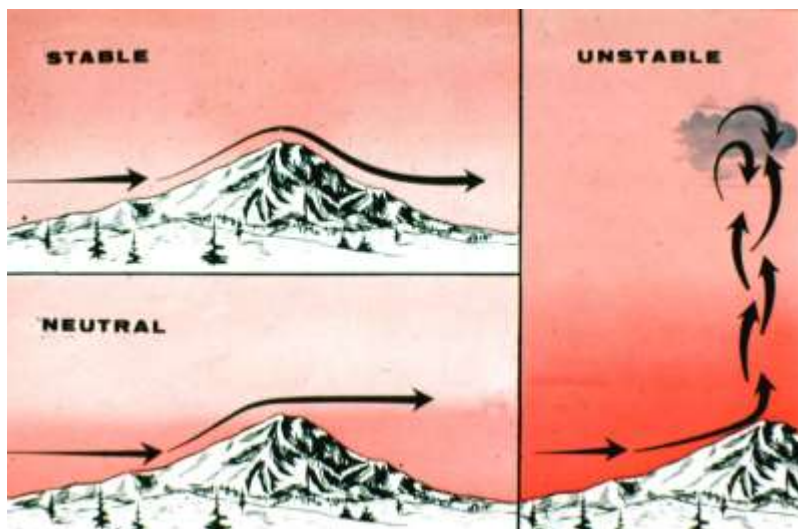
Στην σταθερή κατάσταση δεν υπάρχουν κατακόρυφες κινήσεις αέριων μαζών, χαρακτηριστικό της κατάστασης αυτής είναι η ομίχλη, όπου ο καπνός ανεβαίνει μέχρι ένα επίπεδο και από εκεί συνεχίζει οριζόντια.

#### Ουδέτερη

Στην ουδέτερη κατάσταση δεν υπάρχει κατακόρυφη μεταφορά αέριων μαζών .

#### Ασταθής

Στην ασταθή κατάσταση παρατηρούνται έντονα ανοδικά και καθοδικά ρεύματα. Αέριες μάζες με μεγάλες διαφορές θερμοκρασίας οδηγούν σε μεγαλύτερη αστάθεια. Αυτή η ασταθής δραστηριότητα ισχυροποιεί την πυρκαγιά. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι το έντονα γαλάζιο χρώμα του ουρανού.



Εικόνα 16 Σταθερότητα της ατμόσφαιρας (Auburn University at Montgomery, 2004)

### Βροχή

Η βροχή αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Η βροχή και γενικά τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (χιόνι, χαλάζι, πάχνη, κα) μεταφέρουν τους υδρατμούς της ατμόσφαιρας στο έδαφος και κατά συνέπεια αυξάνουν την υγρασία της καύσιμης ύλης. Δυνατές βροχές που διαρκούν για μεγάλο χρονικό διάστημα αποθέτουν μεγάλες ποσότητες νερού, διαβρέχουν επαρκώς την εύφλεκτη δασική ύλη και την κάνουν ανθεκτική στην έναρξη και επέκταση των πυρκαγιών (Ταμπάκης & Καρανικόλα, 2015).

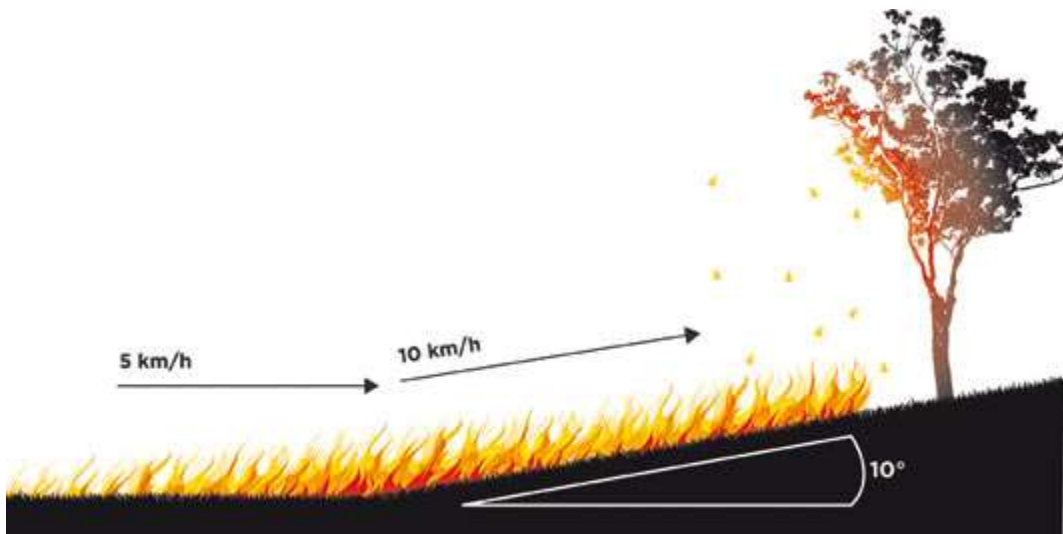
Παράγοντες που επηρεάζουν την υγρασία καυσίμου και κατά συνέπεια τη συμπεριφορά της φωτιάς, είναι το σύνολο των ημερών από την τελευταία βροχή, η διάρκεια της και η εποχική ξηρασία του εδάφους. Επίσης σημασία έχει η περίοδος του έτους, για παράδειγμα αν οι θερινές

βροχές συνοδεύονται από κεραυνούς, δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες εκδήλωσης πυρκαγιάς (Κωνσταντινίδης, 2003).

#### Άνεμος

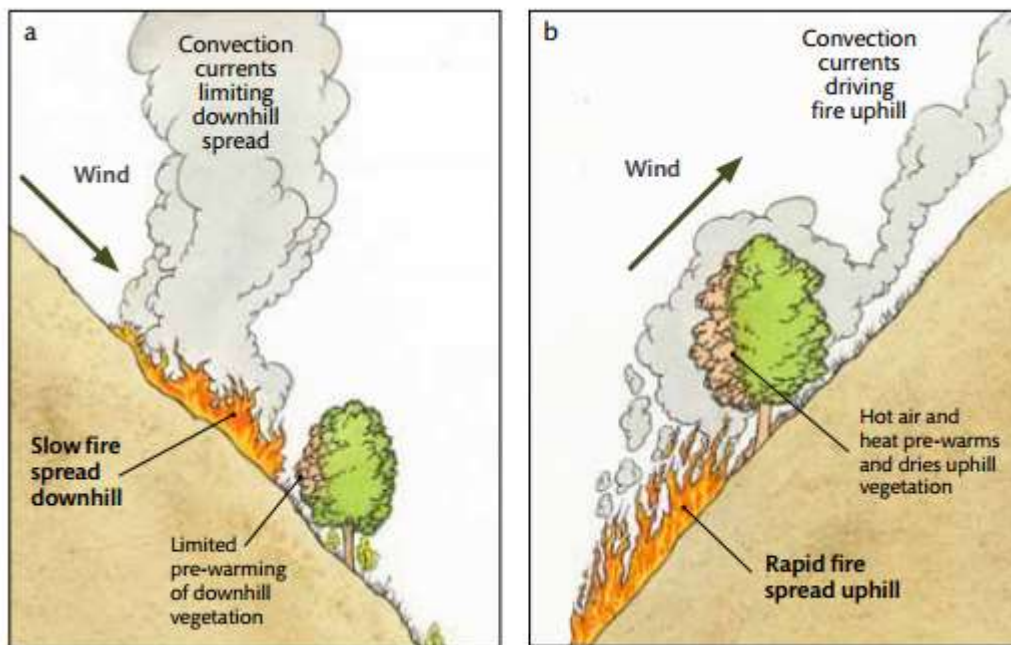
Η περιστροφική κίνηση της Γης γύρω από τον άξονα της, το ανάγλυφο και η ηλιακή ακτινοβολία που λαμβάνει ο αέρας τόσο από την ατμόσφαιρα όσο και από την επιφάνεια του εδάφους, αποτελούν τους βασικούς λόγους που ο ατμοσφαιρικός αέρας που περιβάλλει τη Γη να βρίσκεται συνεχώς σε κίνηση. Την κίνηση αυτή του ατμοσφαιρικού αέρα ονομάζουμε άνεμο (Μακρυγιάννης & Σαχσαμάνογλου, 1994). Οι άνεμοι διακρίνονται σε γενικούς και τοπικούς. Οι γενικοί άνεμοι οφείλονται στην κίνηση του αέρα μεταξύ υψηλών και χαμηλών βαρομετρικών συστημάτων πίεσης. Οι τοπικοί άνεμοι προκαλούνται από μεταφορά θερμότητας λόγω ημερήσιων διακυμάνσεων θερμοκρασίας (Ταμπάκης & Καρανικόλα, 2015). Όταν σε μια περιοχή αρχίσει μια πυρκαγιά, εάν δεν πνέει άνεμος, τότε η πυρκαγιά θα επεκταθεί περίπου ομόκεντρα γύρω από το σημείο έναρξής της. Εάν επικρατεί άνεμος, η πυρκαγιά θα επεκταθεί κυρίως προς τη διεύθυνση του ανέμου και λιγότερο στην αντίθετη με αυτόν διεύθυνση, ενώ, εάν ο άνεμος ξαφνικά αλλάξει διεύθυνση, τότε η πυρκαγιά θα επεκταθεί προς τη νέα διεύθυνση του ανέμου (Καϊλίδης Δ., 2004).

Επίσης καθοριστική για την συμπεριφορά της πυρκαγιάς είναι η επίδραση του ανάγλυφου στην κατεύθυνση του ανέμου. Στην περίπτωση όπου στην κατεύθυνση του ανέμου παρεμβάλλεται ένας λόφος, η πυρκαγιά επιταχύνεται κατά την πορεία της στην προσήνεμη πλευρά ενώ στην υπήνεμη πλευρά είναι πιθανή η αντιστροφή της κατεύθυνσης (Βορίσης, Δασικές Πυρκαγιές, 2012). Πιο συγκεκριμένα, αύξηση  $10^\circ$  στην κλίση προκαλεί διπλασιασμό της ταχύτητας εξάπλωσης της φωτιάς (Country Fire Authority, n.d.), ενώ το αντίστροφο συμβαίνει όταν η κλίση είναι  $-10^\circ$ , όπου η ταχύτητα υποδιπλασιάζεται (Aatmesh, 2016).



Εικόνα 17 Επίδραση στην ταχύτητα της φωτιάς της κλίσης του εδάφους στη φορά του ανέμου (Country Fire Authority, n.d.)

Το φαινόμενο της αναστροφής της φωτιάς εξαρτάται από την κλίση και την τραχύτητα της πλαγιάς και συμβαίνει όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί μια τιμή. Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι κοντά σε αυτό το όριο, η πορεία της πυρκαγιάς γίνεται απρόβλεπτη λόγω των εναλλαγών του ανέμου.



Εικόνα 18 Επίδραση της κλίσης εδάφους σε συνδυασμό με τον άνεμο, στην εξάπλωση της πυρκαγιάς (Aatmesh, 2016)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται συναρτησί της απόστασης του από το έδαφος. Οι προβλέψεις των μετεωρολογικών σταθμών δίνουν τιμές για απόσταση 10 μέτρων από το έδαφος. Για εδάφη με χαμηλή βλάστηση κοντά στο έδαφος η ταχύτητα του ανέμου λαμβάνει μικρότερες τιμές (Βορίσης, Η καταστολή των δασικών πυρκαγιών, 2001).

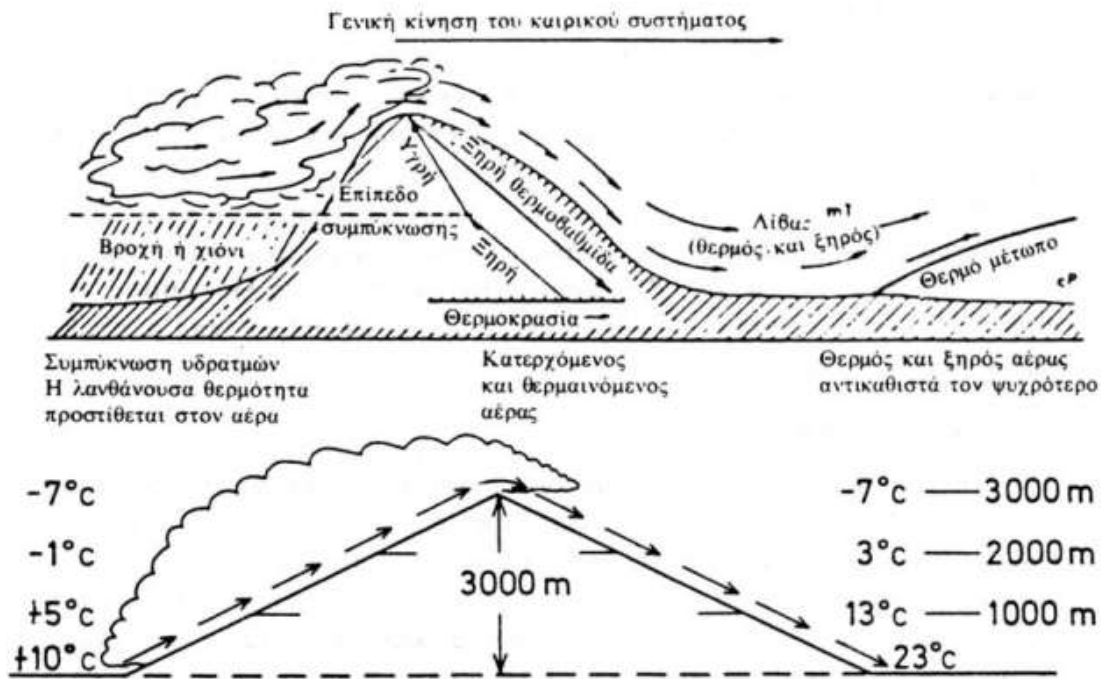
Άλλος ένας λόγος που ο ισχυρός άνεμος είναι επικίνδυνος όσον αφορά την εξάπλωση της πυρκαγιάς, είναι ότι συμβάλλει στην δημιουργία νέων εστιών πυρκαγιάς μέσω της μεταφοράς αναμμένων τεμαχίων καύσιμης ύλης, τις λεγόμενες «καύτρες», σε απόσταση δεκάδων μέτρων από το μέτωπο της πυρκαγιάς. Οι «καύτρες» προσπερνάνε τις αντιπυρικές ζώνες και τους δρόμους που υπό συνθήκες άπνοιας θα λειτουργούσαν ως φραγμοί για την εξάπλωση της πυρκαγιάς (Ταμπάκης & Καρανικόλα, 2015).

#### Θαλάσσια και απόγειος αύρα

Λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας των υδατινών μαζών του πλανήτη μας, η ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας των υδατικών επιφανειών, λόγω της απορρόφησης της ηλιακής ακτινοβολίας, είναι πολύ μικρή, της τάξης του βαθμού. Αντίθετα, η ημερήσια πορεία της θερμοκρασίας του αέρα πάνω από την ξηρά είναι σημαντική, με αποτέλεσμα την ημέρα ο άνεμος πάνω από την ξηρά να είναι θερμότερος από το γειτονικό του θαλασσινό αέρα. Το αντίθετο συμβαίνει τη νύχτα. Αυτές οι διαφορές θερμοκρασίας του αέρα πάνω από τη ξηρά και από τη θάλασσα, έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία συστημάτων κυκλοφορίας που ονομάζονται για την ημέρα θαλάσσια αύρα και για την νύχτα απόγειος αύρα (Ταμπάκης & Καρανικόλα, 2015).

### Άνεμος Foehn

Ένα ιδιαίτερο φαινόμενο που παρατηρείται είναι ο άνεμος Foehn (λίβας). Ο Foehn είναι ένας γενικός άνεμος που συνδέεται με τα συστήματα οροσειρών. Εκδηλώνεται ως βαριά και σταθερή ώθηση αέρα εγκάρσιως μίας οροσειράς και ύστερα κατέρχεται τις πλαγιές της υπήνεμης πλευράς, και ταυτόχρονα μεταβάλλεται σε έναν πιο θερμό και ξηρό άνεμο λόγω συμπίεσης (Καλαμποκίδης, Ηλιόπουλος, & Γλιγλίνος, 2013). Η παρατεταμένη πνοή των ανέμων Foehn, είναι ιδιαίτερα επικίνδυνη γιατί προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση της σχετικής υγρασίας του αέρα με αποτέλεσμα την έντονη ξήρανση της καύσιμης ύλης (Βορίσης, Η καταστολή των δασικών πυρκαγιών, 2001).



Εικόνα 19 Τυπικές συνθήκες δημιουργίας λίβας (Φλόκας, 1986)

### Τοπογραφικές συνθήκες

Καθοριστικός παράγοντας για την εξέλιξη και την συμπεριφορά της πυρκαγιάς αποτελεί η τοπογραφία της περιοχής. Τα τοπογραφικά στοιχεία που έχουν ιδιαίτερη σημασία για την πυρκαγιά είναι το υψόμετρο, ο προσανατολισμός, η τοπογραφική διαμόρφωση, η κλίση του εδάφους και ορισμένα πιο σπάνια τοπογραφικά χαρακτηριστικά όπως φαράγγια, διάσελα και κορυφογραμμές.

### Υψόμετρο

Το υψόμετρο σχετίζεται με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία. Η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται παράλληλα με το υψόμετρο και επιδρά στη σχετική υγρασία του αέρα. Όταν η ατμόσφαιρα είναι σταθερή, η σχετική υγρασία είναι αρκετά χαμηλή σε υψηλά υψόμετρα.



Το υψόμετρο επιδρά στη θερμοκρασία του αέρα που κατά μέσο όρο μειώνεται κατά 1 °C ανά 100 μ. υψομετρικής ανόδου. Το γεγονός αυτό, πέρα από την άμεση επίδρασή του στη φωτιά, επηρεάζει και τις συνθήκες ανάπτυξης των φυτών.

Το υψόμετρο καθορίζει επίσης τον τύπο και τα χαρακτηριστικά της βλάστησης επηρεάζοντας τη σύνθεση των φυτοκοινωνιών και τη σχετική τους υγρασία.

#### Προσανατολισμός

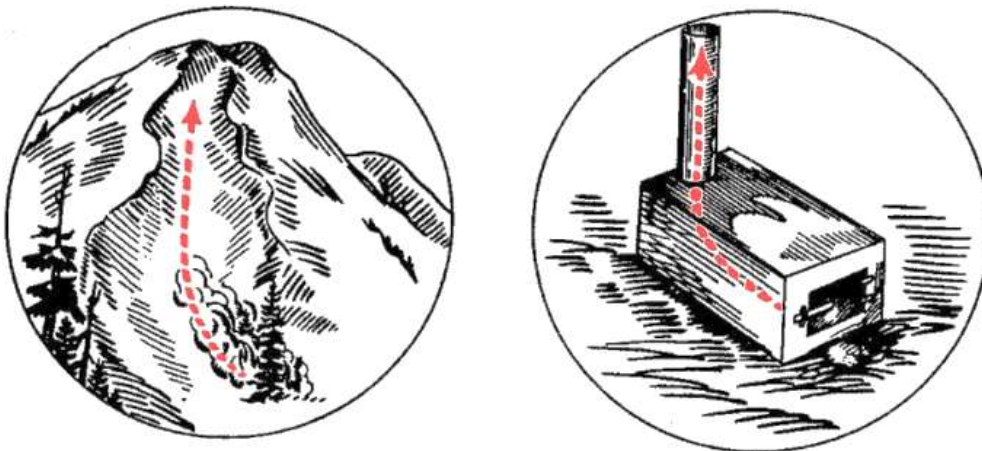
Άλλος ένας παράγοντας που επηρεάζει την υγρασία της καύσιμης ύλης είναι ο προσανατολισμός του εδάφους. Έχει παρατηρηθεί ότι στις επιφάνειες με νότιο προσανατολισμό, επειδή δέχονται ηλιακή ακτινοβολία περισσότερο χρόνο, η καύσιμη ύλη είναι πιο ξηρή από οποιοδήποτε άλλο προσανατολισμό (Βορίσης, Δασικές Πυρκαγιές, 2012).

#### Τοπογραφική Διαμόρφωση

Η γενική τοπογραφική διαμόρφωση μιας περιοχής επηρεάζει έμμεσα αλλά σημαντικά τη συμπεριφορά της φωτιάς. Οι μεταβολές στις κλίσεις, στον προσανατολισμό και στο υψόμετρο έχουν τα αποτελέσματα που προαναφέρθηκαν. Όμως, ιδιαίτερα σημαντική είναι η επίδραση των διάφορων ιδιαίτερων τοπογραφικών στοιχείων στην ταχύτητα, την κατεύθυνση και τους στροβιλισμούς του ανέμου (Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων, 2007).

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό τοπογραφικό στοιχείο που δημιουργεί ακραίες συνθήκες εξάπλωσης της πυρκαγιάς είναι το κλειστό φαράγγι, δηλαδή το βαθύ φαράγγι που είναι κλειστό στο ένα άκρο του. Όταν υπάρχει αρκετή βλάστηση στις πλαγιές του φαραγγιού και μια πυρκαγιά εισέλθει στη βάση του η συμπεριφορά της μπορεί να αλλάξει δραματικά.

Το φαράγγι λειτουργεί σαν καμινάδα δημιουργώντας ισχυρό ρεύμα αέρα προς τα επάνω και τραβώντας την πυρκαγιά μέχρι την κορυφή του με εκπληκτικό ρυθμό. Στην ένταση του φαινομένου συντελεί η ύπαρξη ανέμου στην κορυφή του φαραγγιού και η ύπαρξη αστάθειας στην ατμόσφαιρα (Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων, 2007).



Εικόνα 20 Φαινόμενο καμινάδας (Combe, 2015)

### *Άλλοι παράγοντες*

#### *Υπεδάφια στάθμη νερού*

Η υπεδάφια στάθμη νερού επηρεάζει την υγρασία της καύσιμης ύλης. Εάν η στάθμη των υπόγειων υδάτων είναι αρκετή και χρησιμοποιείται από τα φυτά, τότε αυτά δεν ξηραίνονται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού όπως ορισμένες χαράδρες ή κοιλάδες όπου υπάρχει και η αντίστοιχη βλάστηση (π.χ. πλατάνι, ιτιά) (Βορίσης, Η καταστολή των δασικών πυρκαγιών, 2001).

#### *Φαινόμενο κηλίδωσης*

Το φαινόμενο της κηλίδωσης παρουσιάζεται όταν λόγω ισχυρού ανέμου και θερμικών ανοδικών ρευμάτων της φωτιάς, προκαλείται η εξακόντιση φλεγόμενων τεμαχίων καύσιμης ύλης σε αποστάσεις έως και 800 μέτρων. Η κηλίδωση αποτελεί ένα από τα κύρια προβλήματα ελέγχου της πυρκαγιάς. Μπορεί να προκαλέσει ακαριαία ανάφλεξη γειτονικών εκτάσεων η ακόμα και να ξεπεράσει τη ζώνη αναχαίτισης.

### *Δασοπροστασία*

Η αντιμετώπιση του φαινομένου της πυρκαγιάς κρίνεται στις εξής τρεις φάσεις: πρόληψη, καταστολή και αποκατάσταση.

#### *Πρόληψη δασικών πυρκαγιών*

Το δάσος είναι ο πιο σημαντικός φυσικός πόρος. Ρυθμίζει το κλίμα, απορροφά το διοξείδιο του άνθρακα, εμπλουτίζει τον υδροφόρο ορίζοντα, προστατεύει το έδαφος από διάβρωση, εμπλουτίζει τον αέρα με οξυγόνο, ενισχύει την βιοποικιλότητα και ωραιοποιεί το τοπίο.

Η πρόληψη των πυρκαγιών είναι σημαντικότερη, αποτελεσματικότερη και οικονομικότερη δράση για την προστασία του.

Καθάρα δασοκομικά μέτρα είναι η αραίωση των δέντρων, το κλάδεμα, ο καθαρισμός του εδάφους από καύσιμο υλικό, η διάνοιξη δρόμων και αντιπυρικών λωρίδων για διάσπαση της συνέχειας της καύσιμης ύλης και η οριοθέτηση. Η αποτελεσματικότητα των μέτρων εξαρτάται από τη συχνότητα και τη συνέπεια εφαρμογής τους ή την συντήρησή τους. Για παράδειγμα, οι δρόμοι πρέπει να συντηρούνται και να καθαρίζονται τα πρηνά από τη θαμνώδη βλάστηση συστηματικά. Το ίδιο ισχύει και για τις αντιπυρικές ζώνες.

Είναι γεγονός ότι η κατασκευή των δασικών δρόμων είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την αύξηση των δασικών πυρκαγιών επειδή αυξάνει ο αριθμός των επισκεπτών, είτε ως περιπατητές, είτε ως εκδρομείς και από αμέλεια ή ανευθυνότητα δημιουργούν εστίες εκδήλωσης πυρκαγιών.

Αναγκαία είναι η αστυνόμευση της δασικής περιοχής, με επιτήρηση, περιπολίες και απαγόρευση της εισόδου σε επισκέπτες όταν είναι αυξημένος ο κίνδυνος εκδήλωσης πυρκαγιάς.

Επιπλέον, τα μέσα σύγχρονης τεχνολογίας (θερμικές κάμερες, αισθητήρες, Drones) λόγω πλέον του χαμηλού τους κόστους, μπορούν και πρέπει ενταχθούν στο σχεδιασμό για την εποπτεία της περιοχής σε συνδυασμό πάντα με τα παραδοσιακά μέτρα πυρανίχνευσης (περιπολίες, πυροφυλάκια, πύργοι).

Επίσης απαραίτητη είναι η έγκαιρη δημιουργία χαρτών πρόβλεψης πιθανών εστιών φωτιάς αλλά και χαρτών εκτίμησης της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς και εξέλιξης του μετώπου της πάντα με τη χρήση σύγχρονων μορφολογικών και κλιματολογικών δεδομένων, θα ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα του κατασταλτικού μηχανισμού.

Τέλος, η ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των πολιτών μέσα από τα μέσα Ενημέρωσης, τα σχολεία και τους Δήμους, μπορεί να στηρίξει σε όλα τα επίπεδα την προσπάθεια για την προστασία των δασών και την αποφυγή καταστροφών.



Εικόνα 21 Αντιπυρική ζώνη (Kairis, 2011)

### Καταστολή

Ο έγκαιρος εντοπισμός μιας πυρκαγιάς είναι καθοριστικός παράγοντας για την καταστολή της και κατ' επέκταση, την ελαχιστοποίηση των ζημιών που μπορεί να προκληθούν. Στόχος είναι η παρέμβαση για κατάσβεση, να γίνει σε 15' το πολύ από την εκδήλωση της πυρκαγιάς.

Η αναφορά για την εκδήλωση πυρκαγιάς πρέπει να γίνει άμεσα και να δίνει ακριβή στοιχεία για την τοποθεσία, το μέγεθος, την ένταση, τη δασική καύσιμη ύλη, την προσβασιμότητα στην περιοχή, και όποιο άλλο στοιχείο θα είναι χρήσιμο.

Για την αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών πρέπει να υπάρξει συντονισμός ανάμεσα στους διάφορους φορείς που έχουν αρμοδιότητα. Αυτοί είναι : το Πυροσβεστικό Σώμα (Π.Σ.), η Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας (Γ.Γ.Π.Π.), η Δασική Υπηρεσία (Δ. Υ.), η Ελληνική Αστυνομία (Ε.Α.), οι Ένοπλες Δυνάμεις (Ε.Δ.), η Περιφέρεια, ο Δήμος ( ένας ή περισσότεροι), κατά περίπτωση το Λιμενικό Σώμα (Λ.Σ.) και οι Υπηρεσίες προστασίας περιβάλλοντος.

Ο σχεδιασμός της αντιμετώπισης της πυρκαγιάς είναι το επόμενο βήμα, βασικά εργαλεία γι' αυτό είναι:

1. Δασικοί χάρτες.
2. Ισχυρή βάση δεδομένων με ακριβή και τεκμηριωμένα στοιχεία που αφορούν πυρκαγιές.
3. ενημέρωση της βάσης με τα μορφολογικά στοιχεία της περιοχής.
4. Σύνδεση της βάσης με αντίστοιχη της Μετεωρολογικής Υπηρεσίας, από όπου αντλούνται στοιχεία για τις κλιματολογικές και μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής.
5. Δημιουργία χαρτών εξέλιξης πυρκαγιάς.
6. Επιλογή περιοχών για τις οποίες εκτιμάται ότι υπάρχει αυξημένος κίνδυνος πυρκαγιάς και για τις περιοχές και δημιουργία σεναρίων αντιμετώπισης.

Γεγονός είναι ότι οι περισσότερες αποτυχίες που έχουν σημειωθεί στην αντιμετώπιση πυρκαγιών, οφείλονται στην κακή εκτίμηση των υπευθύνων υποτιμώντας τον κίνδυνο, είτε λόγω ελλιπούς πληροφόρησης είτε λόγω κακού σχεδιασμού.

Η αξιοποίηση του διαθέσιμου προσωπικού και των μέσων με αποτελεσματικό τρόπο είναι η σημαντικότερη παράμετρος στην αντιμετώπιση της πυρκαγιάς.

Το κυρίαρχο μοντέλο στην αντιμετώπιση μεγάλων πυρκαγιών είναι, τα εναέρια μέσα τα οποία περιορίζουν την θερμική ένταση της πυρκαγιάς με διαδοχικές ρίψεις νερού, αυξάνοντας παράλληλα και την υγρασία της καύσιμης ύλης. Παράλληλα δρουν επίγειες δυνάμεις στις πλευρές τις φωτιάς περιορίζοντας την εξάπλωση ή την αναζωπύρωση της.

Η κατανομή του πυροσβεστικού δυναμικού ανάλογα με βάση το σχέδιο δράσης, ανάλογα την επικινδυνότητα και τα δεδομένα μιας πυρκαγιάς αποτελεί καθοριστικό στοιχείο για την επιτυχία της επιχείρησης.

Τέλος, για την αποτελεσματικότητα του μηχανισμού, καθοριστικός είναι ο ρόλος της Διοίκησης της επιχείρησης. Έγκυρες και σαφείς οδηγίες καθώς και η τήρηση της εφαρμογής του σχεδίου δράσης με τις αναγκαίες αναπροσαρμογές, είναι αυτά που θα καθορίσουν το ποσοστό επιτυχίας.

Η βελτίωση της αποτελεσματικότητας του πυροσβεστικού μηχανισμού είναι μια δυναμική διαδικασία, η οποία ακολουθεί τη βελτίωση των σχεδίων δράσης, κάνοντας χρήση σύγχρονης τεχνολογίας και δεδομένων, αναβαθμίζοντας ποιοτικά του προσωπικού, εξασφαλίζοντας εγκαίρως τον αναγκαίο εξοπλισμό αλλά και τα απαραίτητα κατασταλτικά μέσα.



*Εικόνα 22 Εναέριο μέσο κατάσβεσης*



*Εικόνα 23 Εναέριο μέσο κατάσβεσης και πεζοπόρο τμήμα ΠΣ*

### *Αποκατάσταση*

Οι δασικές πυρκαγιές είναι συνυφασμένες με την ύπαρξη του δάσους. Στις μεσογειακές περιοχές, όπου το καλοκαίρι είναι πολύ θερμό και ξηρό σε συνδυασμό με την συσσώρευση της καύσιμης ύλης, οι πυρκαγιές αποτελούν φυσικό φαινόμενο και αυτό θα συνεχίσει στο μέλλον. Το θετικό για τις μεσογειακό οικοσύστημα είναι η ικανότητα του να αναγεννάτε από τις στάχτες του εύκολα και γρήγορα, αν βέβαια δεν ανακοπεί η πορεία του από την ανθρώπινη δραστηριότητα.

Μετά την πυρκαγιά πρέπει να αντιμετωπιστεί άμεσα η διάβρωση του εδάφους, προς αποφυγή δημιουργίας πλημμυρικών φαινομένων, εξασθένισης του υδροφόρου ορίζοντα αλλά και για την ενίσχυση της πανίδας και της χλωρίδας του οικοσυστήματος.

Ένας τρόπος πρόληψης της διάβρωσης του εδάφους είναι η χρήση των καμένων κορμών των δέντρων για τη δημιουργία μικρών φραγμάτων (κορμοφράγματα). Με τα φράγματα αυτά, διευκολύνεται η απορρόφηση του νερού της βροχής από το έδαφος και παράλληλα ενισχύεται ο υδροφόρος ορίζοντας.

Έπειτα, μέσω της αναδάσωσης θα ενισχυθούν φυτά που δεν αναπτύσσονται από μόνα τους όπως για παράδειγμα το έλατο και η μαύρη Πεύκη. Τα φυτά αυτά πρέπει να φυτευτούν είτε ως σπόροι είτε ως μικρά διετή φυτά για τα οποία όμως πρέπει να υπάρξει φροντίδα για τα πρώτα 2-3 χρόνια.

Επίσης, αυτονόητη είναι η προστασίας της αναδασωτέας περιοχής από τον άνθρωπο (αλλαγή χρήσης γης, βόσκηση, καταπάτηση).

Οι πυρκαγιές είναι ένα φυσικό φαινόμενο στο οποίο ο ανθρώπινος παράγοντας δρα και προς τις δύο κατευθύνσεις, το προκαλεί και το αποτρέπει -περιορίζει.



*Εικόνα 24 Καμένη δασική έκταση*



*Εικόνα 25 Καμένο σπίτι*



*Εικόνα 26 Καμένη έκταση κοντά σε οικισμό*



*Εικόνα 27 Καμένη έκταση δίπλα σε δρόμο*

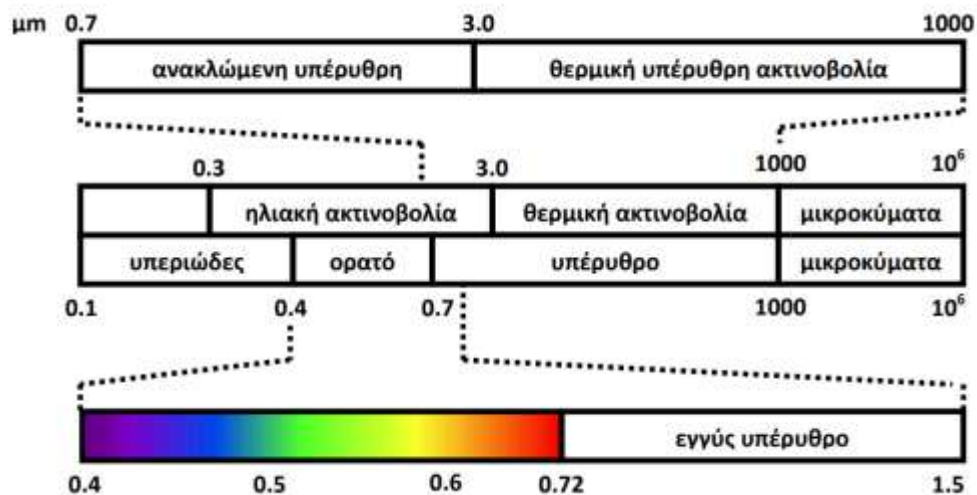
## Δορυφορική τηλεπισκόπηση

### Γενικά

Τηλεπισκόπηση είναι η επιστήμη και τεχνική που εξετάζει τις αρχές, μεθόδους, όργανα και συστήματα με τα οποία επιτυγχάνεται η εκ του μακρόθεν συλλογή, επεξεργασία, ανάλυση και ερμηνεία πληροφοριών που σχετίζονται με συγκεκριμένες ιδιότητες αντικειμένων ή φαινομένων (Αργιαλάς Δ. , 1998).

Στην τηλεπισκόπηση (Remote sensing) η τεχνική απόκτησης πληροφοριών για αντικείμενα που βρίσκονται στη γήινη επιφάνεια γίνεται με τη χρήση ψηφιακών σαρωτών (τηλεπισκοπικών ανιχνευτών) που ανιχνεύουν την ανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας της γήινης επιφάνειας και την αποδίδουν ως ψηφιακή εικόνα. Τα μέσα που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση είναι εναέρια και επίγεια. Έτσι, η τηλεπισκόπηση περιλαμβάνει την παρατήρηση με αεροφωτογραφίες, δορυφορικές εικόνες και εικόνες ραντάρ της επιφάνειας της γης.

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση αφορά την καταγραφή πληροφορίας από δορυφόρους (μετεωρολογικοί και περιβαλλοντικοί). Τα καταγραφικά συστήματα που φέρουν οι δορυφόροι ανήκουν στην ευρεία κατηγορία των ραδιομέτρων (radiometer), τα οποία αποτελούν όργανα μέτρησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



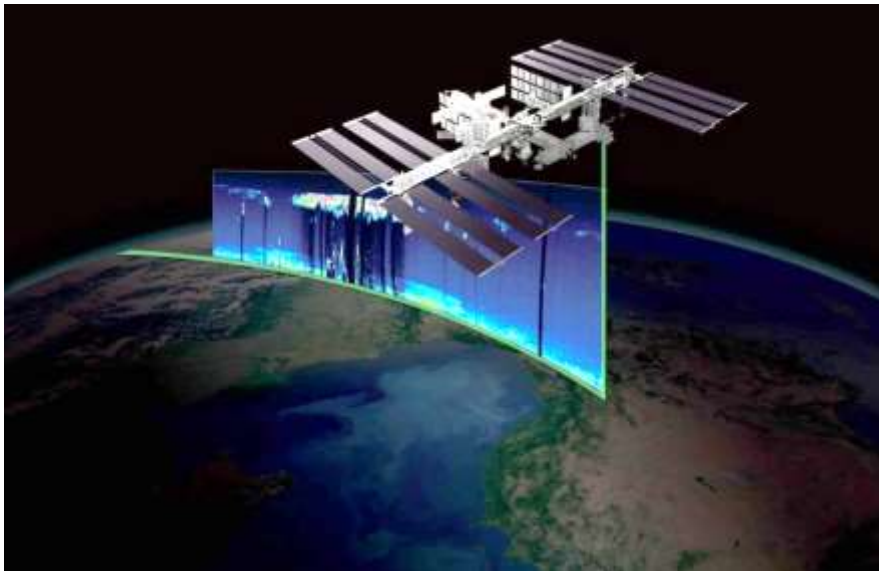
Εικόνα 28 Μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας (Μητράκα, 2011)

Η λειτουργία όλων των ραδιομέτρων και συνεπώς των περισσότερων δορυφορικών αισθητήρων βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Σύμφωνα με αυτό, όταν ένα αρνητικά φορτισμένο φωτοευαίσθητο υλικό εκτεθεί σε ακτινοβολία, παράγονται ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά δημιουργούν ηλεκτρικό ρεύμα η ένταση του οποίου είναι ανάλογη της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Έτσι, οι μεταβολές στο ηλεκτρικό ρεύμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση των μεταβολών στην ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην πλάκα με το φωτοευαίσθητο υλικό (Μητράκα, 2011).



Τα δεδομένα που μεταδίδονται από τους αισθητήρες, μετατρέπονται σε διδιάστατους πίνακες γραμμών και μ στηλών, όπου η τιμή κάθε εικονοστοιχείου αντιπροσωπεύει την ανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα τηλεπισκοπικά δεδομένα έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

1. **Χωρική ανάλυση:** Είναι η χωρική διακριτική ικανότητα της εικόνας, δηλαδή το μέγεθος του pixel σε πραγματικές διαστάσεις. Στην πράξη η χωρική ανάλυση καθορίζει τις ελάχιστες διαστάσεις των αντικειμένων ικανών να αποτυπωθούν στη ψηφιακή εικόνα και να ανιχνευθούν.
2. **Φασματική ανάλυση:** σχετίζεται με το εύρος των περιοχών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στις οποίες πραγματοποιεί καταγραφές ένας πολυφασματικός ανιχνευτής και τον αριθμό των φασματικών καναλιών που αυτός χρησιμοποιεί.
3. **Ραδιομετρική ανάλυση:** Είναι η φασματική διακριτική ικανότητα, η ευαισθησία του ανιχνευτή να εντοπίζει διαφορές στην ισχύ του σήματος, δηλαδή, το πόσο εύκολα ή δύσκολα μπορούν να διακριθούν υλικά γειτονικής φασματικής συμπεριφοράς σε μια εικόνα (Wikipedia, 2007).
4. **Χρονική ανάλυση:** Είναι η συχνότητα λήψης εικόνων για την ίδια περιοχή.



Εικόνα 29 Ψηφιακή τηλεπισκόπηση με χρήση δορυφόρων (NASA, 2019)

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των δορυφορικών δεδομένων, είναι συνοπτικά είναι τα εξής:

- Αναγνώριση της κάλυψη της γης, δηλαδή ότι μπορεί να καλύψει μια μεγάλη περιοχή.
- Επαναλαμβανόμενη κάλυψη, δηλαδή οι δορυφόροι καταγράφουν τη γήινη επιφάνεια σε τακτά χρονικά διαστήματα.
- Πολυφασματικά δεδομένα, δηλαδή οι εικόνες λαμβάνονται είναι σε διάφορες ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.
- Ψηφιακή μορφή δεδομένων, δηλαδή εικόνες λαμβάνονται υπό ψηφιακή μορφή. Η παρουσίαση τους υπό αυτή τη μορφή, επιτρέπει τη χρησιμοποίηση Η/Υ και την πιο σωστή επεξεργασία τους.

- Η ψηφιακή μορφή των δεδομένων καθιστά εύκολη την ενσωμάτωση και χρήση τοπογραφικών και άλλων θεματικών πληροφοριών κατά την ανάλυση.
- Ευκολότερη και φθηνότερη αναπαραγωγή και παρουσίαση σε οποιοδήποτε τύπο και κλίμακα χάρτη μέσω των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών.
- Διακριτική χωρική ικανότητα.
- Τα δορυφορικά δεδομένα παρουσιάζουν πολύ μικρή παραμόρφωση λόγω ανάγλυφου.
- Τα δεδομένα αποκτούνται χωρίς περιορισμούς σε σύγκριση με τα προβλήματα από την παραγγελία αεροφωτογραφιών.

Ένα βασικό μειονέκτημα αποτελούν τα σφάλματα που περιέχουν τα δορυφορικά δεδομένα από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες, το ανάγλυφο της περιοχής και από την ακτινοβολία των αντικειμένων. Άλλο ένα μειονέκτημα είναι η δυσκολία συσχέτισης των αντικειμένων με την ακτινοβολία που εκπέμπουν (Καττέ, 2014).

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση συνεισφέρει σε πλήθος εφαρμογών και ειδικότερα στην παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους, στην παραγωγή υποβάθρων, σε περιβαλλοντικές μελέτες, στην παρακολούθηση και διαχείριση περιβαλλοντικών πόρων, τις μελέτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, στις χρήσεις γης, στη διαχρονική παρακολούθηση και παρακολούθηση επιπτώσεων φυσικών καταστροφών κ.α.

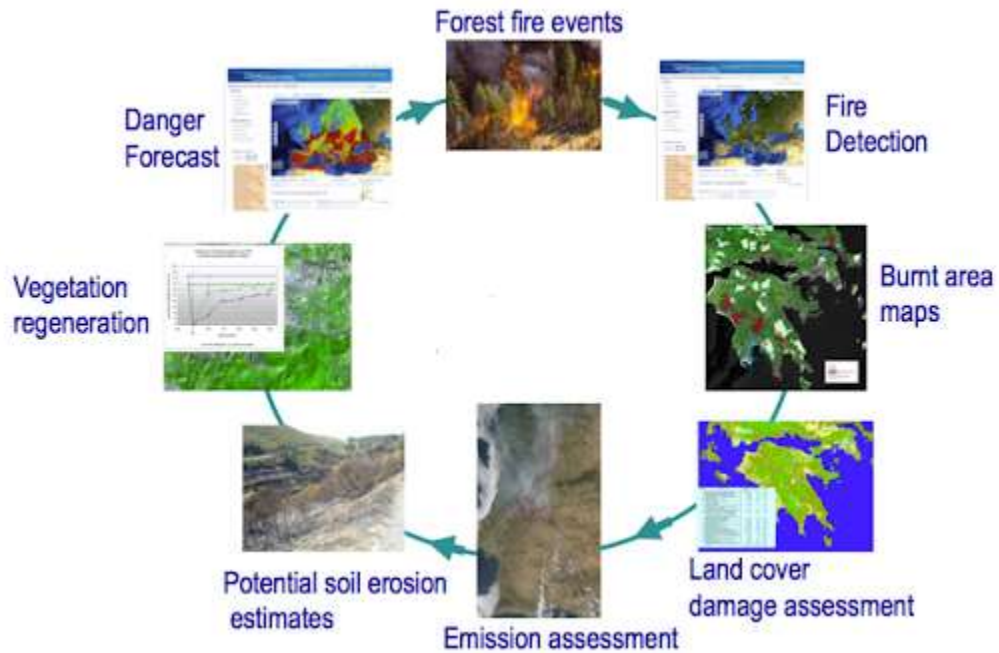
#### Τηλεπισκόπηση και αντιμετώπιση πυρκαγιών

Η επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων μέσω των εργαλείων της τηλεπισκόπησης, αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο για την πρόληψη, την αντιμετώπιση αλλά και την αξιολόγηση των επιπτώσεων των δασικών πυρκαγιών.

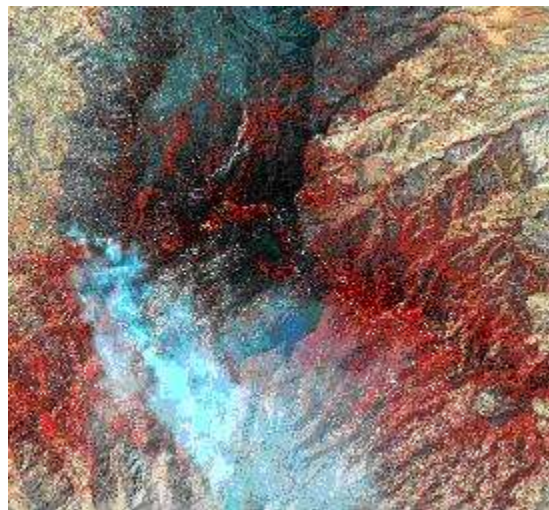
Στο πλαίσιο της πρόληψης των δασικών πυρκαγιών, η τηλεπισκόπηση μπορεί να συμβάλλει στη δημιουργία χαρτών επικινδυνότητας πυρκαγιάς αφού μπορεί να εντοπίσει, να αποτυπώσει και να συνδυάσει τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής, πληροφορίες για τη βλάστηση της περιοχής, πληροφορίες για τις χρήσεις γης, πληροφορίες για το επίπεδο υγρασίας της βλάστησης και πολλές άλλες παραμέτρους που συντελούν στη δημιουργία ενός χάρτη επικινδυνότητας υψηλής ακρίβειας.

Στο πλαίσιο της καταστολής, μπορεί να παρέχει απαραίτητες αλλά και κρίσιμες πληροφορίες για την περιοχή την ώρα της πυρκαγιάς, συμβάλλοντας στην λήψη αποφάσεων. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να παρέχει κρίσιμες πληροφορίες για την επιλογή και υλοποίηση του κατάλληλου μοντέλου διαχείρισης κινδύνου εκδήλωσης και προσομοίωσης εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Η σωστή συνεκτίμηση των γεωχωρικών πληροφοριών που παρέχει η τηλεπισκόπηση μπορεί να ελαχιστοποιήσει τους κινδύνους σε μια πυρκαγιά.

Τέλος, έχει αποδειχθεί σημαντικό εργαλείο στην εκτίμηση των καταστροφών που ακολουθούν μια πυρκαγιά μεγάλης έκτασης όπως είναι η ακριβής χαρτογράφηση των καμένων επιφανειών.



Εικόνα 30 Παρακολούθηση του κύκλου της φωτιάς (San-Miguel-Ayanz, 2012)



Εικόνα 31 Έγχρωμη σύνθετη απεικόνιση της πυρκαγιάς του Άσπεν από το δορυφόρο Quickbird της 1ης του Ιουλίου του 2003 (Michele A. Kuester, 2005)

## Εικόνες Landsat 8 OLI/TIRS

Τα τηλεσκοπικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για αυτή την εργασία είναι απεικονίσεις του δορυφορικού συστήματος Landsat 8 OLI/TIRS.

Ο δορυφόρος Landsat 8 της NASA έχει συνολικά έντεκα φασματικά κανάλια. Από αυτά, τα εννέα φασματικά κανάλια έχουν χωρική ανάλυση 30 μέτρων. Η ανάλυση για το κανάλι 8 (πανοραμική) είναι 15 μέτρα. Τα θερμικά κανάλια 10 και 11 είναι χρήσιμα για την παροχή ακριβέστερων επιφανειακών θερμοκρασιών και λαμβάνονται σε ανάλυση 100 μέτρων, αλλά επαναπροσδιορίζονται σε 30 μέτρα. Οι δορυφόροι Landsat 8 απεικονίζουν ολόκληρη τη Γη κάθε 16 ημέρες.

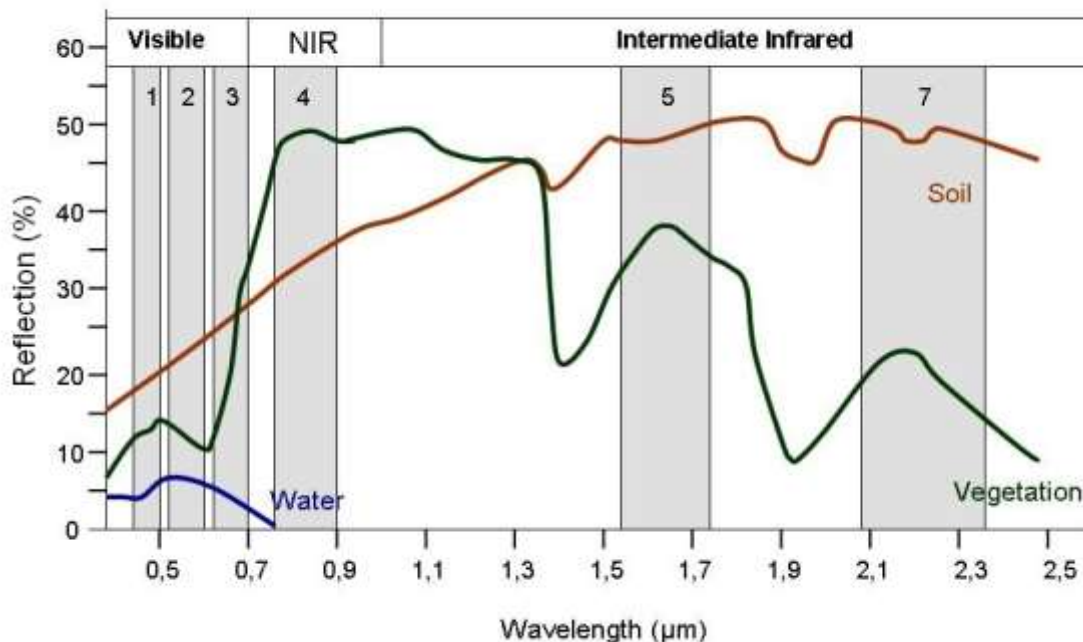
Ο Landsat 8 επιστρέφει 400 σκηνές την ημέρα στο αρχείο δεδομένων της USGS, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα λήψης σκηνών της γης απαλλαγμένων από σύννεφα (Βατούγιου, 2014).

Κανάλια	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
1 – Coastal aerosol	0.43 – 0.45	30
2 – Blue	0.45 – 0.51	30
3 – Green	0.53 – 0.59	30
4 – Red	0.64 – 0.67	30
5 – Near Infrared (NIR)	0.85 – 0.88	30
6 – SWIR 1	1.57 – 1.65	30
7 – SWIR 2	2.11 – 2.29	30
8 – Panchromatic	0.50 – 0.68	15
9 – Cirrus	1.36 – 1.38	30
10 – Thermal Infrared 1	10.60 – 11.19	100
11 – Thermal Infrared 2	11.50 – 12.51	100

Πίνακας 1 Μήκη κύματος και χωρική ανάλυση φασματικών καναλιών Landsat 8 (U.S. Geological Survey, 2013)

## Φασματικές ιδιότητες των επιφανειών

Με τη βοήθεια της δορυφορικής τηλεπισκόπησης μπορούμε να ανακτήσουμε τα χαρακτηριστικά των προβαλλόμενων επιφανειών μεταφράζοντας την ακτινοβολία που ανακλάται ή εκπέμπεται από αυτές. Η φασματική απόκριση των επιφανειών στα διάφορα μήκη κύματος, δηλαδή, το ποσοστό της ακτινοβολίας που ανακλάται στα διάφορα μήκη κύματος επηρεάζεται από τα φυσικά χαρακτηριστικά και τη σύσταση κάθε αντικειμένου. Κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετική φασματική απόκριση, η μελέτη της οποίας μας επιτρέπει το διαχωρισμό μιας επιφάνειας από κάποια άλλη και την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με το σχήμα, το μέγεθος και τις φυσικές ιδιότητες της (Μητράκα, 2011). Η φασματική υπογραφή αναπαρίσταται γραφικά ως μια καμπύλη μεταβολής της ανακλαστικότητας ή της θερμικής ακτινοβολίας στο κανάλι του θερμικού υπέρυθρου, ως προς το μήκος κύματος και είναι μοναδική για κάθε επιφάνεια.



Εικόνα 32 Φασματικές υπογραφές εδάφους, βλάστησης και νερού και φασματικά κανάλια Landsat 7 (European Space Agency, 2014).

Χαρακτηριστική είναι η διαφορά στην ανακλαστικότητα του εδάφους με βλάστηση στο κόκκινο και το εγγύς υπέρυθρο. Η βλάστηση παρουσιάζει μεγαλύτερη ανακλαστικότητα σε σχέση με το έδαφος στο εγγύς υπέρυθρο και το αντίθετο παρατηρείται στο μέσο υπέρυθρο.

#### Συνδυασμός φασματικών καναλιών

Ανάλογα με το χαρακτηριστικό που επιθυμούμε να μελετήσουμε, επιλέγεται ο φασματικός τύπος του ανιχνευτή ώστε να ληφθεί η μέγιστη πληροφορία (Καττέ, 2014). Ανάλογα τι χρειάζεται να αποτυπωθεί, χρησιμοποιείται ο κατάλληλος RGB συνδυασμός των καναλιών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

RGB	Πληροφορία
432	Το τυποποιημένο σύνθετο "ψευδέχρωμο". Η βλάστηση εμφανίζεται σαν σκιές κόκκινου, οι αστικές περιοχές είναι μπλε, και το έδαφος ποικίλλει από το σκοτεινό έως το απαλό καφέ. Τα κωνοφόρα δέντρα θα εμφανιστούν σκοτεινό κόκκινο. Αυτός είναι ένας πολύ δημοφιλής συνδυασμός ζωνών και είναι χρήσιμος για τις μελέτες βλάστησης καθώς και για τα διάφορα στάδια των καλλιεργειών.
321	Ο συνδυασμός ζωνών "φυσικού χρώματος". Επειδή σε αυτόν τον συνδυασμό, τα γήινα χαρακτηριστικά εμφανίζονται σε χρώματα παρόμοια με το ανθρώπινο οπτικό σύστημα, η υγιής βλάστηση είναι πράσινη, η ανθυγιεινή βλάστηση είναι καφέ και κίτρινη, οι δρόμοι είναι γκριζοί, και οι ακτές είναι άσπρες.
742	Αυτός ο συνδυασμός παρέχει μια "φυσική" απόδοση. Η υγιής βλάστηση θα είναι φωτεινή πράσινη, τα λιβάδια θα εμφανιστούν πράσινα, οι ρόδινες περιοχές αντιπροσωπεύουν το άγονο χώμα, τα πορτοκαλί και καφέ αντιπροσωπεύουν τις αραιές περιοχές. Το νερό θα είναι μπλε. Οι άμμοι, τα χρώματα και τα μεταλλεύματα τονίζονται σε ένα πλήθος χρωμάτων. Αυτός ο

	συνδυασμός ζωνών παρέχει εντυπωσιακά στοιχεία για τις ερήμους. Είναι χρήσιμο για τις γεωλογικές, γεωργικές και μελέτες υγροτόπου. Εάν υπήρχαν πυρκαγιές σε αυτή την εικόνα θα εμφανίζονταν κόκκινες. Αυτός ο συνδυασμός χρησιμοποιείται για την ανάλυση μετά την πυρκαγιά, των καμένων και μη καμένων δασικών περιοχών.
541	Ο αυτός μοιάζει με τον συνδυασμό 7-4-2 δεδομένου ότι η υγιής βλάστηση θα είναι φωτεινή πράσινη, αλλά είναι καλύτερος για τις γεωργικές μελέτες.
754	Αυτός ο συνδυασμός δίνει καλύτερες ατμοσφαιρικές γραμμές και οι ακτές καθορίζονται καλά. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρει την υφή, τα χαρακτηριστικά υγρασίας της εδαφολογικής βλάστησης εμφανίζονται μπλε. Χρήσιμος για τις γεωλογικές μελέτες.
531	Ο συνδυασμός αυτός δίνει την τοπογραφική ύψη.
451	Η υγιής βλάστηση εμφανίζεται στις σκιές του κόκκινου, καφέ, πορτοκαλί και κίτρινου. Τα εδάφη μπορούν να είναι πράσινα και καφέ, τα αστικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα είναι άσπρα, κυανά και γκριζα και οι κοκκινωπές περιοχές παρουσιάζουν τη δημιουργία νέας βλάστησης και πιθανώς αραιά λιβάδια. Τα καθαρά, μεγάλα θαλάσσια βάθη θα είναι πολύ σκοτεινά σε αυτόν τον συνδυασμό, εάν το νερό είναι ρηχό ή περιέχει ιζήματα αυτά θα εμφανιζόταν ως σκιές του πιο ανοιχτού μπλε.
453	Ο συνδυασμός καταδεικνύει τις διαφορές υγρασίας και είναι χρήσιμος για την ανάλυση των εδαφών και της βλάστησης
753	Αυτός ο συνδυασμός ζωνών παρέχει επίσης μια "φυσική" απόδοση επίσης διαπερνώντας τα ατμοσφαιρικά εμπόδια, τον καπνό και την ελαφριά ομίχλη. Η βλάστηση εμφανίζεται στις σκιές του σκοτεινού και ανοικτού πράσινου, τα αστικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα είναι άσπρα, γκριζα, κυανά, οι άμμοι, τα χρώματα και τα μεταλλεύματα εμφανίζονται σε ποικίλα χρώματα.
543	Όπως ο 4-5-1 συνδυασμός, αυτός ο συνδυασμός παρέχει στο χρήστη ένα μεγάλο ποσό αντίθεσης πληροφοριών και χρώματος. Η υγιής βλάστηση είναι φωτεινή πράσινη και τα χρώματα είναι μωβ. Αυτός ο συνδυασμός είναι χρήσιμος για μελέτες βλάστησης, και χρησιμοποιείται ευρέως στους τομείς της διαχείρισης ξυλείας και της προσβολής παρασίτων.

Πίνακας 2 Συνδυασμοί φασματικών καναλιών

## Φασματικοί λόγοι

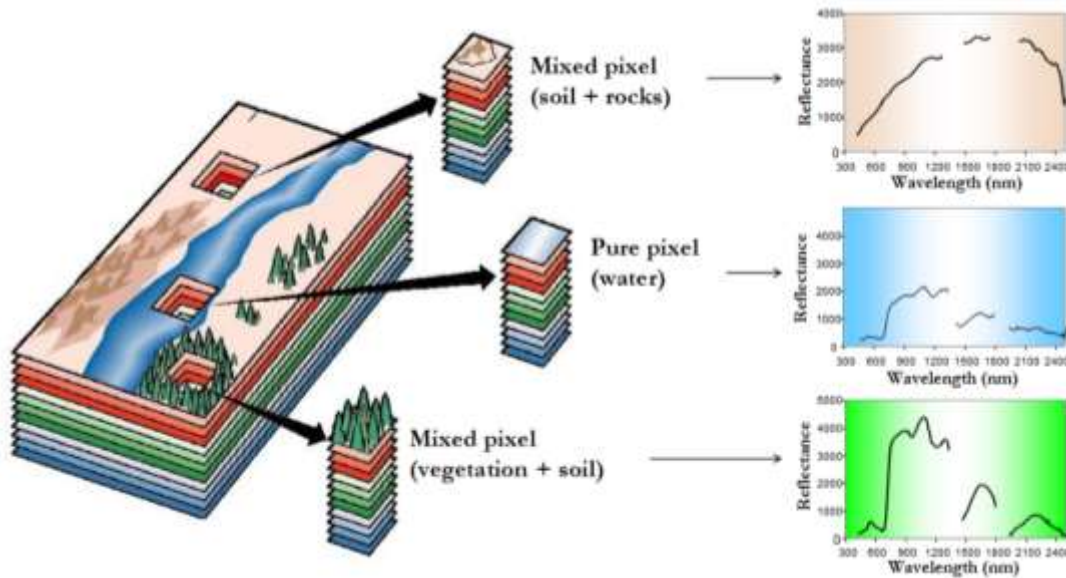
Οι λόγοι καναλιών είναι ενισχύσεις οι οποίες προκύπτουν από την διαίρεση των ψηφιακών τιμών σε ένα φασματικό κανάλι με τις αντίστοιχες τιμές σε ένα άλλο κανάλι. Βασικό πλεονέκτημα των εικόνων που προκύπτουν είναι ότι αναδεικνύουν τα φασματικά χαρακτηριστικά των διάφορων στοιχείων της εικόνας. Κάθε εικόνα – λόγος αντισταθμίζει τη διακύμανση των ψηφιακών τιμών που οφείλεται στο τοπογραφικό ανάγλυφο, και άρα στον φωτισμό και έτσι δίνει έμφαση στη φασματική και χρωματική πληροφορία της εικόνας (Αργιαλάς Δ. , Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων, 1999). Οι εικόνες – λόγοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργήσουν σύνθετα ψευδέχρωμα.

## Ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων

Η ταξινόμηση μιας δορυφορικής εικόνας αποσκοπεί στον εντοπισμό ομογενών επιφανειών σε μια εικόνα. Κάθε εικονοστοιχείο ταξινομείται με βάση τις φασματική υπογραφή του σε κατηγορίες ή κλάσεις. Γενικά, στην επιστήμη της τηλεπισκόπησης, υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες ταξινόμησης, η επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση. Στην μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση στατιστικοί κανόνες χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ομάδων

εικονοστοιχείων με παρόμοια χαρακτηριστικά. Στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση επιλέγεται δείγμα εικονοστοιχείων τα οποία αντιπροσωπεύουν αναγνωρίσιμες επιφάνειες. Τα δείγματα χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία μιας φασματικής υπογραφής που θα εκπροσωπεί αυτές τις δομές. Έπειτα με χρήση διάφορων αλγορίθμων γίνεται ο εντοπισμός όμοιων φασματικά εικονοστοιχείων, τα οποία στη συνέχεια ταξινομούνται στην ίδια κατηγορία.

Στην περίπτωση των δορυφορικών εικόνων όμως, και ανάλογα με την διακριτική ικανότητα του αισθητήρα, ένα εικονοστοιχείο συνήθως αποτυπώνει μια ανομοιογενής περιοχή (η φασματική του απόκριση είναι συνδυασμός ακτινοβολιών διαφορετικών υλικών).



Εικόνα 33 Αποτύπωση ομοιογενών και ανομοιογενών εικονοστοιχείων (Plaza, Plaza, Valencia, & Paz, 2009)

### Το λογισμικό QGIS

Το Quantum GIS (QGIS) είναι ένα φιλικό προς το χρήστη λογισμικό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών Ανοιχτού Κώδικα και διέπεται από την άδεια General Public License (GNU). Το QGIS αποτελεί επίσημο πρόγραμμα του Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Τρέχει σε Linux, Unix, Mac OS X και Windows και υποστηρίζει όλους τους κυριότερους μορφότευπους γεωχωρικών δεδομένων και συνδέεται και με συστήματα διαχείρισης γεωχωρικών βάσεων δεδομένων (Spatial-DBMS).

Επίσης αποτελεί κέλυφος για χρησιμοποίηση αλγορίθμων και εντολών από την Python, το GRASS-GIS, το SAGA-GIS και την γλώσσα χωρικής ανάλυσης R.

### Το λογισμικό SAGA

Το SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses - Σύστημα για Αυτοματοποιημένη Γεωεπιστημονική Ανάλυση) είναι ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) ανοιχτού κώδικα που χρησιμοποιείται για επεξεργασία και ανάλυση χωρικών δεδομένων. Επιπλέον, το λογισμικό περιλαμβάνει αλγορίθμους για γεωστατιστική, ταξινόμηση εικόνων, αλλαγές προβολικών συστημάτων, εξομοίωση δυναμικών διαδικασιών (υδρολογία, ανάπτυξη τοπίου) και ανάλυση

τοπίου. Η λειτουργικότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω μιας διεπαφής χρήστη (GUI), τη γραμμή εντολών του συστήματος ή με τη χρήση της προγραμματιστικής διεπαφής μέσω C++.

Διαθέτει επίσης πολλές βιβλιοθήκες τόσο για την επεξεργασία αρχείων DEM όσο και για την παραγωγή σχετικών προϊόντων (χάρτης κλίσεων, υδρογραφικών δικτύων κλπ.).

#### Το πρόγραμμα Corine Land Cover 2018

Το πρόγραμμα του Corine Land Cover (CLC) 2018, αποτελεί ένα από τα πιο γνωστά και χρησιμοποιούμενα εργαλεία του προγράμματος της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Περιβάλλοντος ή European Environmental Agency και τα δεδομένα που θα χρησιμοποιούνται είναι ανοικτά και προέρχονται από την αντίστοιχη βάση δεδομένων Copernicus Land Monitoring Service. Τα δεδομένα του προγράμματος Corine Land Cover έχουν τις ίδιες προδιαγραφές για όλες τις χώρες που έχουν παραχθεί και είναι επίσης διαθέσιμα τα στοιχεία προηγούμενων ετών επιτρέποντας τις συγκρίσεις και τον εντοπισμό των αλλαγών που έχουν συμβεί.

Για την υλοποίηση του προγράμματος χρησιμοποιήθηκαν διαχρονικές δορυφορικές εικόνες SENTINEL-2, SPOT, RapidEye και IRS, της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας και υφιστάμενα γεωχωρικά δεδομένα του Ελληνικού Κτηματολογίου και συγκεκριμένα τα ενιαία χαρτογραφικά υπόβαθρα μεγάλης κλίμακας (LSO25), δεδομένα Δασικών Χαρτών, επικαιροποιημένα δεδομένα τύπου οικοτόπων του δικτύου Natura 2000, κτηματογράφησης, ακτογραμμής, καθώς και δεδομένα από άλλες πηγές, όπως αγροτικών καλλιεργειών του ΟΠΕΚΕΠΕ, δασικών πυρκαγιών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, οικισμών, οδικού δικτύου, κλπ (ktimatologio.gr, 2019).

Επίσης, σημαντικό είναι να αναφερθεί είναι ότι η κατηγοριοποίηση του Corine Land Cover έχει γίνει σε πέντε κύριες κατηγορίες με τρία υπό επίπεδα θεματικής λεπτομέρειας, δημιουργώντας 44 κατηγορίες κάλυψης γης όπως παρουσιάζεται στον ακόλουθο πίνακα:



Πρώτο επίπεδο	Δεύτερο επίπεδο	Τρίτο επίπεδο
1. Τεχνητές επιφάνειες	1.1 Αστικός ιστός	1.1.1 Συνεχής αστικός ιστός 1.1.2 Ασυνεχής αστικός ιστός
	1.2 Βιομηχανικές-εμπορικές ζώνες και δίκτυα μεταφορών	1.2.1 Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες 1.2.2 Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα 1.2.3 Ζώνες λιμένων 1.2.4 Αεροδρόμια
	1.3 Ορυχεία, χώροι απορρίψεως απορριμμάτων και χώροι οικοδόμησης	1.3.1 Χώροι εξορύξεως ορυκτών 1.3.2 Χώροι απορρίψεως απορριμμάτων 1.3.3 Χώροι οικοδόμησης
	1.4 Τεχνητές μη γεωργικές ζώνες πράσινου	1.4.1 Περιοχές αστικού πρασίνου 1.4.2 Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής
2. Γεωργικές περιοχές	2.1 Αρόσιμη γη	2.1.1 Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη 2.1.2 Μόνιμα αρδευόμενη γη 2.1.3 Ορυζώνες
	2.2 Μόνιμες καλλιέργειες	2.2.1 Αμπελώνες 2.2.2 Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς 2.2.3 Ελαιώνες
	2.3 Λιβάδια	2.3.1 Λιβάδια
	2.4 Ετερογενείς γεωργικές περιοχές	2.4.1 Ετήσιες καλλιέργειες που σχετίζονται με μόνιμες καλλιέργειες 2.4.2 Σύνθετες καλλιέργειες 2.4.3 Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης 2.4.4 Γεωργο-δασικές περιοχές
3. Δάση και ημι-φυσικές περιοχές	3.1 Δάση	3.1.1 Δάσος πλατύφυλλων 3.1.2 Δάσος κωνοφόρων 3.1.3 Μικτό δάσος
	3.2 Συνδυασμοί θαμνώδους ή/και ποώδους βλάστησης	3.2.1 Φυσικοί βοσκότοποι 3.2.2 Θάμνοι και χερσότοποι 3.2.3 Σκληροφυλλική βλάστηση 3.2.4 Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις
	3.3 Ανοιχτοί χώροι με λίγη ή καθόλου βλάστηση	3.3.1 Παραλίες, αμμόλοφοι, Αμμουδιές 3.3.2 Απογυμνωμένοι βράχοι 3.3.3 Εκτάσεις με αραιή βλάστηση 3.3.4 Αποτεφρωμένες εκτάσεις 3.3.5 Παγετώνες και αέριο χιόνι
4. Υγρότοποι	4.1 Υγρότοποι ενδοχώρας	4.1.1 Βάλτοι στην ενδοχώρα 4.1.2 Τυρφώνες
	4.2 Παραθαλάσσιοι υγρότοποι	4.2.1 Παραθαλάσσιοι βάλτοι 4.2.2 Αλυκές 4.2.3 Ζώνες που καλύπτονται από παλιρροιακά ύδατα
5. Υδάτινες επιφάνειες	5.1 Χερσαία ύδατα	5.1.1 Υδατορρεύματα 5.1.2 Επιφάνειες στάσιμου ύδατος
	5.2 Θαλάσσια ύδατα	5.2.1 Παράκτιες λιμνοθάλασσες 5.2.2 Εκβολές ποταμών 5.2.3 Θάλασσες και ωκεανοί

Πίνακας 3 Ελληνική ονοματολογία Corine Land Cover (Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών, 2011)

## Δείκτες βλάστησης

Η βλάστηση απορροφά την ηλιακή ακτινοβολία σε διαφορετικές ζώνες, δηλαδή σε διαφορετικά εύρη συχνοτήτων και μήκη κύματος και εκπέμπει ένα διαφορετικό ποσοστό αυτής σε αυτές. Το ποσοστό της διαθλασμένης ακτινοβολίας σε συγκεκριμένα κανάλια, όπως το εγγύς υπέρυθρο (NIR), το κόκκινο (RED) και το υπέρυθρο μικρού μήκους (SWIR), ποικίλλει ανάλογα με την υγεία των φυτών και την περιεκτικότητα του νερού.

### Vegetation Reflectance



Εικόνα 34 Δείκτες βλάστησης με ποσοστό εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (Antognelli, NDVI and NDMI Vegetation Indices: Instructions for use, 2018)

### Κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης (NDVI)

Η φωτοσύνθεση απαιτεί νερό, διοξείδιο του άνθρακα και φως για την παραγωγή σακχάρων και οξυγόνου. Η χλωροφύλλη, που δίνει στα φυτά το πράσινο χρώμα τους, απορροφά το ορατό φως. Τα φύλλα ανακλούν το εγγύς υπέρυθρο φως (NIR). Η παρατήρηση αυτή σχετίζεται με την εξέλιξη της ζωής ενός φυτού επειδή τα φυτά χρησιμοποιούν μόνο ορατό φως για φωτοσύνθεση. Αυτό σημαίνει ότι ένα υγιές φυτό με καλή δραστηριότητα φωτοσύνθεσης μπορεί να αναλυθεί συγκρίνοντας το NIR με το ορατό κόκκινο φως. Η μη υγιής βλάστηση θα ανακλά περισσότερο ορατό φως και λιγότερο NIR. Η υγιής βλάστηση θα απορροφήσει το μεγαλύτερο μέρος του ορατού φωτός που πέφτει πάνω της. Οι κανονικοποιημένες τιμές NDVI κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Πολύ χαμηλές τιμές NDVI (<0,1) αντιστοιχούν σε άγονες περιοχές βράχου, άμμου ή χιονιού. Τα ελεύθερα στάσιμα νερά τείνουν να είναι πολύ χαμηλά θετικά έως αρνητικά. Τα εδάφη τείνουν να παράγουν μάλλον μικρές τιμές NDVI (0,1-0,2). Η αραιή βλάστηση όπως θάμνοι και λιβάδια μπορεί να οδηγήσει σε μέτριες τιμές NDVI (0,2-0,5).

Πιο συγκεκριμένα, το NDVI έχει χρησιμοποιηθεί για τη χαρτογράφηση της κατανομής των οικοσυστημάτων, την παρατήρηση των διαταραχών και την εκτίμηση των επιπτώσεών τους, την παρακολούθηση των αλλαγών στα λειτουργικά χαρακτηριστικά των οικοσυστημάτων, την παρακολούθηση της απώλειας ή της υποβάθμισης της εξαμυσοδιαπνοής και της αφομοίωσης άνθρακα των φυτών. Σε κλίμακα αγροκτήματος, το NDVI χρησιμοποιείται ως προγνωστικός παράγοντας των χαρακτηριστικών των φυτών, της φυσιολογικής κατάστασης των φυτών, των προβλέψεων απόδοσης και της κατανομής των καλλιεργειών και μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση της υδρόβιας βλάστησης.

Το κύριο μειονέκτημα του NDVI είναι ότι είναι ευαίσθητο στην επίδραση του εδάφους (φωτεινότητα και χρώμα), στην ατμόσφαιρα (κάλυψη σύννεφων και σκιά σύννεφων) και στη σκιά "θόλου" από φύλλα (Xue & Baofeng, 2017). Ένα άλλο πρόβλημα με το NDVI είναι ότι στην πυκνή βλάστηση, φτάνει γρήγορα στον κορεσμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο δείκτης NDVI δεν είναι γραμμικός. Συμπερασματικά, το NDVI είναι καλό να μελετάτε σε μεγάλες περιοχές έτσι ώστε να δίνεται μια αίσθηση της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας της ευρύτερης περιοχής. Η ευαισθησία του στο έδαφος και τα αερολύματα σημαίνει ότι έχει περιορισμούς. Για πιο ποιοτική ανάλυση θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλοι δείκτες που έχουν ενσωματωμένους μηχανισμούς ανατροφοδότησης.

Ο δείκτης NVDI υπολογίζεται ως ο λόγος μεταξύ της διαφοράς και του αθροίσματος των διαθλασμένων ακτινοβολιών στο εγγύς υπέρυθρο και στο κόκκινο και εκφράζεται από την σχέση:

$$NVDI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

όπου NIR και RED είναι οι ψηφιακές τιμές του εικονοστοιχείου στα κανάλια του εγγύς υπέρυθρου και του κόκκινου αντίστοιχα.

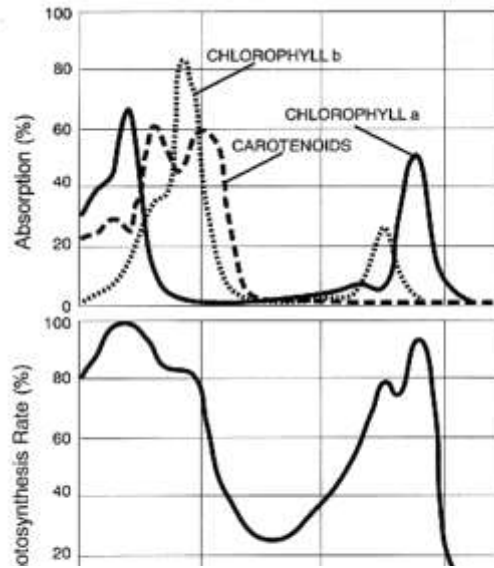
Η ερμηνεία της τιμής του NDVI είναι εξαιρετικά χρήσιμη, καθώς επιτρέπει την άμεση αναγνώριση των περιοχών βλάστησης που έχουν προβλήματα. Η ερμηνεία του δείκτη NDVI είναι αρκετά απλή, οι τιμές του κυμαίνονται μεταξύ -1 και 1 και κάθε τιμή αντιστοιχεί σε διαφορετική κατάσταση όπως φαίνεται στον Πίνακα 4. Επίσης, τα σύννεφα, το νερό και το χιόνι θα χαρακτηρίζονται από αρνητικές τιμές δείκτη.

NVDI	
0 – 0.1	Γυμνό έδαφος
0.1 - 0.2	Σχεδόν χωρίς κάλυψη
0.2 - 0.3	Πολύ λίγη κάλυψη
0.3 - 0.4	Λίγη κάλυψη με χαμηλό ύψος ή λίγη κάλυψη με μεγάλο ύψος
0.4 - 0.5	Μέτρια προς λίγη κάλυψη με χαμηλό ύψος ή μέτρια κάλυψη με μεγάλο ύψος
0.5 – 0.6	Μέτρια κάλυψη χαμηλού ύψους ή μέτρια προς χαμηλή κάλυψη μεγάλου ύψους
0.6 – 0.7	Μέτρια προς υψηλή κάλυψη χαμηλού ύψους ή μέτρια κάλυψη μεγάλου ύψους
0.7 – 0.8	Υψηλή κάλυψη με μεγάλο ύψος
0.8 – 0.9	Πολύ υψηλή κάλυψη πολύ μεγάλου ύψους
0.9 – 1	Απόλυτη κάλυψη μεγάλου ύψους

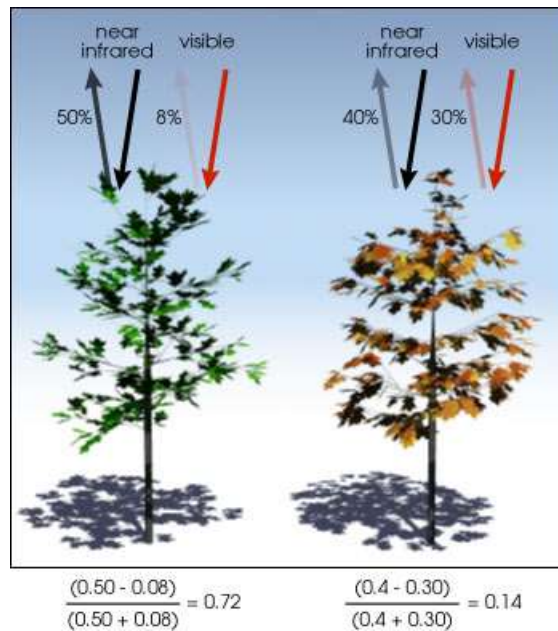
Πίνακας 4 Κλίμακα δείκτη NDVI (Antognelli, NDVI and NDMI Vegetation Indices: Instructions for use, 2018)

Ο δείκτης NVDI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της πυκνότητας βλάστησης και σε συνδυασμό με έναν χάρτη ειδών βλάστησης (π.χ. Corine Land Cover) μπορεί να

χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία ενός χάρτη καυσίμων που απαιτείται για τη δημιουργία ενός μοντέλου επικινδυνότητας πυρκαγιάς.



Εικόνα 35 Τυπικό φάσμα φωτοσυνθετικής ενεργός ακτινοβολίας PAR, σε σύγκριση με τα φάσματα απορρόφησης για χλωροφύλλη-Α, χλωροφύλλη-Β και καροτενοειδή (Govindjee, 1995)



Εικόνα 36 Υψηλές τιμές NDVI, υποδηλώνουν πιο υγιή βλάστηση (Makario, 2019)

Κανονικοποιημένος δείκτης υγρασίας (NDMI)

Ο δείκτης υγρασίας Normalized Difference Moisture Index (NDMI) είναι ευαίσθητος στα επίπεδα υγρασίας της βλάστησης. Χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της ξηρασίας καθώς και για την παρακολούθηση των επιπέδων υγρασίας των καυσίμων σε περιοχές με πυρκαγιά.

Χρησιμοποιεί τα κανάλια NIR (near infrared band) και SWIR (short-wave infrared) με βάση τον τύπο (Wilson & Sader, 2002):

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$$

Αυτός ο δείκτης αντιπαραβάλλει το κανάλι του εγγύς υπέρυθρου (NIR), το οποίο είναι ευαίσθητο στην ανάκλαση της περιεκτικότητας σε χλωροφύλλη φύλλων, στο κανάλι του υπέρυθρου μικρού μήκους κύματος (SWIR), το οποίο είναι ευαίσθητο στην απορρόφηση της υγρασίας των φύλλων. Οι τιμές του δείκτη NDWI κυμαίνονται από -1 έως +1. Η ερμηνεία της τιμής του δείκτη NDMI καθιστά δυνατή την άμεση αναγνώριση των περιοχών βλάστησης με έλλειψη νερού. Θετικές τιμές έχουν επιφάνειες με νερό ενώ το εδάφους και η βλάστηση έχουν μηδενικές ή αρνητικές τιμές που αντιστοιχούν στην έλλειψη νερού (McFeeters, 1996).

NDMI	
-1 – -0.8	Γυμνό έδαφος
-0.8 – -0.6	Σχεδόν χωρίς βλάστηση
-0.6 – -0.4	Πολύ χαμηλή κάλυψη
-0.4 – -0.2	Ξηρή χαμηλή κάλυψη ή πολύ χαμηλή βρεγμένη κάλυψη
-0.2 – 0	Μέτρια κάλυψη πολύ ξηρή ή πολύ χαμηλή κάλυψη όχι πολύ ξηρή
0 – 0.2	Κανονική κάλυψη πολύ ξηρή ή πολύ μέτρια κάλυψη όχι πολύ ξηρή
0.2 – 0.4	Κανονική προς υψηλή κάλυψη αρκετά ξηρή ή μέτρια κάλυψη όχι πολύ ξηρή
0.4 – 0.6	Υψηλή κάλυψη χωρίς ξηρασία
0.6 – 0.8	Πολύ υψηλή κάλυψη χωρίς ξηρασία
0.8 – 1	Απόλυτη κάλυψη χωρίς έλλειψη νερού

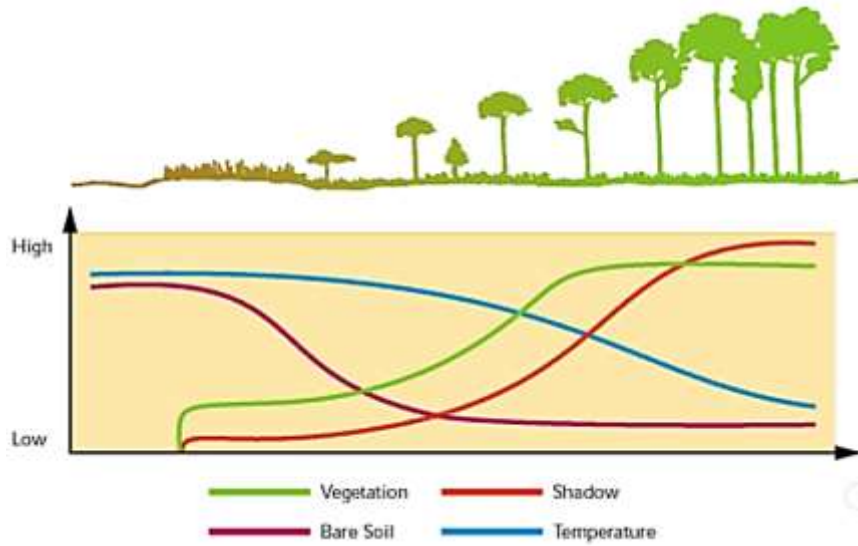
Πίνακας 5 Κλίμακα δείκτη NDMI (Antognelli, NDVI and NDMI Vegetation Indices: Instructions for use, 2018)

Για την παρούσα διπλωματική για την πυκνότητα βλάστησης θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης Forest Canopy Index, που έχει αποδειχθεί ότι είναι πιο αποτελεσματικός σε σύγκριση με τους δυο προηγούμενους δείκτες (Ashaari, Kamal, & Dirgahayu, 2018).

### Forest Canopy Density Model

Το μοντέλο Forest Canopy Density (FCD) αναπτύχθηκε αρχικά ως εργαλείο για την αξιολόγηση της αναγέννησης ενός δασικού θόλου σε τροπικά δάση που έχουν καταγραφεί. Χρησιμοποιεί μόνο τα κανάλια του αισθητήρα landsat και μοντελοποιεί την πυκνότητα του δασικού θόλου χρησιμοποιώντας δεδομένα που προέρχονται από τέσσερις υπο-δείκτες: το δείκτη Advanced Vegetation Index (AVI) ή Vegetation Index (VI), το δείκτη Bare Soil Index (BI), το δείκτη Shadow Index (SI) και το δείκτη Thermal Index (TI).

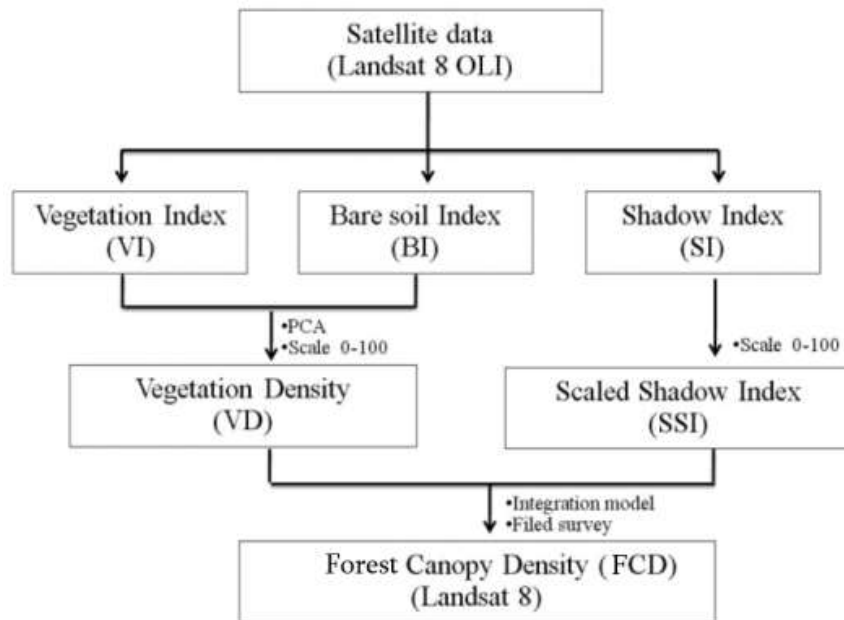
Ο δείκτης σκιάς αυξάνεται καθώς η πυκνότητα του δάσους αυξάνεται. Ο θερμικός δείκτης αυξάνεται καθώς η ποσότητα της βλάστησης αυξάνεται. Το εδάφους με μαύρο χρώμα δείχνει υψηλή θερμοκρασία. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα χαρακτηριστικά τεσσάρων δεικτών σε σύγκριση με την κατάσταση του δάσους (Jamalabad & Abkar, 2004).



Εικόνα 37 Τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων δεικτών ανάλογα την δασική κατάσταση (Jamalabad & Abkar, 2004)

	Υψηλή δασική πυκνότητα	Χαμηλή δασική πυκνότητα	Χορτολιβαδική	Γυμνό έδαφος
AVI	Υψηλός	Μέτριος	Υψηλός	Χαμηλός
BI	Χαμηλός	Χαμηλός	Χαμηλός	Υψηλός
SI	Υψηλός	Μέτριος	Χαμηλός	Χαμηλός
TI	Χαμηλός	Μέτριος	Μέτριος	Υψηλός

Πίνακας 6 Χαρακτηριστικοί συνδυασμοί τεσσάρων δεικτών



Εικόνα 38 Διάγραμμα ροής υπολογισμού δείκτη FCD (Pladsrichuay, Suwanwerakamtorn, & Pannucharoenwong, 2018)

### Vegetation Index (VI)

Ένας επίσης δημοφιλής δείκτης είναι ο Vegetation Index (VI) (εξειδικευμένος δείκτης βλάστησης), ο οποίος υπολογίζεται από τον τύπο, μετά από κανονικοποίηση των τιμών των ζωνών:

$$VI_{L8} = \sqrt[3]{B5 * (1 - B4) * (B5 - B4)}$$

Όπου Band 5 και Band 4 είναι οι ψηφιακές τιμές του εικονοστοιχείου στο κανάλι του εγγύς υπέρυθρου και του κόκκινου αντίστοιχα. Ο δείκτης VI, παίρνει τιμές μεταξύ -1 και 1. Η μη ύπαρξη πράσινων φύλλων δίνει τιμή μηδέν, ενώ τιμές κοντά στο 1 (0.8 – 0.9) υποδηλώνουν υψηλή πυκνότητα πράσινων φύλλων και οι αρνητικές τιμές αντιπροσωπεύουν κυρίως επιφάνειες νερού ή περιοχές χωρίς βλάστηση (Krishnendu Banerjee, 2014).

### Bare Soil Index (BI)

Η ανακλαστικότητα του γυμνού εδάφους εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του. Τα χαρακτηριστικά του εδάφους εξαρτώνται από τα ορυκτά πετρωμάτα, την οργανική ύλη, την υγρασία, την υφή, τα χημικά συστατικά και από άλλα υλικά που το καλύπτουν. Η ανακλαστικότητα του εδάφους εξαρτάται κυρίως από την υγρασία του εδάφους και από την περιεκτικότητα του σε ιόντα υδροξυλίου. Η υπέρυθρη ακτινοβολία ανακλά λίγο επειδή απορροφάται από την υγρασία του εδάφους (Krishnendu Banerjee, 2014).

Η τιμή του δείκτη βλάστησης δεν είναι τόσο αξιόπιστη σε καταστάσεις όπου η βλάστηση καλύπτει λιγότερο από το μισό της περιοχής. Για μια πιο αξιόπιστη εκτίμηση της κατάστασης της βλάστησης, οι νέες μέθοδοι περιλαμβάνουν και το δείκτη γυμνού εδάφους (BI) που υπολογίζεται με τα κανάλια του μέσου υπέρυθρου. Η λογική αυτής της προσέγγισης βασίζεται στην άμεση σχέση της κατάστασης του γυμνού εδάφους και της κατάστασης της βλάστησης. Συνδυάζοντας τον δείκτη βλάστησης με τον δείκτη γυμνού εδάφους στην ανάλυση, μπορεί κανείς να αξιολογήσει καλύτερα την κατάσταση των δασικών εκτάσεων.

$$BI = \frac{(SWIR + R) - (B + NIR)}{(SWIR + R) + (B + NIR)}$$

Για εικόνες Landsat 8, υπολογίζεται από τον τύπο:

$$BI_{L8} = \frac{(B6 + B4) - (B5 + B2)}{(B6 + B4) + (B5 + B2)}$$

Οι τιμές του BSI κυμαίνονται από 0 έως 200.

Συνδυάζοντας τους δείκτες BSI και AVI, αποκτάται μια συνεχή εικόνα από τη πυκνή βλάστηση μέχρι το εκτεθειμένο έδαφος.

### Shadow Index (SI)

Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό του δάσους είναι η τρισδιάστατη δομή του. Για την εξαγωγή πληροφοριών για τη τρισδιάστατη δομή του, γίνεται χρήση νέων μεθόδων αξιοποιώντας (α) τις φασματικές πληροφορίες της σκιά του δάσους και (β) τις θερμικές πληροφορίες για τα μέρη του δάσους που επηρεάζονται από τη σκιά.

Το μοτίβο της σκιάς της βλάστησης, εξαρτάται από τη διάταξη των δέντρων και των φυτών της δασικής έκτασης. Στην τηλεπισκόπηση, αυτό υπολογίζεται μέσω του δείκτη σκίασης, Shadow Index (SI). Οι τιμές του δείκτη για μικρά δέντρα είναι μικρότερες σε σχέση με τις τιμές των μεγαλύτερων δέντρων. Ο δείκτης SI, προκύπτει από τις μικρές τιμές στα κανάλια του ορατού φάσματος.

### Scaled shadow index (SSI)

Ο δείκτης σκίασης (SI) είναι μια σχετική τιμή. Είναι η κανονικοποιημένη τιμή του SI και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για υπολογισμό της βλάστησης συνδυαστικά με άλλες παραμέτρους. Ο δείκτης SSI αναπτύχθηκε για να συνδυάσει τις τιμές VI και τις τιμές SI. Σε περιοχές όπου η τιμή SSI είναι μηδέν, αυτό αντιστοιχεί σε δάση που έχουν τη λιγότερη σκιά (δηλ. 0%). Σε περιοχές όπου η τιμή SSI είναι 100, αυτό αντιστοιχεί σε δάση που έχουν την υψηλότερη δυνατή τιμή σκιάς (δηλαδή 100%). Λαμβάνεται SSI με γραμμικό μετασχηματισμό του SI.

Για εικόνες Landsat 8:

$$SSI_{LB} = \sqrt[3]{(1 - B2) * (1 - B3) * (1 - B4)}$$

Όπου, B2, B3 και B4 είναι οι κανονικοποιημένες ψηφιακές τιμές του εικονοστοιχείου στο κανάλι του μπλε, του πράσινου και του κόκκινου αντίστοιχα. Όταν η βλάστηση είναι αρκετά πυκνή, ο δείκτης δεν δύναται να υπολογιστεί (Rikimaru A. , 1996).

### Thermal Index (TI)

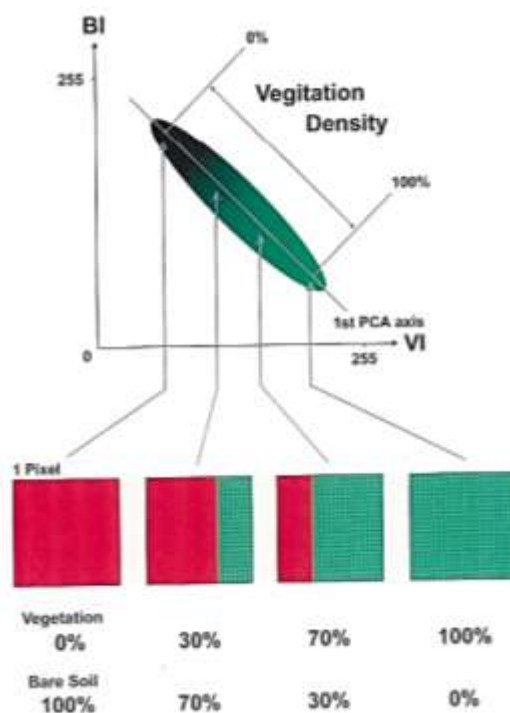
Σε δύο παράγοντες οφείλεται η σχετικά δροσερή θερμοκρασία μέσα σε ένα δάσος. Ο ένας παράγοντας είναι το προστατευτικό αποτέλεσμα του θόλου του δάσους, το οποίο μπλοκάρει και απορροφά την ηλιακή ενέργεια. Ο άλλος παράγοντας είναι η εξάτμιση από την επιφάνεια των φύλλων, η οποία μετράζει τη θέρμανση. Η διαμόρφωση του θερμικού δείκτη βασίζεται σε αυτό το φαινόμενο. Ως πηγή θερμικής πληροφορίας χρησιμοποιείται το υπέρυθρο κανάλι (band 6). Τα δεδομένα θερμοκρασίας έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο για το διαχωρισμό της σκιάς των δέντρων και του εδάφους. Επίσης, οι ψευδέχρωμες εικόνες που παράγονται από τα κανάλια Landsat 4, 3, 2 και 5, 4, 3 παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την κατανομή της δασικής κάλυψης.

$$TI = \text{Calibrated Value of Thermal Band Information}$$



### Vegetation Cover Density (VD)

Συνδυάζοντας τους δείκτες VI και BI προκύπτει ο δείκτης πυκνότητας κάλυψης βλάστησης VD. Ο δείκτης δείχνει ποσοστό βλάστησης σε κάθε εικονοστοιχείο και βαθμονομείται από τη μέγιστη μέχρι την ελάχιστη δασοκάλυψη. Ο δείκτης υπολογίζεται με Ανάλυση κυρίων συνιστωσών (Principal Components Analysis, PCA) οι δείκτες VI και BI έχουν αρνητική συσχέτιση. Στην παρούσα εργασία, για τον υπολογισμό του δείκτη θα χρησιμοποιηθεί το Grass plugin i.pca. Στη συνέχεια μέσω δειγματοληψίας μιας περιοχής άγονου εδάφους, δίνεται μια τιμή που αντιστοιχεί στο 0% και αντίστοιχα δίνεται μια τιμή που θα αντιστοιχεί στο 100% με δειγματοληψία περιοχής πυκνής βλάστησης (Rikimaru, Roy, & Miyatake, Tropical forest cover density mapping, 2002).



Εικόνα 39 Πυκνότητα βλάστησης εικονοστοιχείου (Rikimaru, Roy, & Miyatake, Tropical forest cover density mapping, 2002)

### Ανίχνευσης μαύρου εδάφους




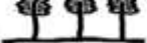


Τα δεδομένα του δείκτη SI εξάγονται από τις περιοχές χαμηλής ακτινοβολίας των ορατών ζωνών. Όταν το έδαφος είναι μαύρο ή φαίνεται μαύρο λόγω των πρόσφατων διατομών και πυρκαγιών, τα χαμηλά δεδομένα ακτινοβολίας ενδέχεται να συγχέουν το φαινόμενο της σκιάς με τις συνθήκες του μαύρου εδάφους. Αυτό συμβαίνει επειδή το μαύρο έδαφος συνήθως έχει υψηλή θερμοκρασία λόγω του υψηλού ρυθμού απορρόφησης ηλιακής ενέργειας. Αλλά, οι σκιές οδηγούν σε μείωση της θερμοκρασίας του εδάφους. Με την επικάλυψη δεδομένων TI και δεδομένων SI αυτή η σύγχυση μπορεί να αποφευχθεί.

*Συνδυασμός δεικτών για τον υπολογισμό του FCD*

Και οι δυο δείκτες, ο δείκτης πυκνότητας βλάστησης (VD) και ο κανονικοποιημένος δείκτης σκίασης (SSI) είναι αδιάστατοι και εκφράζονται με ποσοστό (Rikimaru A. , Concept of FCD Mapping Model and Semi-Expert System, 1999).

Forest Canopy Density:

$$FCD = \sqrt{VD \times SSI} + 1 - 1$$

VD(%)	SSI(%)	FCD(%)	Land Cover
90	90	90	 High Forest
90	50	67	 Young Forest
90	25	47	
90	10	30	 Bush + Tree
50	50	50	 BareSoil + Tree
50	90	67	
20	90	42	 Tree + Slope Shadow
5	90	21	
90	0	0	 Grass land

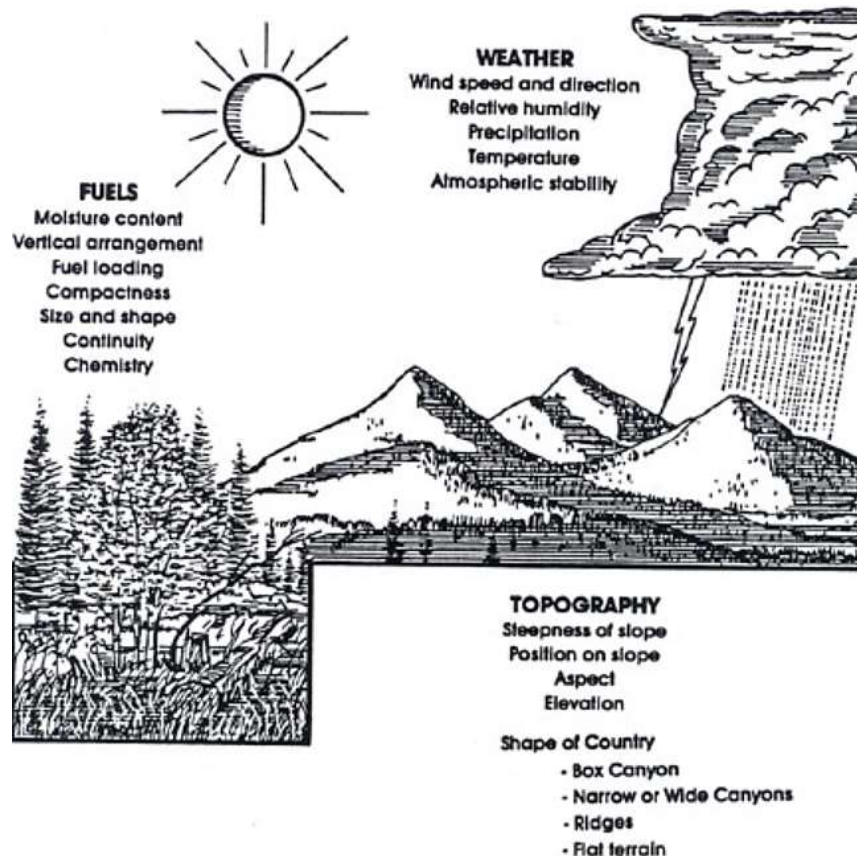
Εικόνα 40 Συνδυασμός δεικτών (Rikimaru A. , Concept of FCD Mapping Model and Semi-Expert System, 1999)

## Δείκτες κινδύνου πυρκαγιάς

Η ξηρασία θεωρείται ένα επαναλαμβανόμενο φαινόμενο που επηρεάζει τα φυσικά οικοσυστήματα, καθώς και πολλούς οικονομικούς και κοινωνικούς τομείς (Heim, 2002). Οι δασικές πυρκαγιές επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από τις καιρικές συνθήκες. Είναι γεγονός ότι οι δασικές πυρκαγιές τείνουν να συγκεντρώνονται κατά τη διάρκεια της ξηρής θερινής περιόδου όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή, η υγρασία του αέρα είναι χαμηλή και η υγρασία της καύσιμης ύλης μειώνεται.

Οι δείκτες κινδύνου πυρκαγιάς έχουν σκοπό να συνδυάσουν τα τοπογραφικά δεδομένα, τους "δυναμικούς" μετεωρολογικούς παράγοντες και τις συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης και να αποδώσουν την πληροφορία σε ένα αριθμό - δείκτη.

Οι δείκτες για την εκτίμηση του κινδύνου εμφάνισης πυρκαγιάς χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τους δείκτες υγρασίας καυσίμου, οι οποίοι αξιολογούν την επικινδυνότητα με βάση την υπάρχουσα υγρασία της καύσιμης ύλης και οι τοπογραφικοί δείκτες, οι οποίοι συνδυάζουν δεδομένα για την βλάστηση, την τοπογραφία της περιοχής και κάποιες φορές και τον ανθρώπινο παράγοντα.



Εικόνα 41 Παράμετροι αξιολόγησης κινδύνου πυρκαγιάς (Auburn University at Montgomery, 2004)

## Δείκτες υγρασίας καυσίμου και αξιολόγηση κινδύνου πυρκαγιάς

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η καλή γνώση του καιρού είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς (Feidas, Noulourouli, & Makrogiannis, 2006). Οι μετεωρολογικές συνθήκες επηρεάζουν την πιθανότητα πυρκαγιάς είτε καθορίζοντας την ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την ανάφλεξη (θερμοκρασία) είτε επηρεάζοντας την κατάσταση υγρασίας της καύσιμης ύλης (ηλιακή ακτινοβολία, βροχόπτωση, σχετική υγρασία αέρα, δροσιά, ηλιακή υγρασία, ταχύτητα ανέμου). Η θερμοκρασία του αέρα, η σχετική υγρασία και η ταχύτητα του ανέμου έχουν χρησιμοποιηθεί ως μεταβλητές εισόδου σε διάφορα συστήματα κινδύνου πυρκαγιάς για την εκτίμηση επικινδυνότητας των μετεωρολογικών συνθηκών (Gouma & Chronopoulou Sereli, 1998). Οι μετεωρολογικές συνθήκες ποικίλλουν ανάλογα με το χρόνο και σε διάρκεια, με αποτέλεσμα την συνεχή μεταβολή των δεικτών και κατ' επέκταση του κινδύνου πυρκαγιάς.

Η περιεκτικότητα της βλάστησης σε υγρασία στις περιοχές που είναι επιρρεπείς σε πυρκαγιά καθορίζει την ευφλεκτότητα της βλάστησης και επομένως την πιθανότητα εκδήλωσης και εξάπλωσης πυρκαγιάς. Θεωρείται ότι όσο πιο ξηρή είναι η βλάστηση, τόσο πιο πιθανό είναι να καεί (Chuvieco, Wildland Fire Danger Estimation and Mapping, 2003). Στη βιβλιογραφία, για τον κίνδυνο δασικών πυρκαγιών, η εκτίμηση της περιεκτικότητας σε υγρασία της καύσιμης ύλης θεωρείται μία από τις βασικές μεταβλητές που επηρεάζουν την ανάφλεξη της φωτιάς αλλά και τη διάδοση της πυρκαγιάς και επομένως χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα αξιολόγησης κινδύνου πυρκαγιάς (Burgan, 1988).

Επίσης, η υγρασία της καύσιμης ύλης θεωρείται μία από τις πιο βασικές παραμέτρους στα συστήματα αξιολόγησης επικινδυνότητας δασικών πυρκαγιών. Δεδομένου ότι οι περισσότερες πυρκαγιές αρχίζουν στο στρώμα του έδαφος του δάσους, απαιτείται μια σειρά μοντέλων για την προσομοίωση της διαδικασίας διαβροχής και ξήρανσης του στρώματος σε μεταβαλλόμενες καιρικές συνθήκες (Venevsky, Sitch, Thonicke, & Cramer, 2002).

Η περιεκτικότητα σε υγρασία του ανώτερου εδάφους, καθώς και η επικάλυψη του δαπέδου, έχει σημαντική επίδραση στην προσπάθεια καταστολής της πυρκαγιάς σε δασικές και άγριες περιοχές (Keetch & Byram, 1968) και είναι βασική μεταβλητή σε πολλά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στη φωτιά (π.χ. δείκτης ξηρασίας Keetch και Byram (KBDI), δείκτης ξηρασίας του καναδικού συστήματος πυρκαγιάς).

Πολλά συστήματα αξιολόγησης κινδύνου πυρκαγιάς υπολογίζουν αρκετούς δείκτες ξηρασίας οι οποίοι στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της υγρασίας της καύσιμης ύλης.

Ο δείκτης ξηρασίας ορίζεται ως ένας αριθμός που αντιπροσωπεύει το καθαρό αποτέλεσμα της εξατμισοδιαπνοής και της καθίζησης για τον υπολογισμό της έλλειψης υγρασίας σε βαθιά ή ανώτερα στρώματα εδάφους. Ο δείκτης ξηρασίας είναι επομένως μια ποσότητα που σχετίζεται με την ευφλεκτότητα οργανικού υλικού στο έδαφος (Keetch & Byram, 1968).

Έχουν αναπτυχθεί πολλοί δείκτες για την εκτίμηση των τύπων και των επιπτώσεων ξηρασίας και έλλειψης υγρασίας (Byun & Wilhite, 1999), (Heim, 2002)). Λόγω της πολυπλοκότητας της ξηρασίας, κανένας μοναδικός δείκτης δεν κατάφερε να περιγράψει επαρκώς την βαθμό και τη

σοβαρότητα της ξηρασίας ή τις πιθανές επιπτώσεις της σε ένα σύνολο συμβάντων πυρκαγιάς (Heim, 2002).

Η Αμερικανική Μετεωρολογική Εταιρεία ομαδοποιεί τους ορισμούς και τύπους της ξηρασίας σε τέσσερις κατηγορίες: μετεωρολογικές ή κλιματολογικές, γεωργικές, υδρολογικές και κοινωνικοοικονομικές (Heim, 2002). Ο πιο γνωστός δείκτης ξηρασίας παγκοσμίως είναι ο Δείκτης Βαρύτητας της Ξηρασίας Palmer (Palmer, 1965), ενώ άλλοι διάσημοι δείκτες είναι ο δείκτης Τυποποιημένης Βροχόπτωσης, ο Δείκτης Βλάστησης και ο Αμερικανικός Δείκτης Παρακολούθησης Ξηρασίας.

Ωστόσο, ορισμένοι δείκτες ξηρασίας χρησιμοποιούνται ως αυτοτελείς δείκτες κινδύνου πυρκαγιάς, ενώ άλλοι συνυπολογίζονται με άλλους παράγοντες ολοκληρωμένα συστήματα αξιολόγησης, όπως ο Καναδικός Δείκτης Δασικών Πυρκαγιών (FWI), το Εθνικό Σύστημα Κινδύνου Πυρκαγιάς (NFDRS) και ο Δείκτης Κινδύνου Δασικών Πυρκαγιών του McArthur.

#### *Weather Danger Index (WDI)*

Ο WDI σχετίζεται με πιθανότητες ανάφλεξης μικρής διάρκειας πυρκαγιών και οφείλεται στις μεταβαλλόμενες συνθήκες της ατμόσφαιρας, που μπορούν να προκαλέσουν αλλαγές στην υγρασία της βλάστησης. Όπως έχει αναφερθεί, οι καιρικές συνθήκες είναι σημαντικές για την εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς και των επιπτώσεων της, παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ταχύτητα ανέμου και η σχετική υγρασία επηρεάζουν την υγρασία της καύσιμης ύλης, την δυνατότητα ανάφλεξης τους, το μήκος της φλόγας αλλά και την ταχύτητα διάδοσης της. Ωστόσο, λόγω των περιορισμένης διαθεσιμότητας στοιχείων για τις καιρικές συνθήκες, ο δείκτης λαμβάνει υπόψη μόνο την ατμοσφαιρική θερμοκρασία του αέρα και τη σχετική υγρασία (Patah, Mansor, & Misran, 2006).

Για τον υπολογισμό του δείκτη WDI χρειάζεται η μέση μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία,  $T_{Max}$ , και η μέση μέγιστη μηνιαία σχετική υγρασία,  $RH_{Max}$ , όπως φαίνεται στον ακόλουθο τύπο (Castro & Chuvieco, 2008):

$$WDI = (T_{Max} / RH_{Max}) * 100$$

Οι τιμές των  $T_{max}$  και  $RH_{Max}$  κλιμακώνονται σε τιμές από 0 έως 100 .

Με την εξίσωση αυτή υπολογίζουμε τον δείκτη WDI, στηριζόμενοι σε μια pixel προς pixel βάση των συστημάτων GIS. Οι τιμές του δείκτη που προκύπτουν ομαδοποιούνται σε πέντε κλάσεις:

<b>WDI</b>	<b>Κίνδυνος πυρκαγιάς</b>
1-10	Κανένας
41-49	Χαμηλός
50-57	Μέσος
58-65	Υψηλός
66+	Πολύ υψηλός

Πίνακας 7 Κλίμακες κινδύνου δείκτη WDI (Patah, Mansor, & Misran, 2006).

### Forest Risk Index (FRI)

Ο υπολογισμός του Forest Risk Index (FRI) βασίζεται σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα, είναι συνδυασμός του τύπου καύσιμης ύλης και της μορφολογίας του εδάφους. Η δεύτερη συνιστώσα είναι δυναμική και καθορίζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες συνυπολογίζοντας τον άνεμο, την θερμοκρασία και την βροχόπτωση. Κατά συνέπεια, ο FRI υπολογίζεται με την πρόσθεση των δεικτών WDI και FHI: (Patah, Mansor, & Misran, 2006)

$$FRI = WDI + FHI$$

Ο δείκτης FRI μεταβάλλεται εύκολα ανάλογα μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν αλλά και με πιθανώς καθημερινές αλλαγές του σχεδίου πυροπροστασίας.

### Fuel moisture index (FMI)

Ο δείκτης Fuel Moisture Index (FMI) είναι αρκετά απλός και για τον υπολογισμό του χρειάζεται μόνο η θερμοκρασία του αέρα και η σχετική υγρασία. Δεν υπάρχει ταξινόμηση κινδύνου πυρκαγιάς για αυτόν τον δείκτη. Όσο μικρότερος είναι ο αριθμός, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος πυρκαγιάς (Sharples, McRae, Weber, & Gill, 2009). Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$FMI = 10 - 0.25 (T - H)$$

Όπου H (%) είναι η σχετική υγρασία και T η θερμοκρασία (°C).

### Nesterov Index (NI)

Ο δείκτης Nesterov είναι ένας εμπειρικός δείκτης ξηρασίας που συσχετίζει τη σχέση μεταξύ πυρκαγιάς και καιρού βάσει ιστορικών δεδομένων. Χρησιμοποιείται ευρέως στη Ρωσία και σε άλλα μέρη της πρώην Σοβιετικής Ένωσης (Groisman, et al., 2004). Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$NI = \sum_{i=1}^W T_i \cdot (T_i - D_i)$$

Όπου T η θερμοκρασία (°C), D η θερμοκρασία σημείου δρόσου (°C) και W ο αριθμός ημερών από την τελευταία βροχόπτωση (> 3 mm). Βροχοπτώσεις πάνω από 3 mm επαναφέρουν τον δείκτη NI στο μηδέν. Είναι ένας συσσωρευτικός δείκτης και απεικονίζει το δυναμικό αποξήρανσης για τα καύσιμα. Υψηλές τιμές του δείκτη υποδηλώνουν μεγάλες περιόδους χωρίς βροχή. Για την Κεντρική Ρωσία, οι ημέρες με NI κάτω από 300 είναι οι ημέρες χωρίς σημαντικό κίνδυνο δασικής πυρκαγιάς, ενώ οι ημέρες με NI πάνω από 1000 χαρακτηρίζονται ως ημέρες με υψηλό κίνδυνο δασικής πυρκαγιάς.

N Value	Fire Risk
N<300	no fire risk
301<N<1,000	low risk
1,001<N<4,000	medium risk
4,001<N<10,000	high risk
N>10,001	extremely high risk

Πίνακας 8 Ταξινόμηση κινδύνου πυρκαγιάς με βάση τον δείκτη NI (Groisman, et al., 2004)

### Modified Nesterov Index (MNI)

Ο τροποποιημένος δείκτης Nesterov είναι ο δείκτης Nesterov με ένα συντελεστή μείωσης παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιείται από τον δείκτη Zhdanko (Groisman, et al., 2004). Ο δείκτης υπολογίζεται ως εξής:

$$MNI = K \sum_{i=1}^W T_i \cdot (T_i - D_i)$$

Όπου T η θερμοκρασία (°C), D η θερμοκρασία σημείου δρόσου (°C), W ο αριθμός ημερών από την τελευταία βροχόπτωση (> 3 mm) και ο συντελεστής K ανάλογα την τρέχουσα βροχόπτωση παίρνει τις ακόλουθες τιμές:

R (mm)	0	0.1-0.9	1.0-2.9	3.0-5.9	6.0-14.9	15.0-19.0	>19
K	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0

Πίνακας 9 Τιμές συντελεστή K ανάλογα το επίπεδο της βροχόπτωσης για τον δείκτη Nesterov (Groisman, et al., 2004)

Και ο κίνδυνος πυρκαγιάς ταξινομείται στις ακόλουθες 5 κλάσεις:

N Value	Fire Risk
100<MNI<1000	very low risk
1001< MNI <2500	low risk
2501< MNI <5000	medium risk
45001< MNI <10000	high risk
MNI >10001	extremely high risk

Πίνακας 10 Ταξινόμηση κινδύνου πυρκαγιάς με βάση τον δείκτη MNI (Groisman, et al., 2004)

### Zhdanko index (Zh)

Ο Zhdanko (1965) πρότεινε έναν δείκτη πιθανού κινδύνου δασικής πυρκαγιάς για τη την εποχή χωρίς χιόνι, η οποία είναι παρόμοια με τον δείκτη Nesterov (Groisman, et al., 2004). Ο δείκτης υπολογίζεται ως εξής:

$$Zh(N) = [Zh(N - 1) + d] \cdot K(N)$$

Όπου d είναι το έλλειμμα σημείου δρόσου και το K (N) είναι ένας συντελεστής κλίμακας με τιμές στο διάστημα [0,1] που προσαρμόζει τον δείκτη όταν εμφανίζεται βροχόπτωση την ημέρα N. Αυτός ο συντελεστής μείωσης είναι ίσος με 1 όταν δεν σημειώνεται βροχόπτωση και ισούται με 0 όταν οι ημερήσιες βροχοπτώσεις είναι πάνω από 20 mm. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο δείκτης Nesterov υποθέτει ότι το K (N) = 0 για μικρές βροχοπτώσεις (3 mm) χωρίς να υπολογίζεται το επίπεδο των ξηρών συνθηκών πριν από αυτό το συμβάν.

<b>R (mm)</b>	0	0.1-0.9	1.0-.2.9	3.0-5.9	6.0-14.9	15.0-19.0	>19
<b>K</b>	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0

Πίνακας 11 Τιμές συντελεστή K ανάλογα το επίπεδο της βροχόπτωσης για τον δείκτη Zhdanko (Groisman, et al., 2004)

#### Angstrom index (AI)

Είναι ένας εμπειρικός δείκτης ξηρασίας που χρησιμοποιείται στην εκτίμηση κινδύνου πυρκαγιάς. Αναπτύχθηκε στη Σουηδία και χρησιμοποιήθηκε σε όλη τη Σκανδιναβική χερσόνησο. Επίσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη Baumgartner που χρησιμοποιήθηκε στη Γερμανία. Για τον υπολογισμό του χρειάζεται η θερμοκρασία του αέρα και η σχετική υγρασία και δεν λαμβάνει υπόψιν του την υγρασία της καύσιμης ύλης. Όσο μικρότερος είναι ο δείκτης, τόσο μεγαλύτερος είναι ο κίνδυνος πυρκαγιάς.

$$\text{Angstrom Index} = (H / 20) + ((27 - T) / 10)$$

Όπου H (%) είναι η σχετική υγρασία και T η θερμοκρασία (°C).

Angstrom Index value	Βαθμός Κινδύνου
> 4	Απίθανη εμφάνιση πυρκαγιάς
4 - 2.5	Δυσμενείς συνθήκες φωτιάς
2.5 - 2	Ευνοϊκές συνθήκες φωτιάς
< 2	Πιθανότητα πυρκαγιάς

Πίνακας 12 Κατηγορίες κινδύνου του δείκτη Angstrom (Tošić, et al., 2019).

#### Baumgartner Index (BI)

Αυτός ο δείκτης χρησιμοποιείται στη Γερμανία (Skvarenina, Mindas, Holec, & Tucek, 2003). Ο υπολογισμός του δείκτη βασίζεται στην ποσότητα του συσσωρευμένου ύψους βροχόπτωσης και στην πιθανή εξατμισοδιαπνοή με την ακόλουθη εξίσωση:

$$BI = P - PE \text{ (sum of 5 days)}$$

Όπου P η βροχόπτωση (mm) και PE (πιθανή εξατμισοδιαπνοή)

Ο κίνδυνος πυρκαγιάς ταξινομείται στις εξής κλάσεις:

Fire risk classes/Month	1	2	3	4	5
	(mm)				
March	+5>	+5 to -3	-3 to -9	-9 to -15	-15<
April	+3>	+3 to -8	-8 to -16	-16 to -27	-27<



May	-3>	-3 to -16	-16 to -25	-25 to -35	-35<
June	-12>	-12 to -24	-24 to -32	-32 to -41	-41<
July	-12>	-12 to -24	-24 to -31	-31 to -40	-40<
August	-8>	-8 to -20	-20 to -28	-28 to -37	-37<
September	-6>	-6 to -18	-18 to -26	-26 to -35	-35<
October	-6>	-6 to -18	-18 to -26	-26 to -35	-35<

Πίνακας 13 Ταξινόμηση επικινδυνότητας πυρκαγιάς για τον Baumgartner Index (Fire Wiki, 2020)

#### Portuguese Index (PI)

Ο δείκτης PI αναπτύχθηκε από το εθνικό ινστιτούτο μετεωρολογίας και γεωφυσικής της Πορτογαλίας το 1989 και αποτελεί μια τροποποιημένη εκδοχή του δείκτη Nesterov. Για τον υπολογισμό του χρειάζεται η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία στις 12.00 UTC. Η ταχύτητα του ανέμου λαμβάνεται υπόψη στην τελική ταξινόμηση ανάλογα με τις συνθήκες στην περιοχή μελέτης.

Υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$I(i) = T(i) [T(i) - T_d(i)]$$

$$B(I - 1) = r \sum_{k=1}^{I} I_k$$

$$I_{fa}(i) = I(i) + B(i - 1)$$

Όπου T η θερμοκρασία (°C), T<sub>d</sub> το σημείο δρόσου (%), I δείκτης ανάφλεξης, i η μέρα του υπολογισμού, r συντελεστής διόρθωσης ανάλογα τη βροχόπτωση.

r	Βροχόπτωση το προηγούμενο 24ωρο (mm)
1	0 – 1
0.8	1 – 2
0.6	2 – 3
0.4	3 – 4
0.2	4 – 10
0.1	10+

Πίνακας 14 Τιμές συντελεστή διόρθωσης ανάλογα το επίπεδο βροχόπτωσης για τον Portuguese Index (Fire Wiki, 2020)

$I_{fa}$	Ταχύτητα ανέμου (km/h)
-	0 – 10
+1	10 – 15
+2	15 – 20
+3	20 – 30
+4	30 – 40
+5	40+

Πίνακας 15 Τιμές συντελεστή  $I_{fa}$  ανάλογα την ταχύτητα του ανέμου για τον Portuguese Index (Fire Wiki, 2020)

Portuguese Index	Fire Danger rating
0 – 6	Very low
6 – 7	Low
7 – 8	Moderate
8 – 14	High
14 +	Very High

Πίνακας 16 Ταξινόμηση επικινδυνότητας για τον δείκτη PI (Fire Wiki, 2020)

#### Keetch-Byram Drought Index (KBDI)

Ο δείκτης ξηρασίας KBDI αναπτύχθηκε από Keetch και Byram (Keetch & Byram, 1968) για χρήση από τους αρμόδιους φορείς και είναι πιθανώς ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος παγκοσμίως στην παρακολούθηση και πρόβλεψη πυρκαγιών (Heim, 2002). Αυτός ο δείκτης αναπτύχθηκε και χρησιμοποιείται στις Η.Π.Α., αλλά ενσωματώθηκε και χρησιμοποιήθηκε σε άλλα συστήματα, όπως στον Δείκτη Ασφαλείας Πυρκαγιάς McArthur (FDI).

Ο δείκτης KBDI δίνεται από τον τύπο:

$$dQ = \frac{(203.2 - Q)[0.968 \exp(0.0875T + 1.5552) - 8.30] d_{\tau}}{1 + 10.88 \exp(-0.001736R)} \cdot 10^{-3}$$

$$KBDI_t = KBDI_{t-1} + dQ$$

όπου  $dQ$  είναι ο Draugh Factor (mm),  $Q$  η τιμή του δείκτη KBDI για την προηγούμενη μέρα ή η μείωση της ημερήσιας βροχόπτωσης (mm),  $T$  η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία (°C),  $R$  η ετήσια μέση τιμή βροχόπτωσης (mm) και  $d_{\tau}$  το βήμα της υπολογιστικής διαδικασίας, συνήθως μια μέρα) (Alexander, 1990).

KBDI range	General description	Forest fire potential
0-150	Upper soil and surface litter are wet	Fire potential is minimal
150-300	Upper soil and surface litter are moist and on not contribute to fire intensity	Fire behaviour is predictable
300-500	Upper soil and surface litter are dry and may contribute to fire intensity	Fire behaviour is somewhat predictable

500-700	Upper soil and surface litter are very dry. Surface litter and organic soil material contribute to fire intensity	Fire suppression is a significant undertaking
700-800	Upper soil and surface litter are extremely dry. Live understory vegetation burns actively and contributes to fire potential	Fire behaviour is unpredictable

Πίνακας 17 Γενική περιγραφή των συνθηκών υγρασίας και πιθανότητα εμφάνισης πυρκαγιάς με βάση τις τιμές του δείκτη KBDI (Janis, Johnson, & Forthun, 2002).

Ο δείκτης KBDI έχει δοκιμαστεί επιτυχώς στα νησιά της Χαβάης (Dolling, Chu, & Fujioka, 2005) αλλά και στις ελληνικές συνθήκες (Κρήτη) εξετάζοντας τη σχέση του δείκτη με την υγρασία της χλόης και των ανώτερων στρωμάτων εδάφους (Dimitrakopoulos & Bemmerzouk, 2002).

Επίσης, έγινε σύγκριση με τους δορυφορικούς δείκτες (NDVI & NDWI) για την εκτίμηση κινδύνου πυρκαγιάς στα οικοσυστήματα σαβάνας στη Νότια Αφρική και αποδείχθηκε ότι ο δείκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της πυρκαγιάς (Verbesselt, Lhermitte, Jonsson, & van Aardt, 2006).

#### McArthur Forest Fire Danger Index (FFDI)

Για τον υπολογισμό του δείκτη FFDI, απαιτείται η θερμοκρασία  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), η ταχύτητα του ανέμου  $v$  (km/h), η σχετική υγρασία  $RH$  (%), και ο υπολογισμός της μεταβλητής  $DF$  (Draugh Factor) που εκπροσωπεί την διαθεσιμότητα της καύσιμης ύλης (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009):

$$FFDI = 2e^{(0.45+0.987 \ln(DF)-0.0345RH+0.0338T+0.0234v)}$$

Η μεταβλητή  $DF$ , παίρνει τιμές από 0 έως 10 και δείχνει την επίδραση του καιρού στη διαθέσιμη καύσιμη ύλη. Ο δείκτης  $DF$ , βασίζεται εν μέρη, στην έλλειψη υγρασίας του εδάφους και υπολογίζεται συνήθως μέσω των δεικτών Keetch-Byram Drought Index (KBDI) και Mount's Soil Dryness Index (SDI).

Ο δείκτης FFDI έχει κατηγορίες ταξινόμησης όπως φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα:

Fire Danger Rating	FFDI range for forests
Low	0-5
Moderate	5-12
High	12-24
Very High	24-50
Severe	50-74
Extreme	75-99
Catastrophic	100+

Πίνακας 18 Ταξινόμηση επικινδυνότητας του δείκτη FFDI (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009)

### Fire Danger Index (FDI)

Δεδομένου ότι η καύσιμη ύλη με χαμηλή περιεκτικότητα υγρασίας καίγεται πιο εύκολα σε σχέση με την ίδια καύσιμη ύλη με περισσότερη περιεκτικότητα σε υγρασία, ο Sharples (Sharples, Weber, McRae, & Gill, 2009) πρότεινε τον δείκτη FMI (Fuel Moisture Index) για τον υπολογισμό της υγρασίας της νεκρής καύσιμης ύλης. Ο δείκτης FMI, υπολογίζεται με βάση την θερμοκρασία (T) και την σχετική υγρασία (H).

$$FMI = 10 - 0.25 (T - H)$$

Επίσης, συνεκτιμώντας την επίδραση της ταχύτητας του ανέμου (U) στην υγρασία της καύσιμης ύλης πρότεινε τον δείκτη FDI (Fire Danger Index):

$$FDI = \frac{\max(U_0, U)}{FMI}$$

Όπου  $U_0$  είναι μια ελάχιστη ταχύτητα (1 km/h) για να μην μηδενίζει ο δείκτης.

### Fosberg Fire Weather Index (FFWI)

Ο δείκτης Fosberg Fire Weather Index (FFWI) (Fosberg, 1978), είναι ένας δείκτης πυρκαγιάς που δημιουργήθηκε για να μετρήσει την πιθανή επίδραση του καιρού σε μια πυρκαγιά με βάση την απόδοση του μοντέλου της θερμοκρασίας, του ανέμου και της σχετικής υγρασίας. Ο δείκτης αντιπροσωπεύει το αναμενόμενο μήκος φλόγας και την ξήρανση καυσίμων με βάση το μοντέλο θερμοκρασίας, ανέμου και υγρασίας. Μεγάλες τιμές του FFWI συνεπάγονται υψηλά μήκη φλόγας και ταχεία ξήρανση. Οι τιμές σχεδιάστηκαν έτσι ώστε όταν ο δείκτης έχει τιμή 100, η περιεκτικότητα σε υγρασία να είναι 0 και η ταχύτητα του ανέμου 30 mph. Οι μεγαλύτεροι συνδυασμοί αυτών των τιμών εξακολουθούν να έχουν δείκτη 100. Ο δείκτης βασίζεται μόνο στις καιρικές συνθήκες και δεν λαμβάνει υπόψη του το είδος της καύσιμης ύλης.

Ο δείκτης Fosberg, δημιουργήθηκε για να καλύψει τις ανάγκες διαχείρισης και έγκαιρης αντιμετώπισης της πυρκαγιάς σε σύντομο χρονικό διάστημα δεδομένου των περιβαλλοντικών καιρικών συνθηκών.

Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$FFWI = \eta \sqrt{1 + U^2} / 0.03002$$
$$\eta = 1 - 2 \left(\frac{m}{30}\right) + 1.5 \left(\frac{m}{30}\right)^2 - 0.5 \left(\frac{m}{30}\right)^3$$
$$m = \begin{cases} 0.03 + 0.266H - 0.00104HT, & H < 10 \\ 1.76 + 0.1601H - 0.0266T, & 10 \leq H \leq 50 \\ 21.06 - 0.4944H + 0.005565H^2 - 0.00063HT, & H \geq 50 \end{cases}$$

όπου  $\eta$  είναι ο παράγοντας της υγρασίας,  $m$  είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία στο σημείο ισορροπίας,  $T$  είναι η θερμοκρασία (°F),  $H$  είναι η σχετική υγρασία (%) και  $U$  είναι η ταχύτητα του ανέμου (mph). Λόγω της εξάρτησης του δείκτη από την ταχύτητα του ανέμου, παρουσιάζει υψηλότερες τιμές τη χειμερινή από την θερινή περίοδο (Goodrick, 2002).

### Modified Fosberg Fire Weather Index (mFFWI)

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, ο δείκτης FFWI εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση της καύσιμης ύλης. Αυτή την αδυναμία του δείκτη προσπάθησε να εξαλείψει ο Goodrick (Goodrick, 2002) εισάγοντας τον παράγοντα FAF (Fuel Availability Factor), ο οποίος υπολογίζεται με τη βοήθεια του δείκτη ξήρανσης KBDI.

Ο δείκτης mFFWI υπολογίζεται από τον τύπο:

$$mFFWI = FAF \cdot FFWI$$
$$FAF = 0.000002 KBDI^2 + 0.72$$

Ο δείκτης mFFWI παρουσιάζει αρκετά καλύτερα αποτελέσματα δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψη του και την κατάσταση της καύσιμης ύλης.

### Integrated Fire Index (IFI)

Το IFI είναι ένας δείκτης που λαμβάνει υπόψη τα χαρακτηριστικά του κλίματος και της βλάστησης των μεσογειακών περιοχών. Χρησιμοποιείται καθημερινά στη Σαρδηνία από την Υπηρεσία Πολιτικής Προστασίας για την πρόβλεψη πυρκαγιάς. Το IFI είναι ένας εμπειρικός δείκτης κινδύνου πυρκαγιάς που βασίζεται στην εκτίμηση υγρασίας τριών κατηγοριών δασικών καυσίμων και καταγράφει επίσης την επίδραση του ανέμου στη συμπεριφορά της φωτιάς. Η ημερήσια τιμή δείκτη λαμβάνεται ως άθροισμα τεσσάρων υποσυστημάτων :

$$IFI = DC + MC + R + FC$$

όπου DC είναι ο παράγοντας ξηρασίας, ο MC είναι ο μετεωρολογικός παράγοντας, ο R είναι ο παράγοντας που σχετίζεται με την ηλιακή ακτινοβολία και ο FC είναι ο παράγοντας της καύσιμης ύλης. Ο DC αντιπροσωπεύει μια παραμετροποίηση του υδάτινου ισοζυγίου (Costantino, Arca, Salis, & Duce, 2018):

$$DC = \frac{e^{(0.261 \frac{R_g T}{\lambda})}}{1 + \sqrt{P_a} + \sqrt[3]{P_{c100}}}$$

όπου  $R_g$  είναι η παγκόσμια καθημερινή ακτινοβολία (σε  $Wm^{-2}$ ),  $T$  είναι η μέση ημερήσια θερμοκρασία αέρα ( $^{\circ}C$ ),  $\lambda$  είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσσης ( $Jg^{-1}$ ),  $P_a$  είναι η ημερήσια βροχόπτωση (mm) και το  $P_{c100}$  είναι η βροχόπτωση των τελευταίων 4 ημερών (mm).

Στον τύπο υπολογισμού του παράγοντα DC, ο αριθμητής είναι ένα απλό μοντέλο του ποσοστού εξατμισοδιαπνοής. Υπολογίζει κατά προσέγγιση την περιεκτικότητα της καύσιμης ύλης σε υγρασία. Οι τιμές DC κυμαίνονται από 0,1 (χαμηλές συνθήκες κινδύνου) έως 5 (υψηλές συνθήκες κινδύνου). Τιμές DC χαμηλότερες από 0,1 θεωρούνται ίσες με 0,1 και αντίστοιχα τιμές DC υψηλότερες από 5 θεωρούνται ίσες με 5.

Ο παράγοντας MC συνυπολογίζει τις μετεωρολογικές συνθήκες που ευνοούν τη διάδοση της πυρκαγιάς στη διάρκεια της ημέρας.

$$MC = 0.14 [e^{0.0625T_x} + e^{0.1WS} + e^{-0.062RH_n}]$$

όπου  $T_x$  είναι η μέγιστη ημερήσια θερμοκρασία του αέρα ( $^{\circ}C$ ),  $WS$  είναι ο μέγιστη ημερήσια ταχύτητα ανέμου ( $km/h$ ),  $RH_n$  είναι η ελάχιστη ημερήσια θερμοκρασία αέρα. Το  $MC$  κυμαίνεται από 0,4 έως 5 (χαμηλές και μέγιστες συνθήκες πυρκαγιάς αντίστοιχα). Οι τιμές  $MC$  που είναι μικρότερες από 0,4 θεωρούνται ίσες με 0,4 και οι τιμές  $MC$  που είναι μεγαλύτερες από 5 θεωρούνται ίσες με 5.

Ο παράγοντας  $R$  είναι ένας συντελεστής που αντιστοιχεί στη μέγιστη ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία  $RS_x$ , εάν  $RS_x < 400 Wm^{-2}$  τότε  $R = 0.24$ , εάν  $400 Wm^{-2} \leq RS_x \leq 800 Wm^{-2}$ , τότε  $R = 0.32$  και τέλος, εάν  $RS_x > 800 Wm^{-2}$ , τότε  $R = 1$ .

Ο παράγοντας  $FC$  σχετίζεται με τη δομική και τη φυσική χαρακτηριστικά των καυσίμων και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$FC = LAI \cdot LAD \cdot DW$$

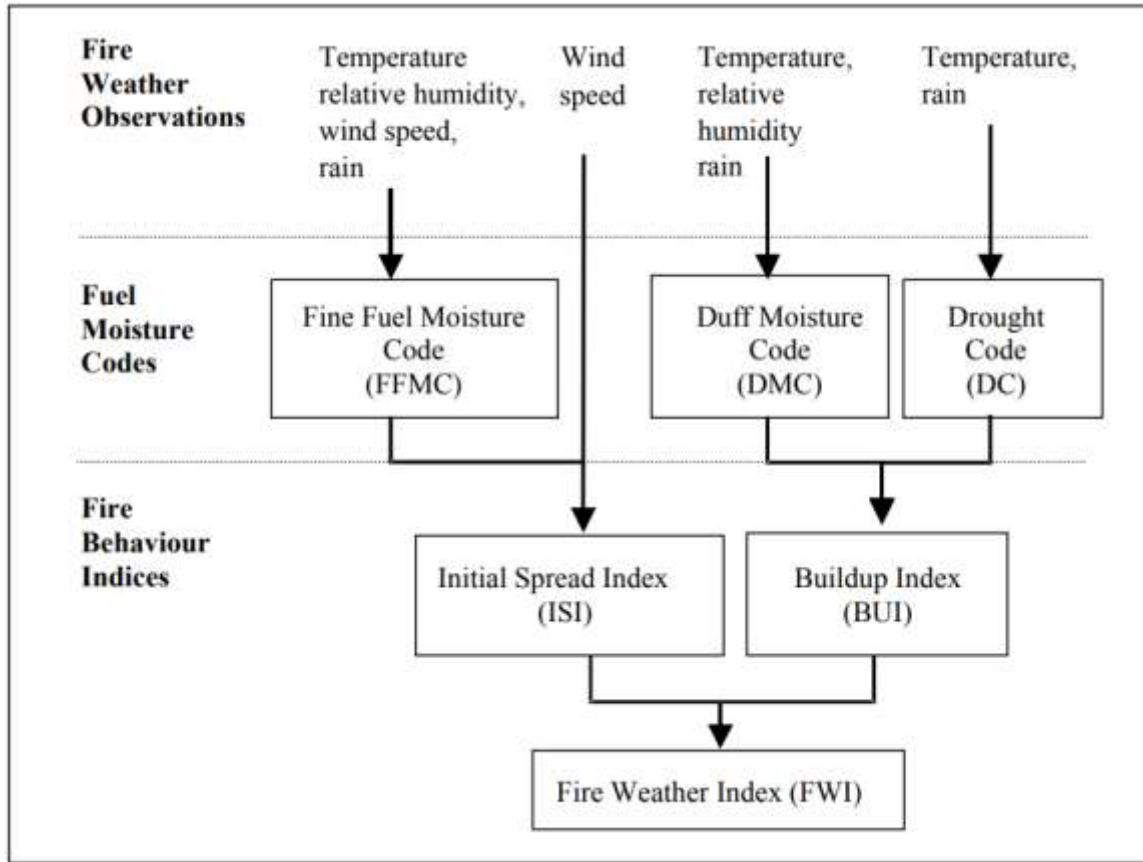
όπου  $LAI$  (Leaf Area Index) είναι ο δείκτης επιφάνειας φυλλώματος, Το  $LAD$  (Leaf Area Density) είναι ο δείκτης πυκνότητας φυλλώματος ( $= m^2$  του φυλλώματος  $m^{-3}$ ),  $DW$  είναι η περιεκτικότητα σε υγρασία του καυσίμου εκφρασμένη ως ποσοστό του βάρους του φρέσκου νωπού καυσίμου (0 για 100% νερό, 1 για 0% νερό).

Η ημερήσια τιμή  $IFI$  κυμαίνεται από 1,05 (χαμηλότερη τιμή  $IFI$  για λιβάδια) έως 13.

#### *Canadian Forest Fire Weather Index (FWI)*

Ο δείκτης  $FWI$  βασίζεται στις επιπτώσεις του καιρού στις συνθήκες υγρασίας της επιφάνειας του φυλλοστρώματος του δάσους και στη συμπεριφορά κατά της πυρκαγιάς του πεύκου. Απαιτεί βαθμονόμηση των ορίων ταξινόμησης ώστε να ανταποκρίνεται στις τοπικές κλιματικές συνθήκες κάτι που επιτυγχάνεται μέσω της ανάλυσης των ιστορικών δεδομένων για την περιοχή.

Η μέθοδος υπολογισμού του δείκτη  $FWI$  απαιτεί καθημερινή καταγραφή (στις 12 το μεσημέρι) της ταχύτητας του ανέμου, της θερμοκρασίας του αέρα, της σχετικής υγρασίας, της βροχής των τελευταίων 24 ωρών (Viegas, Bovio, Ferreira, & Nosenzo, 1999).



Εικόνα 42 Διάγραμμα υπολογισμού δείκτη FWI (Wagner, 1974)

Οι μετεωρολογικές παρατηρήσεις είναι οι τιμές εισόδου για των υπολογισμό των τριών κωδικών υγρασίας. Οι κωδικοί αυτοί εκπροσωπούν τις τρεις κατηγορίες καύσιμης ύλης σε ένα δάσος. Κάθε μια κατηγορία καύσιμης ύλης έχει διαφορετικές τιμές αφύγρανσης, διαφορετικό βάθος καυσίμου και διαφορετικό φορτίο καυσίμου.

Fuel Moisture Code	Time lag (days)	Water capacity (mm)	Nominal fuel depth (cm)	Nominal fuel load (kg m <sup>-2</sup> )
FFMC	2/3	0,6	1,2	0,25
DMC	12	15	7	5
DC	52	100	18	25

Πίνακας 19 Χαρακτηριστικά των τριών τύπων καυσίμου (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009)

Οι τρεις κωδικοί υγρασίας της καύσιμης ύλης υπολογίζονται κάθε ημέρα, και στην τιμή εισόδου της θερμοκρασίας μιας ημέρας συμπεριλαμβάνονται και οι τιμές των προηγούμενων ημερών. Ένα μέτρο του ρυθμού ξήρανσης είναι ο χρόνος που απαιτείται για να χάσει η καύσιμη ύλη το  $1 - e^{-1}$  (περίπου τα 2/3) της επιπλέον υγρασίας πέραν του σημείου ισορροπίας.

Ο δείκτης FWI, απαιτεί τον υπολογισμό δυο ενδιάμεσων δεικτών συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, του ISI (Initial Spread Index) και του BUI (Buildup Index). Ο δείκτης ISI δίνει μια εκτίμηση της επίδρασης της ταχύτητας του ανέμου και του FFMC στην εξάπλωση της πυρκαγιάς. Ο δείκτης ISI

είναι μια εκθετική συνάρτηση η οποία διπλασιάζει τον FWI για κάθε αύξηση στην ταχύτητα του ανέμου κατά 20 km/h. Ο δείκτης BUI είναι ένας συνδυασμός των καυσίμων DMC και DC, υποδεικνύοντας την διαθεσιμότητα μεγαλύτερης σε διαστάσεις καύσιμης ύλης. Οι δυο δείκτες ISI και BUI, συνδυάζονται για να υπολογιστεί ο δείκτης FWI, που δείχνει το μέγιστο της έντασης της εξάπλωσης της πυρκαγιάς ως ρυθμό της ενέργειας που καταναλώνεται ανά μονάδα μήκους εξάπλωσης του πύρινου μετώπου (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009).

Πιο αναλυτικά:

#### Fine Fuel Moisture Code (FFMC)

Ο κωδικός FFMC αντιπροσωπεύει την περιεκτικότητα σε υγρασία της λεπτής καύσιμης ύλης και παίρνει τιμές μεταξύ 0 (μέγιστη υγρασία) και 101 (ελάχιστη υγρασία). Αντιπροσωπεύει την υγρασία του ανώτατου στρώματος εδάφους σε ένα πευκοδάσος με βάθος περίπου 1,2 cm. Το FFMC υπολογίζεται από δεδομένα βροχής, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας ανέμου και θερμοκρασίας. Η περιεκτικότητα σε υγρασία  $m$ , για τη λεπτή καύσιμη ύλη, κυμαίνεται μεταξύ 0 (ξηρή) και 250 (βρεγμένη) και χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του δείκτη FFMC (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009):

$$FFMC = 59.5 \frac{250 - m}{147.2 + m}$$

Όπου η περιεκτικότητα σε υγρασία  $m$ , υπολογίζεται αφού πρώτα γίνει εκτίμηση της χθεσινής τιμής  $m_0$  συνυπολογίζοντας την βροχόπτωση, την ατμοσφαιρική υγρασία και την ξηρασία του αέρα.

#### **Η επίδραση της υγρασίας μέσω βροχής:**

Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$m_0 = 147.2 \frac{101 - FFMC_0}{59.5 + FFMC_0}$$

Όπου  $FFMC_0$  είναι η προηγούμενη τιμή του δείκτη.

Για τα πρώτα 0.5 mm βροχόπτωσης  $R$  (Rainfall), θεωρείται ότι η πορεία της βροχής διακόπτεται από το φύλλωμα του δάσους. Συνεπώς αν η βροχόπτωση είναι λιγότερη από 0.5 mm, θεωρείται ότι η συμβολή της βροχόπτωσης στην υγρασία της καύσιμης ύλης είναι μηδέν ( $R_{eff}$ ), αλλιώς υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$R_{eff} = R - 0.5$$

Συνεπώς, η τελική τιμή της υγρασίας δίνεται από τον τύπο:

$$m_r = m_0 + 42.5 R_{eff} e^{-\frac{100}{251 - m_0}} (1 - e^{-6.93/R_{eff}})$$

Για μεγάλες τιμές υγρασίας ( $m_0 > 150$ ), η τελική τιμή  $m_r$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$m_r = m_0 + 42.5 R_{eff} e^{-\frac{100}{251 - m_0}} \left( 1 - e^{-\frac{6.93}{R_{eff}}} \right) + 0.0015 (m_0 - 150)^2 \sqrt{R_{eff}}$$



η τελική τιμή της υγρασίας  $m_r$  παίρνει τιμές:

$$0 < m_r < 250$$

### **Η επίδραση της ατμοσφαιρικής υγρασίας ή ξηρασίας**

Η ατμοσφαιρική ξήρανση ή διαβροχή της λεπτής καύσιμης ύλης προσδιορίζεται μέσω των συντελεστών διάχυσης ξήρανσης και διαβροχής. Οι συντελεστές εκφράζουν τον ρυθμό της μεταβολής της υγρασίας της καύσιμης ύλης σε σχέση με την αρχική της τιμή λόγω της ξήρανσης ή διαβροχής. Οι συντελεστές διάχυσης ξήρανσης/διαβροχής, είναι συναρτήσεις της σχετικής υγρασίας RH (%), της θερμοκρασίας T (°C) και της ταχύτητας του ανέμου v (km/h).

*Ατμοσφαιρική ξηρασία:*

Ο λογαριθμικός συντελεστής ξήρανσης,  $k_d$ , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$k_d = 0.581 e^{0.0365T} \left\{ 0.424 \left[ 1 - \left( \frac{RH}{100} \right)^{1.7} \right] + 0.0694 \sqrt{v} \left[ 1 - \left( \frac{RH}{100} \right)^8 \right] \right\}$$

Το περιεχόμενο σε υγρασία λόγω ξήρανσης (drying equilibrium moisture content),  $E_d$ , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E_d = 0.942 RH^{0.679} + 11 e^{(RH-100)/10} + 0.18 (21.1 - T)(1 - e^{-0.115RH})$$

Όπου T, είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας το μεσημέρι, και η επίδραση της υπολογίζεται σε σχέση με μια θερμοκρασία αναφοράς 21.1 °C.

*Ατμοσφαιρική υγρασία:*

Η μεταβλητή  $k_w$  περιγράφει την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία της λεπτής καύσιμης ύλης λόγω απορρόφησης της ατμοσφαιρικής υγρασίας και διαφέρει από την αύξηση της υγρασίας μέσω της άμεσης διαβροχής με βροχόπτωση.

Ο λογαριθμικός συντελεστής ύγρυνσης,  $k_w$ , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$k_w = 0.581 e^{0.0365T} \left\{ 0.424 \left[ 1 - \left( \frac{100 - RH}{100} \right)^{1.7} \right] + 0.0694 \sqrt{v} \left[ 1 - \left( \frac{100 - RH}{100} \right)^8 \right] \right\}$$

Το περιεχόμενο σε υγρασία λόγω ύγρυνσης (wetting equilibrium moisture content),  $E_w$ , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$E_w = 0.618 RH^{0.753} + 10 e^{(RH-100)/10} + 0.18 (21.1 - T)(1 - e^{-0.115RH})$$

Όπου T, είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας το μεσημέρι, και η επίδραση της υπολογίζεται σε σχέση με μια θερμοκρασία αναφοράς 21.1 °C.

### Τελική τιμή υγρασίας:

Τώρα που οι δυο συντελεστές  $E_d$  και  $E_w$ , είναι γνωστοί μπορεί να υπολογιστεί η τελική τιμή για την περιεκτικότητα της υγρασίας της λεπτής καύσιμης ύλης. Υπάρχουν τα εξής τρία πιθανά σενάρια:

1. Εάν η τιμή της υγρασίας βροχής,  $m_r$  είναι μεγαλύτερη από το περιεχόμενο σε υγρασία λόγω ξήρανσης,  $E_d$ , τότε η λεπτή καύσιμη ύλη αποξηραίνεται με ρυθμό ανάλογο του λογαριθμικού συντελεστή ξήρανσης,  $k_d$ , και η τελική τιμή της υγρασίας της λεπτής καύσιμης ύλης δίνεται από τον τύπο:

$$m = E_d + (m_r - E_d) 10^{-k_d}$$

2. Εάν η τιμή της υγρασίας της βροχής,  $m_r$  είναι μικρότερη από το περιεχόμενο σε υγρασία λόγω ύγρυνσης,  $E_w$ , τότε η υγρασία της λεπτής καύσιμης ύλης αυξάνεται με ρυθμό ανάλογο του λογαριθμικού συντελεστή ύγρυνσης,  $k_w$ , και η μεταβλητή της υγρασίας  $m$  δίνεται από τον τύπο:

$$m = E_w - (E_w - m_r) 10^{-k_w}$$

3. Εάν η τιμή της υγρασίας της βροχής,  $m_r$  είναι μεταξύ των τιμών  $E_w$  και  $E_d$ , τότε η περιεκτικότητα σε υγρασία της λεπτής καύσιμης ύλης δεν μεταβάλλεται, δηλαδή:

$$m = m_r$$

Με βάση αυτή την τελική τιμή της μεταβλητής υγρασίας  $m$ , υπολογίζεται ο κωδικός FFMC.

### Duff Moisture Code

Ο DMC αντιπροσωπεύει την υγρασία στο βαθύ στρώμα των 7 cm κάτω από το στρώμα της λεπτής καύσιμης ύλης, που θεωρείται ότι είναι ένα στρώμα ελαφρώς συμπιεσμένου οργανικού υλικού και αποξηραίνεται με πιο αργό ρυθμό σε σχέση με την καύσιμη ύλη που εκπροσωπεί ο FFMC. Ο DMC είναι πάντα θετικός, αλλά δεν έχει μέγιστο. Υψηλές τιμές, υποδεικνύουν ξηρότερο υπόβαθρο και υψηλότερο κίνδυνο πυρκαγιάς. Ο DMC υπολογίζεται από δεδομένα βροχής, σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας και έχει υπολογιστεί για είδη πεύκου.

### Υγρασία λόγω βροχής

Για αυτό το είδος καύσιμης ύλης θεωρείται ότι τα πρώτα 1.5 mm βροχής δεν ασκούν καμία επίδραση γιατί η πορεία της βροχής εμποδίζεται από το φύλλωμα των δέντρων. Συνεπώς αν η βροχόπτωση είναι λιγότερη από 1.5 mm, θεωρείται ότι η συμβολή της βροχόπτωσης είναι μηδέν ( $R_{eff}$ ), αλλιώς υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο: (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009)

$$R_{eff} = 0.92 \text{ rain} - 1.27$$

Και η υγρασία για αυτό το είδος καύσιμης ύλης, δίνεται από τον τύπο:

$$m = 20 + e^{5.6348 - DMC/43.43}$$

Για τον υπολογισμό της αρχικής τιμής  $m_0$ , χρησιμοποιείται η παραπάνω εξίσωση με την αρχική τιμή του DMC ( $DMC_0$ ). Για συνυπολογιστούν οι διορθώσεις λόγω βροχόπτωσης στην αρχική τιμή  $m_0$ , χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$m_r = m_0 + \frac{1000 R_{eff}}{48.77 + b R_{eff}}$$

Όπου η μεταβλητή  $b$ , είναι συνάρτηση του  $DMC_0$ :

$$b = \begin{cases} \frac{100}{0.5 + 0.3DMC_0} & DMC_0 \leq 33 \\ 14 - 1.3 \ln DMC_0 & 33 \leq DMC_0 \leq 65 \end{cases}$$

Ο διορθωμένος συντελεστής λόγω βροχής  $DMC_r$ , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$DMC_r = 244.72 - 43.43 \ln(m_r - 20)$$

### Ξήρανση:

Η ξήρανση αυτού του είδους καύσιμης ύλης λόγω εξάτμισης,  $DMC_d$ , υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (για τιμές  $> -1.1$  °C), της σχετικής υγρασίας και τη διάρκεια της ημέρας  $L_{eff}$  σε ώρες.

$$DMC_d = 1.894(T + 1.1)(100 - RH)L_{eff} 10^{-4}$$

Η τελική (διορθωμένη) τιμή  $DMC$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$DMC = DMC_r + DMC_d$$

### Drought Code

Ο κωδικός DC, αντιπροσωπεύει την υγρασία σε ένα στρώμα συμπαγούς οργανικής ύλης που εκτείνεται 18 cm κάτω από το στρώμα που εκπροσωπεί ο  $DMC$ . Δηλαδή καύσιμα πιο μεγάλα σε μέγεθος που έχουν πολύ αργό ρυθμό αποξήρανσης. Όπως και ο  $DMC$ , ο DC είναι θετικός αριθμός χωρίς άνω όριο και αυξάνει με την αύξηση της ξηρασίας. Ο DC υπολογίζεται μόνο από δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας.

### Βροχόπτωση:

Για αυτό το είδος καύσιμης ύλης θεωρείται ότι τα πρώτα 2.8 mm βροχής δεν ασκούν καμία επίδραση γιατί η πορεία της βροχής εμποδίζεται από το φύλλωμα των δέντρων. Συνεπώς αν η βροχόπτωση είναι λιγότερη από 2.8 mm, θεωρείται ότι η συμβολή της βροχόπτωσης είναι μηδέν ( $R_{eff}$ ), αλλιώς υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο: (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009)

$$R_{eff} = 0.83 \text{ rain} - 1.27$$

Η κλίμακα υγρασίας  $Q$ , σχετίζεται με τον DC με βάση τον τύπο:

$$Q = 800e^{-DC/400}$$

Με τη διόρθωση της επίδρασης της βροχόπτωσης, η κλίμακα  $Q_r$  δίνεται από τον τύπο:

$$Q_r = Q_0 + 3.937R_{eff}$$

Όπου η αρχική τιμή  $Q_0$  υπολογίζεται για την αρχική τιμή  $DC_0$ .

Η διορθωμένη τιμή του DC, λόγω βροχής, δίνεται από τη σχέση:

$$DC_r = 400 \ln(800/Q_r)$$

### Ξήρανση:

Η ξήρανση αυτού του είδους καύσιμης ύλης λόγω εξάτμισης,  $DC_d$ , υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ( για τιμές  $> -2.8$  °C ) και της εποχικής μεταβολής της διάρκειας της ημέρας  $L_f$  σε ώρες.

$$DC_d = 0.5(T + 2.8) + L_f$$

Η τιμή της εποχικής μεταβολής της διάρκειας της ημέρας  $L_f$ , μπορεί να υπολογιστεί από τη διάρκεια της ημέρας  $L_{eff}$ :

$$L_f = \max(1.43L_{eff} - 4.25 - 1.6)$$

Η τελική (διορθωμένη) τιμή DC υπολογίζεται από τον τύπο:

$$DC = DC_r + DC_d$$

### Initial Spread Index

Ο δείκτης αρχικής εξάπλωσης πυρκαγιάς, SI, είναι μια εκτίμηση του ρυθμού εξάπλωσης πυρκαγιάς όταν η λεπτή καύσιμη ύλη είναι ξηρή αλλά η εν τω βάθος ξήρανση δεν έχει προχωρήσει αρκετά. Ο δείκτης SI εξαρτάται από τη τιμή του κωδικού FFMC και από την ταχύτητα του ανέμου  $v$ , με άνω όριο τα 100 km/h.

Η επίδραση του ανέμου υπολογίζεται μέσω της μεταβλητής:

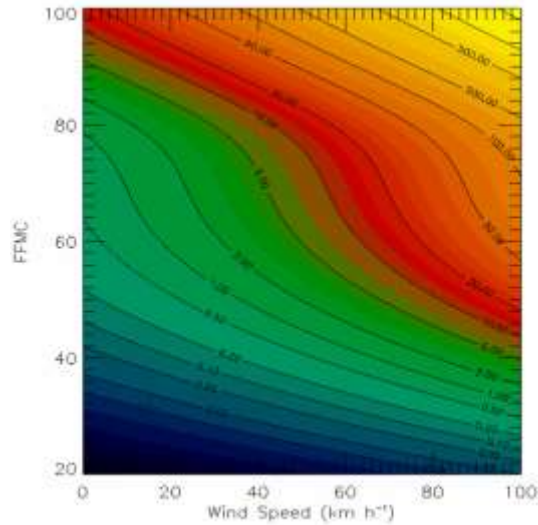
$$FW = e^{0.05039v}$$

Η υγρασία  $m$  που υπολογίστηκε για τον FFMC, υπολογίζεται μέσω της μεταβλητής:

$$FF = 91.9 e^{-0.1386m} \left( 1 + \frac{m^{5.31}}{4.93 \cdot 10^7} \right)$$

Και ο δείκτης ISI δίνεται από τον τύπο:

$$ISI = 0.208 \cdot FW \cdot FF$$

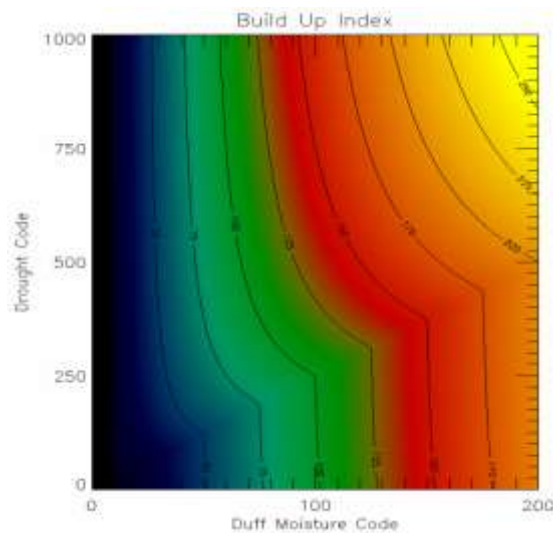


Εικόνα 43 Η εξάρτηση του δείκτη ISI από το FFMC και την ταχύτητα του ανέμου (Dowdy, Mills, Finkle, & de Groot, 2009)

#### Buildup Index

Οι κωδικοί DMC και DC, συνδυάζονται για τον υπολογισμό του δείκτη BUI. Ο DMC αντιδρά στην βροχόπτωση ή στην έλλειψη της πιο γρήγορα από τον DC, που αντιπροσωπεύει ένα πιο ογκώδες είδος καύσιμης ύλης. Ένας αρμονικός συνδυασμός των δυο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του δείκτη BUI.

$$BUI = \begin{cases} \frac{0.8 DMC \cdot DC}{DMC + 0.4 DC} & DMC \leq .4DC \\ DMC - \left(1 - \frac{0.8 DC}{DMC + 0.4 DC}\right) [0.92 + (0.0114 DMC)^{1.7}] & DMC > 0.4 DC \end{cases}$$



Εικόνα 44 Η εξάρτηση του δείκτη BUI από τον DC και τον DMC (Dowdy, Mills, Finkle, & de Groot, 2009)

### Υπολογισμός του Fire Weather Index

Ο δείκτης FWI, είναι θετικός αριθμός και οι χαμηλές τιμές υποδεικνύουν καιρικές συνθήκες με χαμηλή επικινδυνότητα φωτιάς ενώ οι υψηλές τιμές αντιστοιχούν σε καιρικές συνθήκες υψηλής επικινδυνότητας. Για τον υπολογισμό του δείκτη FWI χρησιμοποιούνται οι δείκτες BUI και ISI:

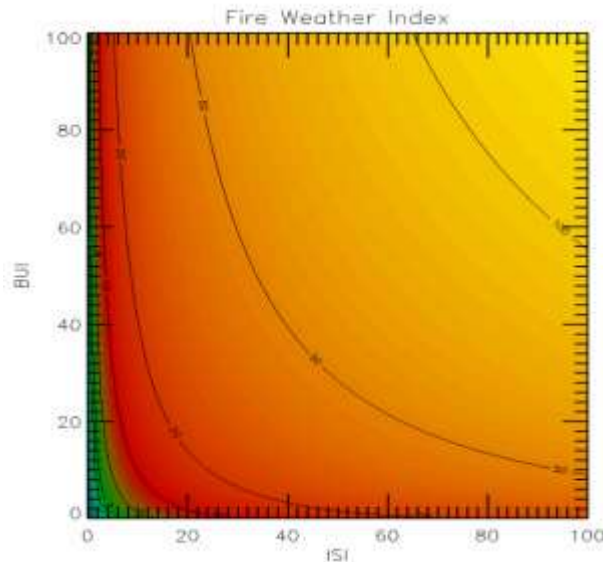
$$FWI = \begin{cases} B & B < 1 \\ e^{2.72(0.434 \ln B)^{0.647}} & B \geq 1 \end{cases}$$

Όπου

$$B = 0.1 \cdot F_d \cdot ISI$$

Και

$$F_d = \begin{cases} 0.626 BUI^{0.809} + 2 & BUI \leq 80 \\ \frac{1000}{25 + 108.64e^{-0.023BUI}} & BUI > 80 \end{cases}$$



Εικόνα 45 Η εξάρτηση του δείκτη FWI από τους δείκτες BUI και ISI (Dowdy, Mills, Finkele, & de Groot, 2009)

Επίσης, το καναδικό μοντέλο έχει δοκιμαστεί και προσαρμοστεί ανάλογα, για τη Νέα Ζηλανδία, τα νησιά Φίτζι, την Αλάσκα, τη Βενεζουέλα, το Μεξικό, τη Χιλή, την Αργεντινή και την Ευρώπη. Αυτό είναι ένα από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά του συστήματος. Επίσης, βρέθηκε ότι ο κωδικός ξηρασίας DC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της περιεκτικότητας σε υγρασία ζωντανών καυσίμων τύπου θάμνων κατά τη θερινή περίοδο στην Κεντρική Πορτογαλία και την Καταλονία (Viegas & Pinol, 2001). Ο κωδικός ξηρασίας DC επιλέχθηκε επίσης για τη διερεύνηση της χωρικής συσχέτισης μεταξύ των δεικτών μετεωρολογικού κινδύνου πυρκαγιάς και των δορυφορικών μεταβλητών στην Ανδαλουσία της νότιας Ισπανίας (Aguado, Chuvieco, Martín, & Salas, 2003).

## Επιλογή κατάλληλου μοντέλου εφαρμογής υγρασίας καυσίμου

Για την επιλογή του κατάλληλου δείκτη για τον υπολογισμό υγρασίας καυσίμου, έγινε αρχικά μια ποιοτική αξιολόγηση των παραμέτρων που απαιτεί κάθε δείκτης για τον υπολογισμό του με χρήση βαρών. Στα κριτήρια αξιολόγησης, προστέθηκαν ακόμα η πετυχημένη εφαρμογή του δείκτη σε αντίστοιχα μεσογειακά κλίματα και η ευκολία υπολογισμού του δείκτη. Τα βάρη που αποδόθηκαν παίρνουν τιμές από 1 έως 5. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες, τόσο για την επικινδυνότητα έναρξης φωτιάς όσο και για την συμπεριφορά της, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, είναι η ταχύτητα του ανέμου, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία, αυτές οι μεταβλητές έχουν βάρος ίσο με 5. Με βάρος 4 αξιολογείται το είδος της καύσιμης ύλης, η πετυχημένη εφαρμογή του δείκτη σε μεσογειακά κλίματα και η ευκολία υπολογισμού του δείκτη. Στην επόμενη κατηγορία με βάρος 3, είναι η ιστορικότητα και η τρέχουσα βροχόπτωση γιατί στην Ελλάδα οι πυρκαγιές συμβαίνουν κυρίως τους θερινούς μήνες μετά από αρκετές μέρες χωρίς βροχόπτωση. Με βάρος 2 αξιολογείται η διάρκεια της ημέρας. Τέλος στην τελευταία κατηγορία με βάρος 1, είναι το σημείο δρόσου, η πιθανή εξατμισοδιαπνοή, η λανθάνουσα θερμότητα εξατμίσσης, η ηλιακή ακτινοβολία και οι μέρες βροχόπτωσης. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στον Πίνακα 20.

Βάρος	Παράμετροι δείκτη	Weather Danger Index (WDI)	Forest Risk Index (FRI)	Fuel moisture index (FMI)	Nesterov Index (NI)	Modified Nesterov Index (MNI)	Zhdanko index (Zh)	Angstrom index (AI)	Baumgartner Index (BI)	Portuguese Index (PI)	Keetch-Byram Drought Index (KBDI)	McArthur Forest Fire Danger Index (FFDI)	Fire Danger Index (FDI)	Fosberg Fire Weather Index (FFWI)	Modified Fosberg Fire Weather Index (mFFWI)	Integrated Fire Index (IFI)	Canadian Forest Fire Weather Index (FWI)
5	Θερμοκρασία	x	x	x	x	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x
5	Σχετική Υγρασία	x	x	x				x		x		x	x	x	x		x
5	Ταχύτητα Ανέμου									x		x	x	x	x	x	x
4	Ευκολία Υπολογισμού	x	x	x				x									
4	Είδος Καύσιμης Ύλης											x	x		x	x	x
3	Τρέχουσα Βροχόπτωση					x	x		x	x						x	x
3	Ιστορικότητα Δεδομένων	x	x		x	x	x		x	x	x					x	x
2	Διάρκεια Ημέρας																x
1	Σημείο Δρόσου				x	x	x							x	x		
1	Μέρες Βροχόπτωσης				x	x	x		x	x							x
1	Πιθανή Εξατμισοδιαπνοή								x								
1	Ηλιακή Ακτινοβολία															x	
1	Λανθάνουσα Θερμότητα Εξάτμισης															x	
4	Δοκιμή σε Μεσογειακά Κλίματα										x				x	x	x
	<b>Συνολική Βαθμολογία</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>5</b>	<b>22</b>	<b>15</b>	<b>19</b>	<b>19</b>	<b>16</b>	<b>24</b>	<b>26</b>	<b>32</b>

Πίνακας 20 Επιλογή μοντέλου υγρασίας καυσίμου

Τη πιο υψηλή βαθμολογία συγκέντρωσε ο Canadian Forest Fire Weather Index (FWI). Επίσης, ο δείκτης αυτός έχει αποδειχθεί ότι έχει καλύτερη συνολική απόδοση για την νότια Ευρώπη.



## Τοπογραφικοί δείκτες και αξιολόγηση κινδύνου πυρκαγιάς

Εξίσου σημαντικόι με τους δείκτες υγρασίας καυσίμου είναι και οι τοπογραφικοί δείκτες. Με βάση τη θεωρία που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, η απότομη κλίση στη διεύθυνση του ανέμου, αυξάνει την πιθανότητα πυρκαγιάς αλλά και το ρυθμό εξάπλωσης μιας ενδεχόμενης πυρκαγιάς λόγω της ταχύτατης μεταφοράς θερμότητας. Ο προσανατολισμός και το υψόμετρο αποτελούν επίσης κρίσιμους παράγοντες στην εκτίμηση της πυρκαγιάς. Δεδομένου ότι το φως του ήλιου ανακλάται περισσότερο στις πλαγιές με νότια κατεύθυνση, οι νότιες πλευρές θεωρούνται γενικά πιο επικίνδυνες. Επίσης σε μεγάλα υψόμετρα, λόγω των συχνών βροχοπτώσεων και συνεπώς χαμηλότερων θερμοκρασιών η πιθανότητα εκδήλωσης φωτιάς είναι μικρότερη. Επίσης, κάποιοι δείκτες συνυπολογίζουν και τον ανθρώπινο παράγοντα κυρίως μέσω της ύπαρξης οδικού δικτύου στην περιοχή.

Αξίζει να σημειωθεί, πως η συνεκτίμηση των τοπογραφικών παραγόντων, με σκοπό τη δημιουργία ενός δείκτη κινδύνου πυρκαγιάς, συνήθως βασίζεται στην επιλεκτική στάθμιση του εκάστοτε παράγοντα ανάλογα τη γνώση των συγγραφέων και τα διαθέσιμα ιστορικά στατιστικά στοιχεία.

### *Topographic Danger Index (TDI)*

Ο δείκτης Topographic Danger Index (TDI) συνυπολογίζει τρεις πολύ βασικές τοπογραφικές παραμέτρους, το υψόμετρο, την κλίση και τον προσανατολισμό (Patah, Mansor, & Misran, 2006). Ο TDI ουσιαστικά ποσοτικοποιεί την επίδραση της τοπογραφίας για την εκδήλωση πυρκαγιών. Υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$TDI = 17.4 * \text{Elevation(m)} + 7.2 * \text{Slope(\%)} + 4.8 * \text{Aspect}$$

Οι μεταβλητές αυτές επιδρούν με διαφορετικό τρόπο στην αξιολόγηση επικινδυνότητας και στην συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Το υψόμετρο επηρεάζει την θερμοκρασία της περιοχής αλλά και την σύνθεση της βλάστησης, ειδικά σε ένα τοπογραφικά σύνθετο έδαφος. Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια εξαρτάται από τον προσανατολισμό της (aspect). Επιπλέον, η ηλιακή ακτινοβολία επηρεάζει άμεσα τη συμπεριφορά της φωτιάς αφενός μεν γιατί μεταβάλλει την υγρασία της καύσιμης ύλης, και αφετέρου δε, μέσω διαφορών στη σύνθεση και την πυκνότητα της βλάστησης. Τέλος, η κλίση (slope) επηρεάζει την υγρασία της καύσιμης ύλης και την ένταση της φωτιάς, καθώς οι απότομες πλαγιές οδηγούν σε μεγαλύτερη προθέρμανση της καύσιμης ύλης αλλά και σε αυξημένο ρυθμό εξάπλωσης όταν η κλίση του εδάφους αυξάνεται στην πορεία της φωτιάς.

### *Cumulative Fire Risk Index (CFRISK)*

Ο δείκτης CFRISK συνυπολογίζει πέντε παράγοντες στην αξιολόγηση επικινδυνότητας πυρκαγιάς. Το δείκτη FUI (Fuel-Type Index) για τον τύπο της καύσιμης ύλης, ο οποίος έχει και τη μεγαλύτερη βαρύτητα, το δείκτη ELI (Elevation Index) για το υψόμετρο, το δείκτη SLI (Slope Index) για την κλίση, το δείκτη ASI (Aspect Index) για τον προσανατολισμό, το δείκτη RI (Road Index) για τη παρουσία και τη μορφή του οδικού δικτύου και τον δείκτη SI (Settlement Index) που αφορά την

παρουσία υποδομών. Υπολογίζεται από εξίσωση (Sharma, Kanga, Nathawat, Sinha, & Pandey , 2012):

$$CFRISK = ELI + 2 \cdot SLI + 3 \cdot ASI + SI + RI + 4 \cdot FUI$$

Τα βάρη στους δείκτες του CFRISK προέκυψαν από ιστορικά δεδομένα πυρκαγιάς.

#### *Ignition Risk (IR)*

Ο δείκτης IR, λαμβάνει υπόψιν του τον ανθρώπινο παράγοντα H (Human risk factor), ο οποίος έχει και τη μεγαλύτερη βαρύτητα, τη βλάστηση (Vegetation), την ηλιακή ακτινοβολία σε συνδυασμό με τον προσανατολισμό I (Illumination factor) και το υψόμετρο E (Elevation) (Chuvieco, A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires, 1997). Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$IR = 4H + 3V + 2I - E$$

#### *Behavior Risk (BR)*

Ο δείκτης BR, λαμβάνει υπόψη τον παράγοντα καύσιμης ύλης V, τον παράγοντα της κλίσης S, τον παράγοντα του προσανατολισμού A, τον παράγοντα του υψομέτρου E και έναν παράγοντα που δηλώνει την παρουσία πυρκαγιάς FB (Chuvieco, A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires, 1997). Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$BR = 5V + 4S + 3A - E - FB$$

Και οι δυο δείκτες BR και IR είναι κυρίως ποιοτικοί δείκτες και δεν πρέπει να ερμηνεύονται με απόλυτο τρόπο.

#### *Risk Index (RI)*

Ο δείκτης RI, συνυπολογίζει τη βλάστηση (Vegetation) στην οποία αποδίδει και τη μεγαλύτερη βαρύτητα, την κλίση (Slope), τον προσανατολισμό (Aspect), την ύπαρξη των δρόμων (Road) και το υψόμετρο (Elevation). Υπολογίζεται από τον τύπο (Congalton, 1991):

$$RI = 1 + 100V + 30S + 10A + 5R + 2E$$

#### *Fire Risk (FR)*

Ο δείκτης FR κρίνει πιο επικίνδυνο παράγοντα την βλάστηση. Λαμβάνει υπόψιν του τη βλάστηση F, τον ανθρώπινο παράγοντα H, την ύπαρξη των δρόμων R και την κλίση του εδάφους S (Jaiswal, Mukherjee, Raju, & Saxena, 2002). Υπολογίζεται από τον τύπο:

$$FR = 10F + 2H + 2R + 3S$$

#### *Fire Hazard Index (FHI)*

Ο δείκτης αυτός προκύπτει βάση τηλεσκοπικών και χαρτογραφικών δεδομένων και με την χρήση προγραμμάτων GIS και επηρεάζεται από παράγοντες όπως τα είδη καύσιμης ύλης, η

τοπογραφία του εδάφους και ο ανθρώπινος παράγοντας, μακροπρόθεσμες δηλαδή μεταβλητές που δεν αλλάζουν σε μικρά χρονικά διαστήματα.

Ο δείκτης FHI, είναι ανάλογος με την πιθανή καταστροφή και αντιστρόφως ανάλογος των μέτρων προστασίας ενάντια στην πυρκαγιά (Brzezinska, Bryant, & Markowski, 2019) :

$$FHI = \frac{\text{Potential Hazard (PH)}}{\text{Protective Measures (PM)}}$$

*Επιλογή κατάλληλου μοντέλου εφαρμογής τοπογραφικών συνθηκών*

Για την επιλογή του κατάλληλου τοπογραφικού δείκτη έγινε αρχικά μια ποιοτική αξιολόγηση των παραμέτρων που χρησιμοποιεί κάθε δείκτης για τον υπολογισμό του με χρήση βαρών. Στα κριτήρια αξιολόγησης, προστέθηκε η ευκολία υπολογισμού του δείκτη. Το μεγαλύτερο βάρος, ίσο με 5, έχει δοθεί στους αμιγώς τοπογραφικούς παράγοντες, στο υψόμετρο, στην κλίση, στον προσανατολισμό, στον τύπο καύσιμης ύλης και στη βλάστηση. Στην ευκολία υπολογισμού του δείκτη έχει δοθεί βάρος ίσο με 4. Στις μεταβλητές παρουσία οδικού δικτύου και υποδομές, έχει δοθεί βάρος 3. Με βάρος 2 υπολογίζονται τα μέτρα προστασίας ενώ με βάρος 1 η πιθανή καταστροφή, κυρίως λόγω της ασάφειας της μεταβλητής. Με μηδενικό βάρος η παρουσία πυρκαγιάς αφού σκοπός είναι η δημιουργία χάρτη πρόληψης πυρκαγιάς και όχι δημιουργία μοντέλου εξάπλωσης. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται στον Πίνακα 21. Την μεγαλύτερη βαθμολογία συγκέντρωσε ο δείκτης Topographic Danger Index.

Βάρος	Παράμετροι δείκτη	Cumulative fire risk index (CFRISK)	Ignition Risk (IR)	Behavior Risk (BR)	Risk Index (RI)	Fire Risk (FR)	Topographic Danger Index (TDI)	Fire Hazard Index (FHI)
5	Υψόμετρο	x	x	x	x		x	
5	Κλίση	x		x	x	x	x	
5	Προσανατολισμός	x	x	x	x		x	
3	Οδικό δίκτυο	x			x	x		
3	Υποδομές	x						
5	Τύπος καύσιμης ύλης	x		x				
5	Βλάστηση		x		x	x		
2	Ηλιακή ακτινοβολία		x					
0	Παρουσία πυρκαγιάς			x				
1	Πιθανή καταστροφή							x
1	Μέτρα προστασίας							x
4	Ευκολία υπολογισμού						x	
	<b>Συνολική βαθμολογία</b>	<b>26</b>	<b>17</b>	<b>20</b>	<b>23</b>	<b>15</b>	<b>19</b>	<b>2</b>

Πίνακας 21 Επιλογή τοπογραφικού μοντέλου

### 3. Μεθοδολογία και υλοποίηση

#### Περιοχή μελέτης

Ο νομός Χανίων καλύπτει το δυτικό τμήμα του νησιού και έχει έκταση 2.376 τετραγωνικά χιλιόμετρα με ακτογραμμή πάνω από 250 χιλιόμετρα και πληθυσμό περίπου 156.000 μόνιμους κατοίκους. Υποδιαιρείται σε πέντε δήμους: Χανίων, Αποκορώνου, Πλατανιά, Κισσάμου, Καντάνου- Σελίνου και Σφακιών. Τέλος, Η κοινότητα της Γαύδου αναγνωρίζεται σε δήμο, με όνομα, έδρα και εδαφική περιφέρεια αυτά της τέως κοινότητας.



Χάρτης 1 Γεωγραφία Δήμων Νομού Χανίων

Η μορφολογία του εδάφους και η θέση της Κρήτης στο κέντρο της Μεσογείου έχουν άμεση απήχηση στο κλίμα του νομού Χανίων, που χαρακτηρίζεται εύκρατο μεσογειακό και ιδιαίτερα ξηροθερμικό, με την ηλιοφάνεια να καλύπτει το 70% των ημερών του έτους.

Στο Νομό Χανίων υπάρχουν οι εξής οκτώ βλαστικές ζώνες: παράκτια, χαμηλή, υπό-ορεινή, ορεινή, υπό-αλπική, αλπική, υγροβιότοποι και φαράγγια χαράδρες. Ένα μεγάλο μέρος από αυτούς τους βιότοπους είναι σήμερα προστατευόμενοι (ακτές Πλατανιά - Γερανιού - Πύργου Ψηλονέρου - Μάλεμε, λίμνη Αγιάς, λίμνη Κουρνά, νήσοι Γαύδος και Γαυδοπούλα, Ελαφονήσι, ακρωτήρια Γραμβούσας και Ειρήνης κ.α. -Natura 2000) ή έχουν χαρακτηριστεί εθνικοί δρυμοί (φαράγγι Σαμαριάς).



Εικόνα 46 Ελαφονήσι

Το ανάγλυφο του νομού Χανίων έχει τα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου ολόκληρης της Κρήτης, η οποία τέμνεται από δυτικά προς ανατολικά από μια συνεχόμενη οροσειρά, η οποία διακόπτεται από κοιλάδες και φαράγγια. Οι ορεινοί όγκοι καλύπτουν ολόκληρο σχεδόν το κεντρικό και νότιο τμήμα του νομού, ενώ το πεδινό τμήμα (18,3% της συνολικής επιφάνειας του νομού) απλώνεται στη βόρεια παράκτια περιοχή. Στο δυτικότερο τμήμα του νομού (και της Κρήτης) υψώνονται, από Βορρά προς Νότο, οι κορυφές Μάννα (890 m.), Κουτρούλης (1.071 m.), Άγιος Δικαίος (1.182 m.) και δυτικότερα το Αποπηγάδι (1.331 m.) και η Πλατανιανή (1.849 m.), όλες τμήματα της κεντρικής οροσειράς, που συνεχίζεται προς Δύση με τον όγκο των Λευκών Ορέων, του οποίου 6 κορυφές υπερβαίνουν τα 2.000 m.: Πάχνες 2.453 m., Τροχάρης 2.401 m., Γριάς Σωρός 2.331 m., Κάστρο 2.218m., Ζαρανοκεφάλα 2.140 m., Μαύρη 2.089 m.



Εικόνα 47 Πάχνες (Xenos, 1999)

Ρήγματα, διαβρώσεις και κατακόρυφες μετακινήσεις του εδάφους δημιούργησαν στα Λευκά Όρη τάφρους, κοιλάδες και φαράγγια, όπως το περίφημο φαράγγι της Σαμαριάς - Αγίας Ρούμελης, που χωρίζει τον κεντρικό όγκο των Λευκών Ορέων από τον Βολακιά (2.116 m.) και έχει μήκος 18 km., πλάτος από 3 έως 40 m., και βάθος έως 600 m. Δυτικότερα σχηματίζεται το δεύτερο μεγάλο φαράγγι της Κρήτης, του Νίμπρου ή Ίμπρου, που έχει μήκος 7 km., πλάτος μέχρι 2 m. και βάθος έως 300 m., και χωρίζει τον κεντρικό όγκο των Λευκών Ορέων από τις κορυφές Αγκάθες (1.151 m.) και Άσφενδος (1.184 m.). Χαμηλότερες κορυφές υψώνονται και στα 3 ακρωτήρια που υπάρχουν στη βόρεια ακτή του νομού: Γεροσκίνος (762 m.) στη δυτικότερη, Όνουχας (748 m.) και Μούρι (747 m.) στην κεντρική, και Σκλόπα (528 m.) στη δυτικότερη, των Χανίων. Οι χαμηλές περιοχές βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του νομού, με τις πεδιάδες του Καστελλίου στα δυτικά, των Χανίων στο κέντρο και του Αποκορώνου στα ανατολικά. Υπάρχουν επίσης μικρά οροπέδια και κοιλάδες στη ψηλότερες περιοχές του νομού, όπως το οροπέδιο του Ομαλού (υψόμετρο 1.000 m.), βορειοδυτικά των Λευκών Ορέων, το λεκανοειδές οροπέδιο του Ασκύφου στα ανατολικά, η κοιλάδα του Καντάνου και το παράκτιο υψίπεδο της Χώρας Σφακιών.



Εικόνα 48 Πόρτες στο φαράγγι πολλές Σαμαριάς



*Εικόνα 49 Το φαράγγι της Σαμαριάς*

Μεγάλα υδάτινα ρεύματα δεν υπάρχουν στον νομό Χανίων, υπάρχουν πολλές πηγές, συνδεδεμένες με την τεράστια λεκάνη απορροής των Λευκών Ορέων (800km<sup>2</sup>), ενώ εμφάνιση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα αποτελεί η λίμνη Κουρνά, στο βορειοδυτικό άκρο του νομού. Τα κυριότερα υδάτινα ρεύματα του νομού, χείμαρροι μάλλον, βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του νομού και είναι, από Δύση προς την Ανατολή, ο Τυφλός και ο Κουλένης, στην περιοχή της Κισσάμου, ο Ταυρωνίτης, ο Καιρίτης, στον κόλπο των Χανίων, και στο νότιο τμήμα, στην επαρχία Σελίνου, ο Κακοδικιανός, που εκβάλλει στο Λιβυκό πέλαγος. Το κλίμα του νομού ακολουθεί το ανάγλυφό του. Οι βροχοπτώσεις είναι εδώ περισσότερες από την υπόλοιπη Κρήτη, γιατί τα υγρά ρεύματα, που προέρχονται από το Ιόνιο, αιχμαλωτίζονται από τα Λευκά Όρη. Σε αυτό άλλωστε, και στην ασβεστολιθική σύσταση του εδάφους, οφείλονται και οι πολλές πηγές του νομού. Στη χαμηλή ζώνη το κλίμα είναι εξαιρετικά ήπιο (η χαμηλότερη θερμοκρασία, που σημειώθηκε στα Χανιά, είναι -1°C), αλλά γίνεται φυσικά δριμύ στα ορεινά (Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, 2013).



*Εικόνα 50 Λίμνη Κουρνά*



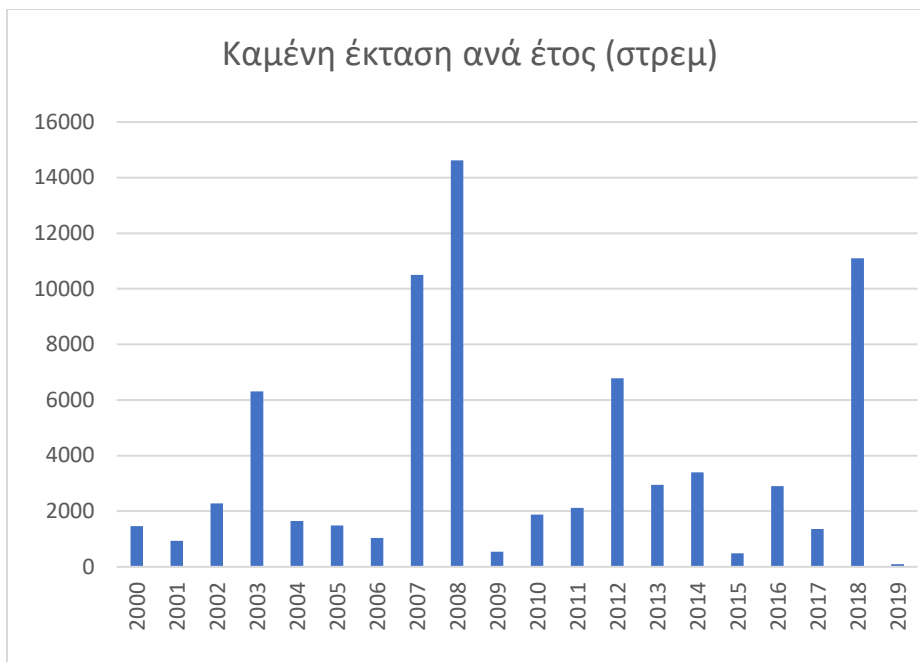
## Δασικές πυρκαγιές του Νομού Χανίων

Με βάση τα στοιχεία της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας θα παρουσιαστεί μια εικόνα των πυρκαγιών στο Νομό Χανίων για την εικοσαετία 2000-2019. Στη συνέχεια της διπλωματικής θα γίνει μια προσπάθεια συσχέτισης των δεδομένων με τους χάρτες επικινδυνότητας που θα υλοποιηθούν.

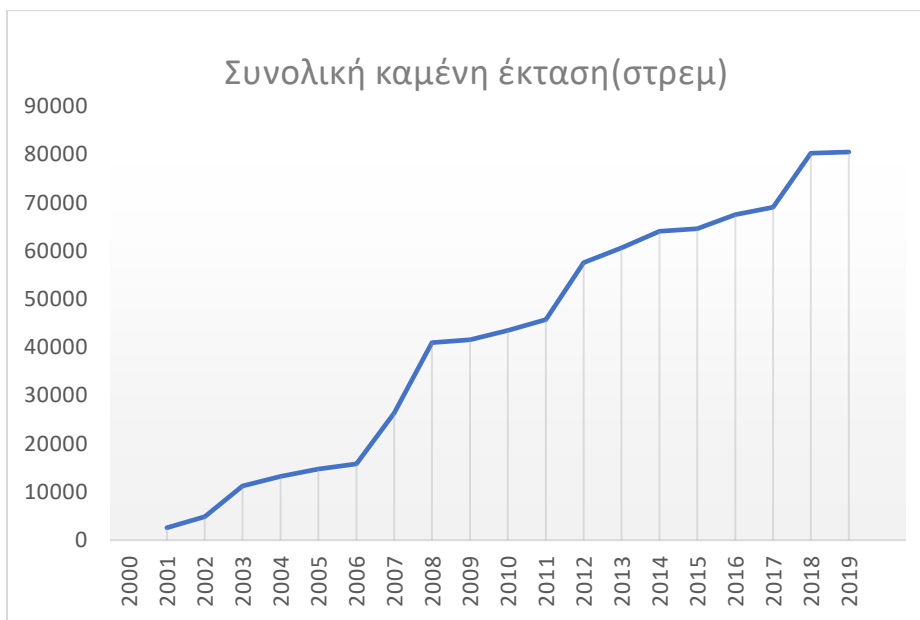
ΕΤΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ	ΔΑΣΙΚΕΣ ΕΚΤΑΣΕΙΣ	ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ	ΣΥΝΟΛΟ	% ΕΚΤΑΣΗΣ ΝΟΜΟΥ
2000	283	700,8	766	1466,8	0,06%
2001	227	498,5	438,3	936,8	0,04%
2002	166	938,8	1337,6	2276,4	0,10%
2003	248	1831,2	4479,1	6310,3	0,27%
2004	291	987,6	660,3	1647,9	0,07%
2005	237	1007,82	476,45	1484,27	0,06%
2006	150	454,22	588,05	1042,27	0,04%
2007	221	4819,24	5675,93	10495,17	0,44%
2008	284	8157,65	6458,45	14616,1	0,62%
2009	147	265,5	282,5	548	0,02%
2010	235	1237,6	635,9	1873,5	0,08%
2011	146	462,8	1658,2	2121	0,09%
2012	212	3455,70	3326,60	6782,3	0,29%
2013	264	1159,80	1791,00	2950,8	0,12%
2014	137	2163,70	1238,86	3402,56	0,14%
2015	139	151,27	333,49	484,76	0,02%
2016	212	1563,84	1345,01	2908,85	0,12%
2017	129	304,54	1057,06	1361,6	0,06%
2018	143	5034,07	6062,32	11096,39	0,47%
2019	89		93,90	93,9	0,00%
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>3960</b>	<b>35194,65</b>	<b>38705,02</b>	<b>73899,67</b>	<b>Μ.Ο. 0,16%</b>
<b>Μ.Ο. ΑΡΙΘΜΟΥ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ</b>	<b>198</b>				

Πίνακας 22 Στοιχεία δασικών πυρκαγιών 2000-2019

1. Οι καμένες εκτάσεις κατ' έτος στα 12 από τα 20 χρόνια, δεν υπερβαίνει το 0,1% της συνολικής έκτασης και για τα υπόλοιπα δεν ξεπερνά το 0,62% . Το ποσοστό είναι στα όρια της φυσιολογικής ανάγκης ανανέωσης του δάσους.
2. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί, όπως προκύπτει από τα στοιχεία του πίνακα, είναι ότι μετά από μια χρονιά με μεγάλο αριθμό καμένων εκτάσεων, ακολουθούν χρονιές με μικρό αριθμό πυρκαγιών και περιορισμός των καμένων εκτάσεων. Αυτό οδηγεί στη σκέψη ότι ο ανθρώπινος παράγοντας είναι μια σημαντική ευμετάβλητη παράμετρος, που έχει καθοριστικό ρόλο είτε στην εκδήλωση , είτε στον περιορισμό της πυρκαγιάς.
3. Κατά μέσο όρο εκδηλώνονται περίπου 200 πυρκαγιές κατ' έτος, αριθμός που επηρεάζεται καθοριστικά από τους λόγους που εκτέθηκαν στο 2.
4. Ο Μ.Ο. των καμένων εκτάσεων είναι το 0,16%
5. Αν δεν ληφθούν υπόψιν τα έτη 2007, 2008 και 2018, τα υπόλοιπα έτη μπορούν να χαρακτηριστούν καλά, συνεπώς θα πρέπει να διερευνηθούν διεξοδικά αυτά τα τρία έτη με την ελπίδα να αντληθούν συμπεράσματα για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση τους. Ο Μ.Ο. της καμένης έκτασης αν εξαιρέσουμε τις μεγάλες πυρκαγιές είναι 0,1%.
6. Άξιο παρατήρησης είναι, όπως προκύπτει από το Γράφημα που ακολουθεί, ότι οι εκτάσεις που καίγονται δεν βαίνουν μειούμενες στην εξέλιξη του χρόνου όπως θα ήταν αναμενόμενο, δεδομένου ότι βελτιώνονται τα μέσα, αυξάνεται το προσωπικό, το οποίο εκπαιδεύεται καλύτερα και η κοινωνία των πολιτών ενημερώνεται και ευαισθητοποιείται σε θέματα καταστροφής του περιβάλλοντος. Είναι ένα θέμα που πρέπει να απασχολήσει σοβαρά όσους έχουν ευθύνες για την αντιμετώπιση των πυρκαγιών (Υπουργείο, Πολιτική Προστασία, Π.Σ. , περιφέρειες, Δήμους, φορείς, κοινωνία).

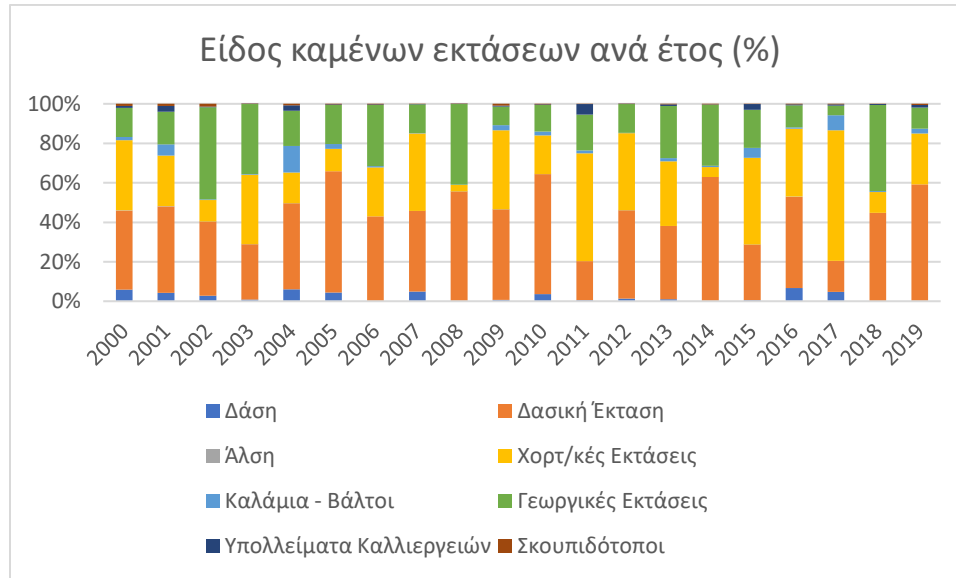


Γράφημα 1 Καμένη έκταση ανά έτος

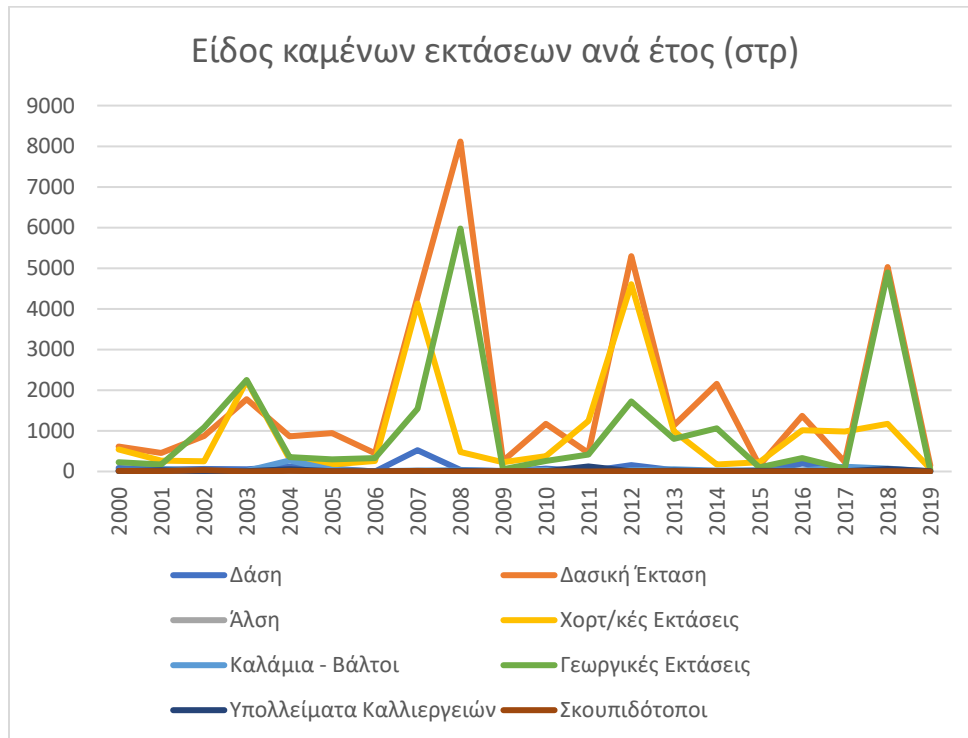


Γράφημα 2 Συνολική καμένη έκταση του Ν. Χανίων 2000-2019

1. Όπως παρουσιάζεται στα γραφήματα που ακολουθούν, οι χορτολιβαδικές εκτάσεις και καλλιέργειες αποτελούν κατά μέσο όρο το 50.63% της καμένης έκτασης που είναι πολύ σημαντικό ποσοστό.



Γράφημα 3 Είδος καμένων εκτάσεων (%) 2000-2019

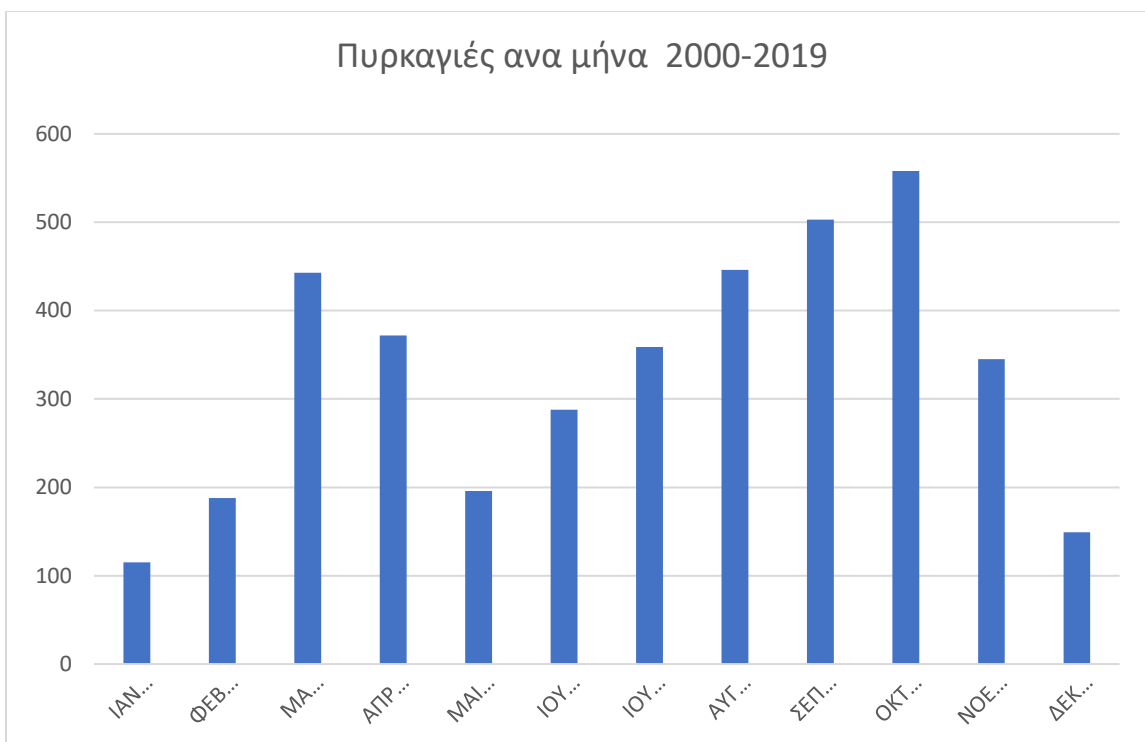


Γράφημα 4 Είδος καμένων εκτάσεων (στρ) 2000-2019

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	283	227	166	248	291	237	150	221	284	147	235
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	0	5	2	10	1	6	1	17	2	2	19
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	5	8	10	0	18	5	2	2	8	9	25
ΜΑΡΤΙΟΣ	12	29	11	4	38	31	13	10	41	11	31
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	7	15	11	11	16	20	31	20	21	8	13
ΜΑΙΟΣ	22	8	13	16	16	11	14	15	12	4	10
ΙΟΥΝΙΟΣ	30	27	15	23	19	20	9	15	13	10	11
ΙΟΥΛΙΟΣ	35	24	29	27	36	23	13	25	25	19	10
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	23	18	34	25	30	45	27	52	25	19	10
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	51	32	22	55	52	28	27	37	32	11	32
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	42	42	12	61	41	29	7	21	58	26	31
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	47	16	7	10	20	11	2	6	30	16	31
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	9	3	0	6	4	8	4	1	17	12	12
	283	227	166	248	291	237	150	221	284	147	235

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	ΣΥΝΟΛΟ	
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	146	214	264	137	139	212	129	143	89	3962	
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	2	0	9	5	4	12	2	11	5	115	2,90%
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	4	3	21	5	9	31	6	12	5	188	4,75%
ΜΑΡΤΙΟΣ	20	15	50	15	13	29	20	42	8	443	11,18%
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	7	22	50	20	24	27	29	8	12	372	9,39%
ΜΑΙΟΣ	9	6	20	5	2	7	1	3	2	196	4,95%
ΙΟΥΝΙΟΣ	6	10	12	12	11	17	8	11	9	288	7,27%
ΙΟΥΛΙΟΣ	14	13	10	15	3	7	14	12	5	359	9,06%
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	19	29	17	11	8	20	8	18	8	446	11,26%
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	17	29	16	13	14	12	9	7	7	503	12,70%
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	28	47	27	17	16	14	15	10	14	558	14,08%
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	8	26	27	15	23	25	9	6	10	345	8,71%
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	12	14	5	4	12	11	8	3	4	149	3,76%
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	146	214	264	137	139	212	129	143	89	3962	100,00%

Πίνακας 23 Πυρκαγιές ανά μήνα και ανά έτος



*Γράφημα 5 Πυρκαγιές ανά μήνα*

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία παρατηρούνται τα εξής:

1. Είναι μύθος ότι οι πυρκαγιές εκδηλώνονται το καλοκαίρι. Ο Μάρτιος είναι το ίδιο "πυρομανής" με τον Αύγουστο, ο Νοέμβριος ξεπερνά σε φωτιές τον Ιούνιο. Μένει να δούμε αν οι χειμωνιάτικες πυρκαγιές είναι το ίδιο καταστρεπτικές.
2. Βέβαια, το 5-μηνο, Ιούνιος-Οκτώβριος το ποσοστό των πυρκαγιών φθάνει στο 55 %.
3. Παράγοντες οι οποίοι πιθανόν να εξηγούν τις πυρκαγιές στο παραπάνω διάστημα είναι η υψηλή θερμοκρασία, η παραμονή των ανθρώπων στην ύπαιθρο για μεγάλο διάστημα, η χαλαρή συμπεριφορά στο όριο της ανευθυνότητας, οι ακαθάριστες από ξερά χόρτα εκτάσεις.
4. Οι πυρκαγιές των μηνών από Νοέμβριο μέχρι και το Μάρτιο πρέπει να αποδοθούν, σε μεγάλο βαθμό, σε "ανθρώπινο χέρι" ( καλλιέργειες , βοσκοτόπια, οικοδομικές και άλλες δραστηριότητες ).
5. Οι κακόβουλες πυρκαγιές διαχέονται σε όλους τους μήνες και τα χρόνια.

## ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ ΑΠΟ 2000 ΜΕΧΡΙ 2019

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΕΜΑΤΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΕΜΑΤΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΕΜΑΤΩΝ	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΡΕΜΑΤΩΝ
25/8/2000	300	27/9/2004	200	28/8/2009	55	29/5/2013	180
11/11/2000	300	5/3/2005	180	22/9/2010	800	15/7/2013	410
6/9/2001	103	13/8/2005	400	27/8/2011	250	2/7/2014	200
31/7/2002	400	29/10/2005	200	20/9/2011	320	30/8/2014	3.000
7/8/2002	260	7/4/2006	200	18/7/2012	2.500	6/4/2015	160
12/8/2002	650	28/6/2006	250	6/8/2012	500	29/2/2016	1.010
24/9/2002	350	29/6/2007	500	20/9/2012	310	30/5/2016	225
1/9/2003	500	30/7/2007	7.000	3/10/2012	202	14/7/2017	855
23/10/2003	2.000	22/8/2007	7.000	18/10/2012	650	17/3/2018	250
23/10/2003	460	22/8/2007	1.000	14/3/2013	500	22/3/2018	150
23/10/2003	1.370	23/8/2007	800	14/3/2013	290	22/3/2018	440
2/11/2003	300	20/4/2008	10.000	30/3/2013	200	4/7/2018	700
20/9/2004	250	20/4/2008	1.500	2/4/2013	200	23/7/2018	7.500
21/9/2004	200	25/8/2008	1.000	29/5/2013	300	23/7/2018	1.500

*Πίνακας 24 Μεγάλες πυρκαγιές 2000-2019*

ΜΕΓΑΛΕΣ ΠΥΡΚΑΓΙΕΣ 2000-2019 ΑΝΑ ΜΗΝΑ		
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	0	
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	1	
ΜΑΡΤΙΟΣ	7	
ΑΠΡΙΛΙΟΣ	5	
ΜΑΙΟΣ	3	
ΙΟΥΝΙΟΣ	2	
ΙΟΥΛΙΟΣ	9	
ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	12	
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	9	
ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	6	
ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	2	
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	0	
	56	
ΙΟΥΛ-ΣΕΠΤΕΜΒΡ	36	64,29%

*Πίνακας 25 Μεγάλες πυρκαγιές ανά μήνα*



Γράφημα 6 Μεγάλες πυρκαγιές ανά μήνα 2000-2019

Από τα στοιχεία του πίνακα προκύπτουν τα παρακάτω:

1. Η πυρκαγιά που έκαψε τα περισσότερα στρέμματα έγινε στις 20 Απριλίου 2008. Πιθανόν η μορφολογία του εδάφους, η αντιμετώπιση της από τον μηχανισμό κατάσβεσης και η εποχή να ήταν η καθοριστικοί παράγοντες για έκταση της καταστροφής.
2. Οι μεγάλες πυρκαγιές συμβαίνουν τους μήνες Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο, πράγμα αναμενόμενο λόγω των ειδικών συνθηκών της περιόδου. Το 64% περίπου των μεγάλων πυρκαγιών εκδηλώνεται την περίοδο αυτή.



Χάρτης 2 Χάρτης απεικόνισης ορίων επιχειρησιακής ευθύνης πυροσβεστικών υπηρεσιών, σταθμών και κλιμάκων



0	ΒΡΥΣΩΝ (689 Km <sup>2</sup> )	ΧΑΝΙΩΝ (665 Km <sup>2</sup> )	ΚΑΣΤΕΛΙΟΥ (522 Km <sup>2</sup> )	ΚΑΝΔΑΝΟΥ (500 Km <sup>2</sup> )	ΣΥΝΟΛΟ
2000	278,9	170,2	1057,1	18	1524,2
2001	377,1	422,4	236,7	3	1039,2
2002	179,7	784,3	1338,1	22,5	2324,6
2003	719,7	2645,8	2087,4	881,5	6334,4
2004	459,5	795,4	487,8	246,5	1989,2
2005	85,26	292,18	806,01	348,57	1532,02
2006	313,01	564,48	105,29	72,43	1055,21
2007	466,83	2167,86	295,22	7609,07	10538,98
2008	119,95	12420,89	1846,81	271,52	14659,17
2009	14,6	226,9	225,4	103,9	570,8
2010	139	487,7	306	989,5	1922,2
2011	237,2	696,8	1306,4	37,4	2277,8
2012	163,6	3357	3143,7	158,1	6822,4
2013	167,2	1554,2	433,5	881,3	3036,2
2014	21,5	93,2	3265,38	61,69	3441,77
2015	19,52	249,46	49,61	208,85	527,44
2016	551,19	229,44	1856,56	319,73	2956,92
2017	274,25	273,42	892,48	50,35	1490,5
2018	7743,96	222,47	524,29	2735,32	11226,04
2019	21,46	63,94	5,06	167,06	257,52
ΣΥΝΟΛΟ	12353,43	27718,04	20268,81	15186,29	75526,57
ΠΟΣΟΣΤΟ	2,61%	3,16%	3,88%	3,04%	0

Πίνακας 26 Καμένη έκταση ανά περιοχή Π.Υ. ανά έτος

Με βάση τον παραπάνω πίνακα:

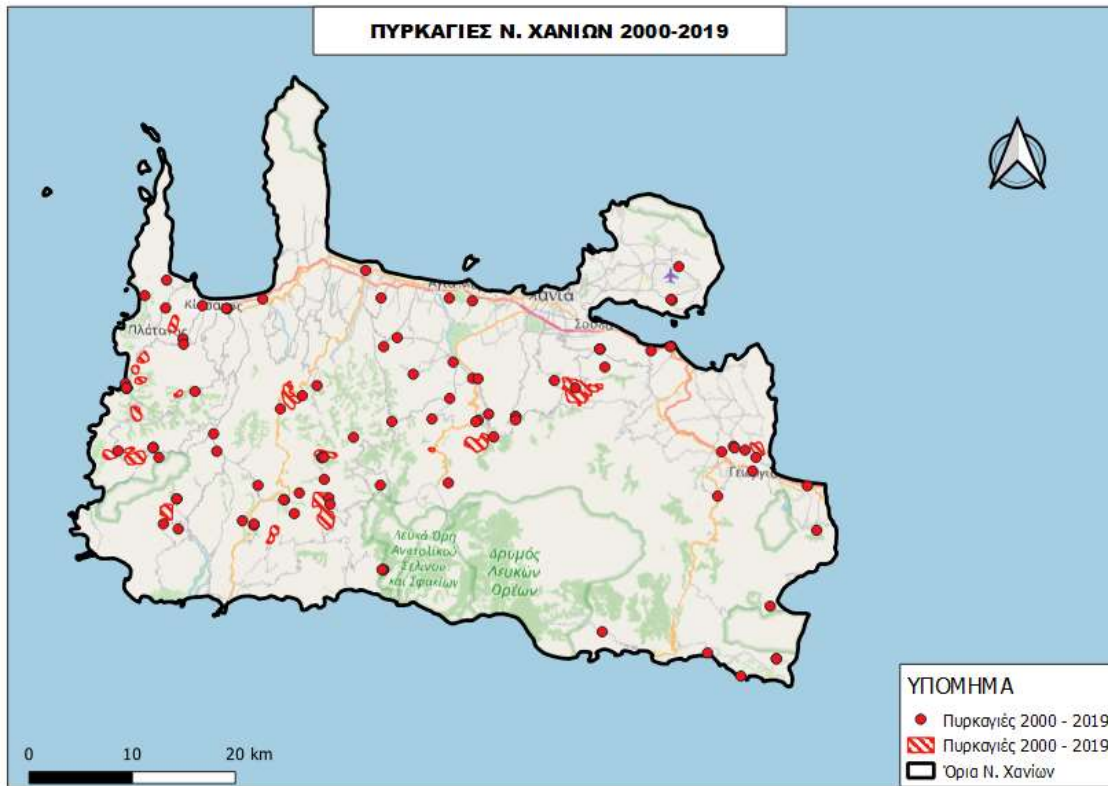
1. Η καμένη έκταση σαν ποσοστό της συνολικής έκτασης της περιοχής ευθύνης για το κλιμάκιο της Καστελίου αποκλίνει εν σχέση με τις άλλες περιοχές. Πρέπει να εξετασθεί λεπτομερέστερα αυτή η διαφοροποίηση για να εξηγηθεί και να αξιολογηθούν τα όποια αίτια προκύψουν.
2. Το ίδιο πρέπει να γίνει και για την περιοχή του κλιμακίου Βρυσών, δεδομένου ότι η έκταση αρμοδιότητας είναι κατά 13%.



*Γράφημα 7 Πυρκαγιές ανά περιοχή αρμοδιότητας κλιμακίου για τα έτη 2000-2019*

Με βάση το γράφημα:

1. Το έτος 2007 για το κλιμάκιο της Κανδάνου, το έτος 2008 για το κλιμάκιο των Χανίων και το έτος 2018 για το κλιμάκιο των Βρυσών παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την καμένη έκταση. Τα αίτια που θα διαπιστωθούν θα βοηθήσουν στις απαραίτητες προσαρμογές.
2. Η περιοχή του κλιμακίου Καστελίου παρουσιάζει σταθερότητα στην καμένη έκταση, η οποία είναι και η μεγαλύτερη για τα 4 κλιμάκια. Τα αίτια είναι επαναλαμβανόμενα ίσως θα μπορεί να αναγνωριστούν και να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικότερα οι πυρκαγιές.



Χάρτης 3 Χάρτης πυρκαγιών 2000-2019

## Υπολογισμός δεικτών βλάστησης

Σε αυτή την ενότητα θα υπολογιστούν οι δείκτες βλάστησης που αναφέρθηκαν στη θεωρία. Ο πιο αποτελεσματικός δείκτης θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των τοπογραφικών δεικτών επικινδυνότητας πυρκαγιάς.

### Υπολογισμός δείκτη βλάστησης NDVI

Για τον υπολογισμό δείκτη βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), χρησιμοποιήθηκαν οι δορυφορικές ψηφιακές τηλεπισκοπικές απεικονίσεις της περιοχής του Ν. Χανίων. Οι δορυφορικές απεικονίσεις ελήφθησαν με τους δέκτες OLI (Operational Land Imager) και TIRS (Thermal Infrared Sensor) του δορυφόρου Landsat 8.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο δείκτης NDVI υπολογίζεται από την σχέση :

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

Στις δορυφορικές εικόνες LANDSAT 8, το κόκκινο κανάλι αντιστοιχεί στο band 4 και το κανάλι του εγγύς υπέρυθρου στο band 5.

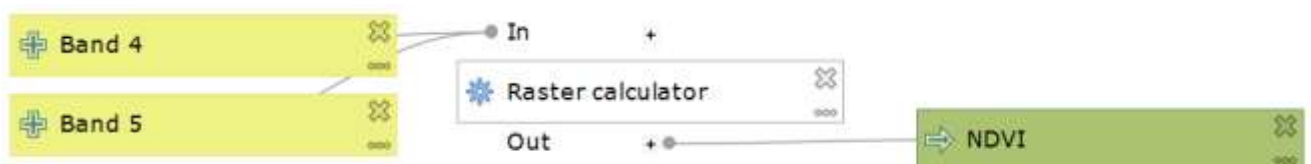
$$NDVI = \frac{\text{Band 5} - \text{Band 4}}{\text{Band 5} + \text{Band 4}}$$

Συνεπώς για τον υπολογισμό θα χρειαστούν μόνο αυτά τα δυο κανάλια και θα χρησιμοποιηθεί το εργαλείο του QGIS Raster Calculator.

Οι αρνητικές τιμές του NDVI (τιμές που πλησιάζουν το -1) αντιστοιχούν στο νερό. Οι τιμές κοντά στο μηδέν (-0,1 έως 0,1) αντιστοιχούν γενικά σε άγονες περιοχές βράχου, άμμου ή χιονιού. Τέλος, οι χαμηλές, θετικές τιμές αντιπροσωπεύουν θάμνους και λιβάδια (περίπου 0,2 έως 0,4), ενώ οι υψηλές τιμές δείχνουν εύκρατα και τροπικά δάση (τιμές πλησιάζουν το 1).

Με χρήση του Raster Calculator:

$$("Chania\_5@1" - "Chania\_4@1" ) / ( "Chania\_5@1" + "Chania\_4@1" )$$



Εικόνα 51 Υπολογισμός NDVI με Processing Modeller

Ταξινομώντας τις τιμές του δείκτη σε 6 κλάσεις, προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης:



Χάρτης 4 Δείκτης βλάστησης NVDI Ν. Χανίων

Υπολογισμός δείκτη υγρασίας βλάστησης NDMI

Ο δείκτης υγρασίας Normalized Difference Moisture Index (NDMI) είναι ευαίσθητος στα επίπεδα υγρασίας της βλάστησης. Υπολογίζεται με βάση τον τύπο:

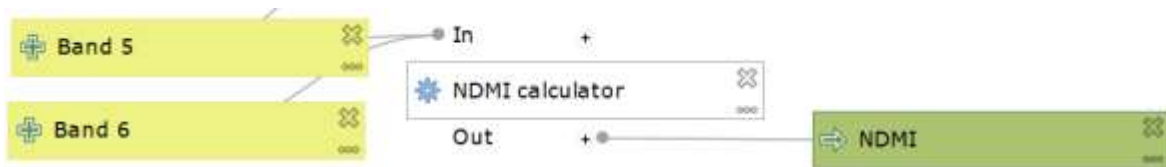
$$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$$

Για τις εικόνες LANDSAT 8, υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο: (United States Geological Survey, 2018)

$$NDMI = \frac{\text{Band 5} - \text{Band 6}}{\text{Band 5} + \text{Band 6}}$$

ο δείκτης NDMI υπολογίστηκε με τη χρήση του Raster Calculator:

$$(\text{"Chania\_5@1"} - \text{"Chania\_6@1"}) / (\text{"Chania\_5@1"} + \text{"Chania\_6@1"})$$



Εικόνα 52 Υπολογισμός NDMI

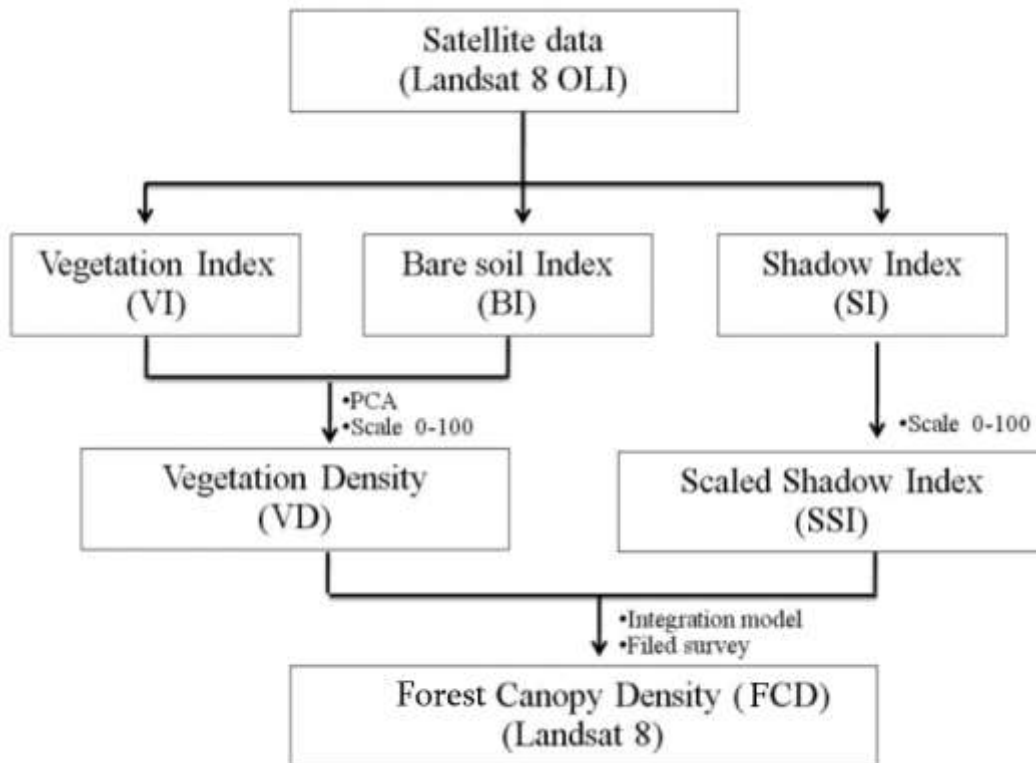
Ταξινομώντας τις τιμές σε 6 κλάσεις, προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης:



Χάρτης 5 Δείκτης υγρασίας βλάστησης NDMI Ν. Χανίων

## Υπολογισμός Forest Canopy Density Index

Για τον υπολογισμό του δείκτη πυκνότητας βλάστησης, πρέπει να υπολογιστούν αρχικά οι υπό δείκτες, Vegetation Index (VI), Bare Soil Index (BI) και Thermal Index (TI).



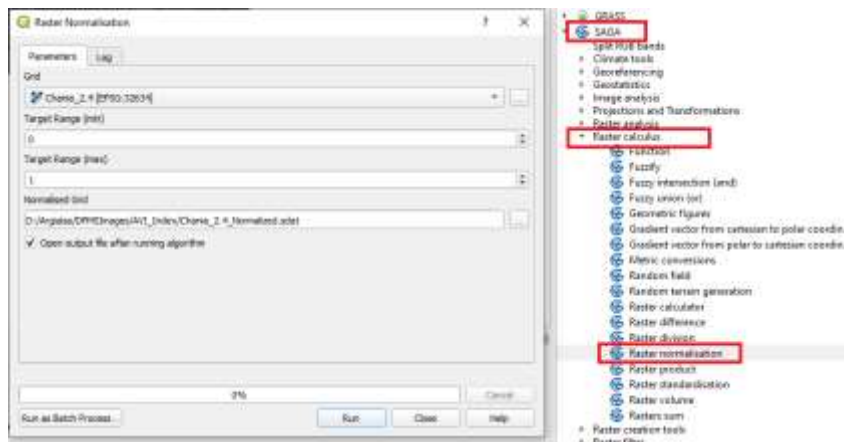
Εικόνα 53 Διάγραμμα ροής υπολογισμού δείκτη FCD (Pladsrichuay, Suwanwerakamtorn, & Pannucharoenwong, 2018)

## Υπολογισμός Vegetation Density Index

Ο δείκτης Vegetation Index (AVI) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$VI_{L8} = \sqrt[3]{B5 * (1 - B4) * (B5 - B4)}$$

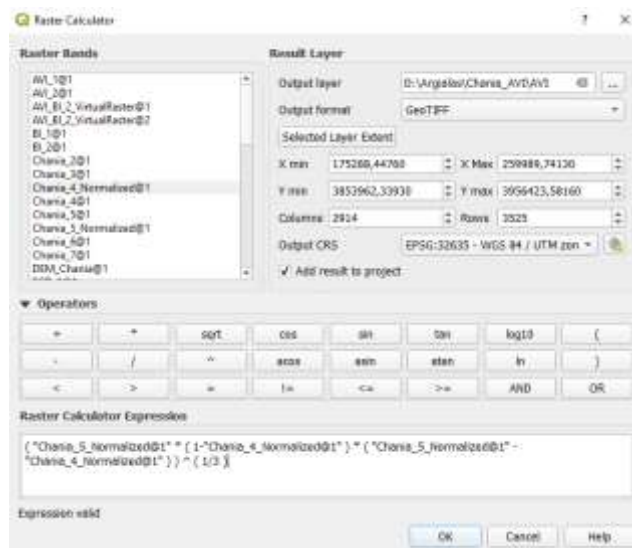
Αρχικά έγινε κανονικοποίηση των layers B5 και B4 με χρήση της εργαλειοθήκης SAGA και πιο συγκεκριμένα με χρήση του raster normalization:



Εικόνα 54 Κανονικοποίηση ζωνών B4 και B5

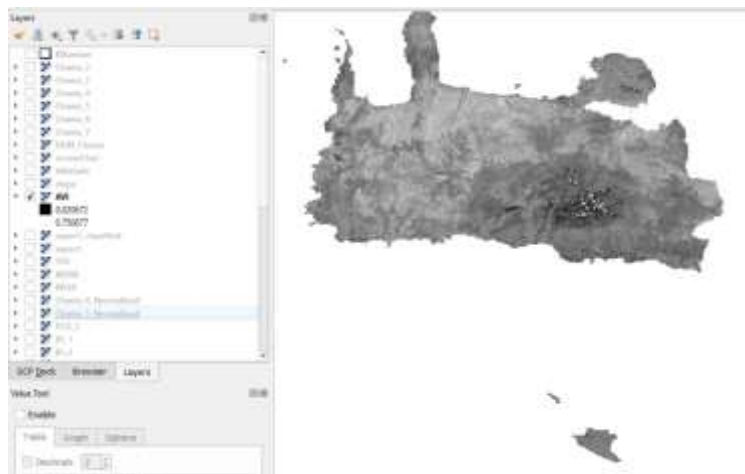
Έπειτα υπολογίστηκε ο δείκτης AVI με χρήση του raster calculator:

$$\left( \text{"Chania\_5\_Normalized@1"} * \left( 1 - \text{"Chania\_4\_Normalized@1"} \right) * \left( \text{"Chania\_5\_Normalized@1"} - \text{"Chania\_4\_Normalized@1"} \right) \right)^{\left( 1/3 \right)}$$



Εικόνα 55 Υπολογισμός δείκτη VI





Εικόνα 56 Δείκτης VI

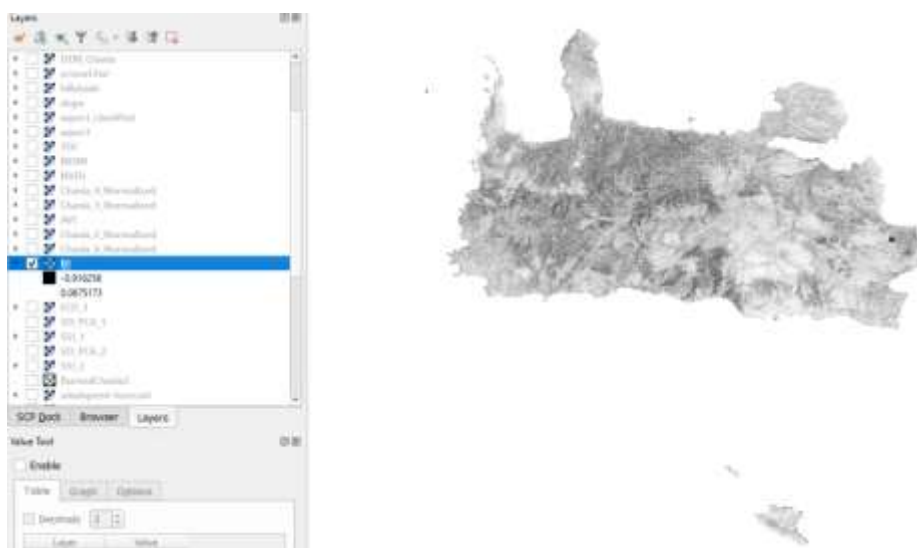
### Υπολογισμός Bare Soil Index

Ο δείκτης Bare Soil Index (BI) υπολογίζεται από τον τύπο:

$$BI = \frac{(B6 + B4) - (B5 + B2)}{(B6 + B4) + (B5 + B2)}$$

Με χρήση του raster calculator για τις κανονικοποιημένες τιμές των ζωνών B2, B4, B5 και B6, υπολογίστηκε ο δείκτης BI με χρήση του raster calculator :

$$\left( \left( \text{"Chania\_6\_Normalized@1"} + \text{"Chania\_4\_Normalized@1"} \right) - \left( \text{"Chania\_5\_Normalized@1"} + \text{"Chania\_2\_Normalized@1"} \right) \right) / \left( \left( \text{"Chania\_6\_Normalized@1"} + \text{"Chania\_4\_Normalized@1"} \right) + \left( \text{"Chania\_5\_Normalized@1"} + \text{"Chania\_2\_Normalized@1"} \right) \right)$$



Εικόνα 57 Δείκτης BI

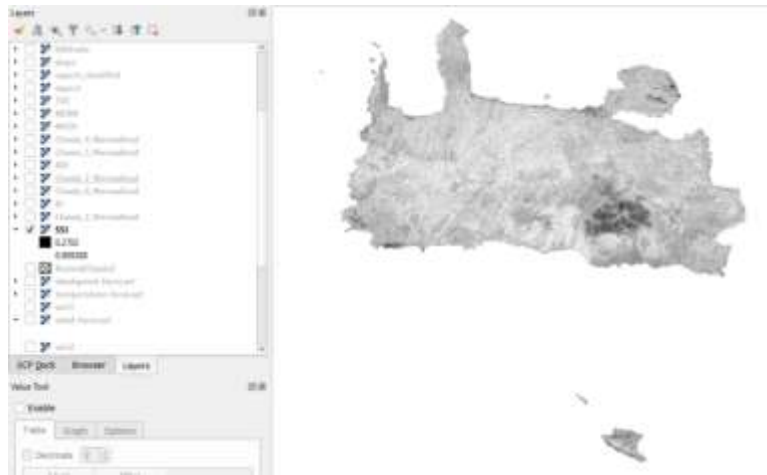
### Υπολογισμός SSI

Ο κανονικοποιημένος δείκτης σκίασης SSI, θα υπολογιστεί από τον τύπο.

$$SSI_{L8} = \sqrt[3]{(1 - B2) * (1 - B3) * (1 - B4)}$$

Ομοίως με χρήση του Raster Calculator, για τις κανονικοποιημένες τιμές των layers:

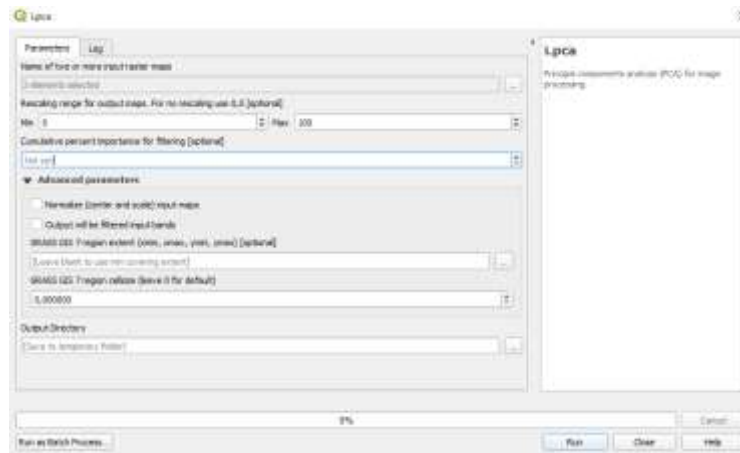
$$(( 1 - "Chania_2_Normalized@1" ) * ( 1 - "Chania_3_Normalized@1" ) * ( 1 - "Chania_4_Normalized@1" ) ) ^ ( 1/3 )$$



Εικόνα 58 Δείκτης SSI

### Υπολογισμός Vegetation Cover Density

Ο δείκτης πυκνότητας βλάστησης VD υπολογίζεται με Ανάλυση κυρίων συνιστωσών (Principal Components Analysis, PCA) των δεικτών AVI και BI. Για τον υπολογισμό του θα χρησιμοποιηθεί το εργαλείο του GRASS *i.pca* με χρήση κλίμακας από 0 έως 100.



Εικόνα 59 Χρήση *i.pca* για τον υπολογισμό του δείκτη VD



Εικόνα 60 Δείκτης VD

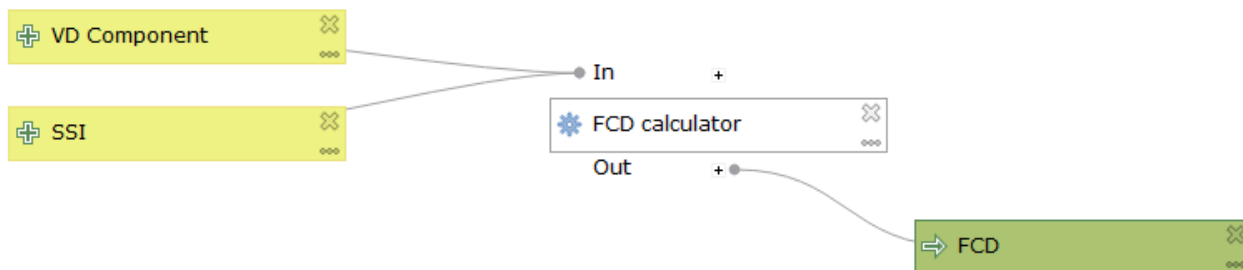
Υπολογισμός δείκτη Forest Canopy Density

Τέλος, ο δείκτης πυκνότητας βλάστησης Forest Canopy Density, θα υπολογιστεί από τον τύπο:

$$FCD = \sqrt{VD \times SSI + 1} - 1$$

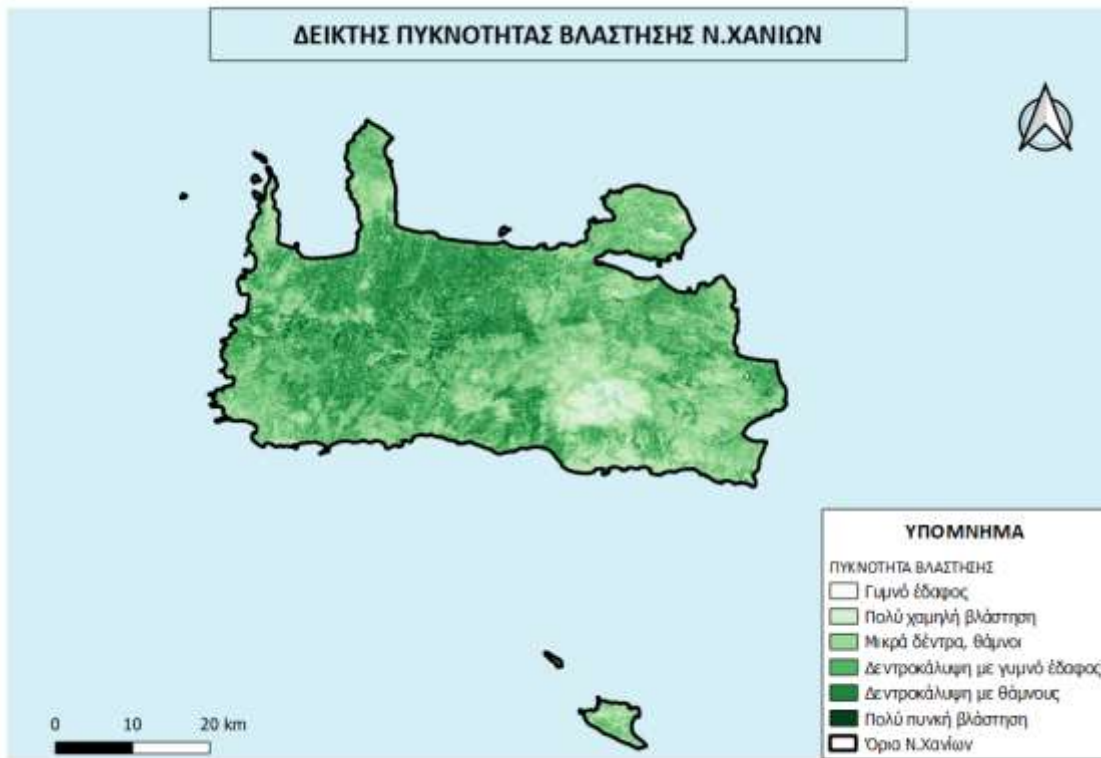
Με χρήση του εργαλείου raster calculator:

$$("VD \text{ Component}@1" * "SSI@1"+1) ^ (1/2)-1$$



Εικόνα 61 Υπολογισμός FCD με χρήση Modeler Processor

Κατηγοριοποιώντας τις τιμές του δείκτη FCD σε 6 κλάσεις, προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης πυκνότητας βλάστησης:



Χάρτης 6 Δείκτης πυκνότητας βλάστησης FCD Ν. Χανίων

## Παρουσίαση δεικτών υγρασίας καυσίμου

Με βάση την αξιολόγηση των δεικτών που προηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο αλλά και την βιβλιογραφία που αναφέρθηκε, ο δείκτης Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) θεωρείται το πιο πλήρες μοντέλο υγρασίας καυσίμου.

### Παρουσίαση δείκτη Canadian Forest Fire Weather Index (FWI)

Λόγω της πολυπλοκότητας του υπολογισμού του δείκτη FWI σε συνδυασμό με την έλλειψη δεδομένων για την περιοχή, η εισαγωγή των δεδομένων για τον Ν. Χανίων θα γίνει από τον WMS server του Ευρωπαϊκού Πληροφοριακού Συστήματος Δασικών Πυρκαγιών (European Forest Fire Information System-EFFIS).

Το Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφοριών για τις Δασικές Πυρκαγιές (EFFIS) παρέχει, σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, πληροφορίες σχετικά με τις δασικές πυρκαγιές στις περιοχές της Ευρώπης, της Μέσης Ανατολής και της Βόρειας Αφρικής. Η παρακολούθηση της πυρκαγιάς στο EFFIS περιλαμβάνει τον πλήρη κύκλο πυρκαγιάς παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες πριν από την πυρκαγιά, την εξέλιξη της αλλά και μετά το τέλος της πυρκαγιάς για την αξιολόγηση των ζημιών.

Ο κίνδυνος πυρκαγιάς χαρτογραφείται σε 6 κατηγορίες (πολύ χαμηλή, χαμηλή, μεσαία, υψηλή, πολύ υψηλή και ακραία) με χωρική ανάλυση περίπου 16 km (δεδομένα European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ), 10 km (δεδομένα Meteo-France MF) και 36 km (δεδομένα German weather forecasting service (DWD)). Τα επίπεδα κινδύνου πυρκαγιάς είναι τα ίδια για όλες τις χώρες και οι χάρτες δείχνουν μια εναρμονισμένη εικόνα της χωρικής κατανομής της επικινδυνότητας πυρκαγιάς σε ολόκληρη την ΕΕ.

Ακολουθούν οι τιμές FWI που χρησιμοποιούνται ως κατώφλια των τάξεων κινδύνου πυρκαγιάς στον χάρτη:

Fire Danger Classes	FWI ranges (upper bound excluded)
Very low	< 5.2
Low	5.2 - 11.2
Moderate	11.2 - 21.3
High	21.3 - 38.0
Very high	38.0 - 50.0
Extreme	>= 50.0

*Πίνακας 27 Διαβάθμιση επικινδυνότητας για τον δείκτη FWI (User Guide to EFFIS applications, 2018)*

Ο δείκτης FWI για την ευρύτερη περιοχή της μεσογείου, τις ημέρες του Αυγούστου παρουσιάζεται στην Εικόνα 62.

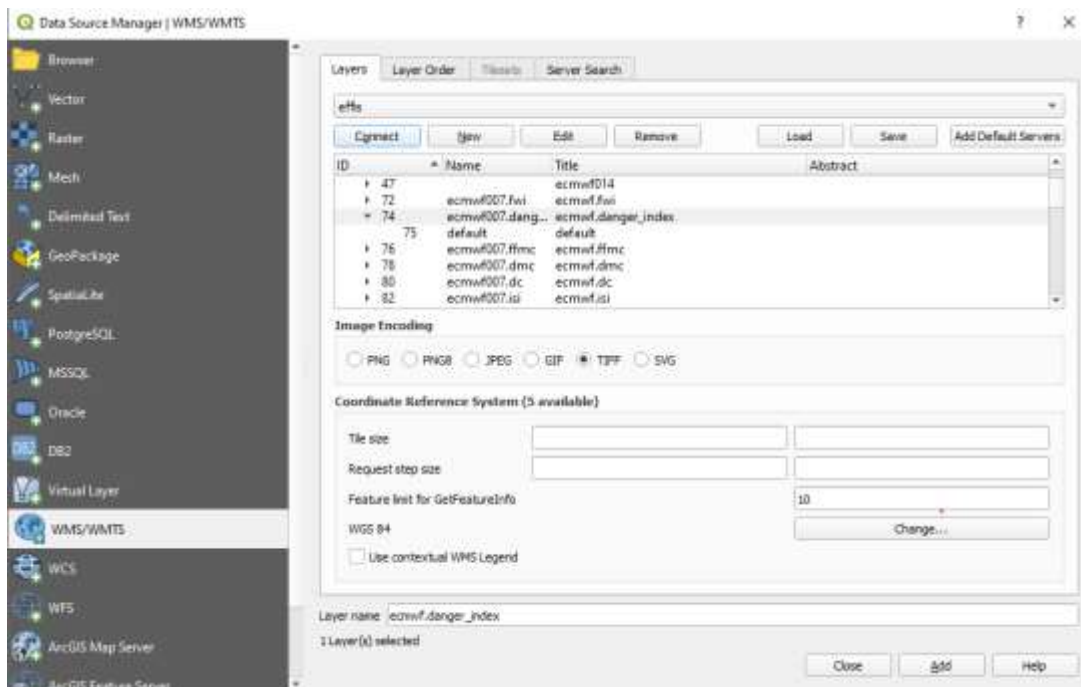


Εικόνα 62 Δείκτης FWI για την ευρύτερη περιοχή της μεσογείου

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πληροφορίες του EFFIS WMS layer.

<b>Name</b>	ecmwf007.ffmc	
<b>Title</b>	ecmwf.ffmc	
<b>WMS GetCapabilities URL</b>	<a href="https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/effis?language=eng&amp;">https://ies-ows.jrc.ec.europa.eu/effis?language=eng&amp;</a>	
<b>Formats supported by GetMap</b>	image/png, image/gif, image/png; mode=8bit, image/jpeg, image/tiff, application/x-pdf, image/svg+xml, application/vnd.google-earth.kml+xml, application/vnd.google-earth.kmz	
<b>EPSG Code (WMS)</b>	EPSG:3034, EPSG:3035, EPSG:3857, EPSG:4326, EPSG:900913	
<b>Locations covered (approx.)</b>	Global	
<b>Approx. area of coverage</b>	510,065,621 km <sup>2</sup>	
<b>Keywords</b>	Europe, FWI, Fire Weather Index, Forest, Forest Fires, Wildfire	
<b>WGS84 Bounding Box</b>	Min X (lower left)	-180
	Min Y (lower left)	-90
	Max X (upper right)	180
	Max Y (upper right)	90
<b>Native Bounding Box</b>	SRS	EPSG:4326
	Min X	-90
	Min Y	-180
	Max X	90
	Max Y	180

Πίνακας 28 Πληροφορίες EFFIS Layer



Εικόνα 63 Εισαγωγή δείκτη FWI ως WMS layer

Πιο συγκεκριμένα για την περιοχή μελέτης:



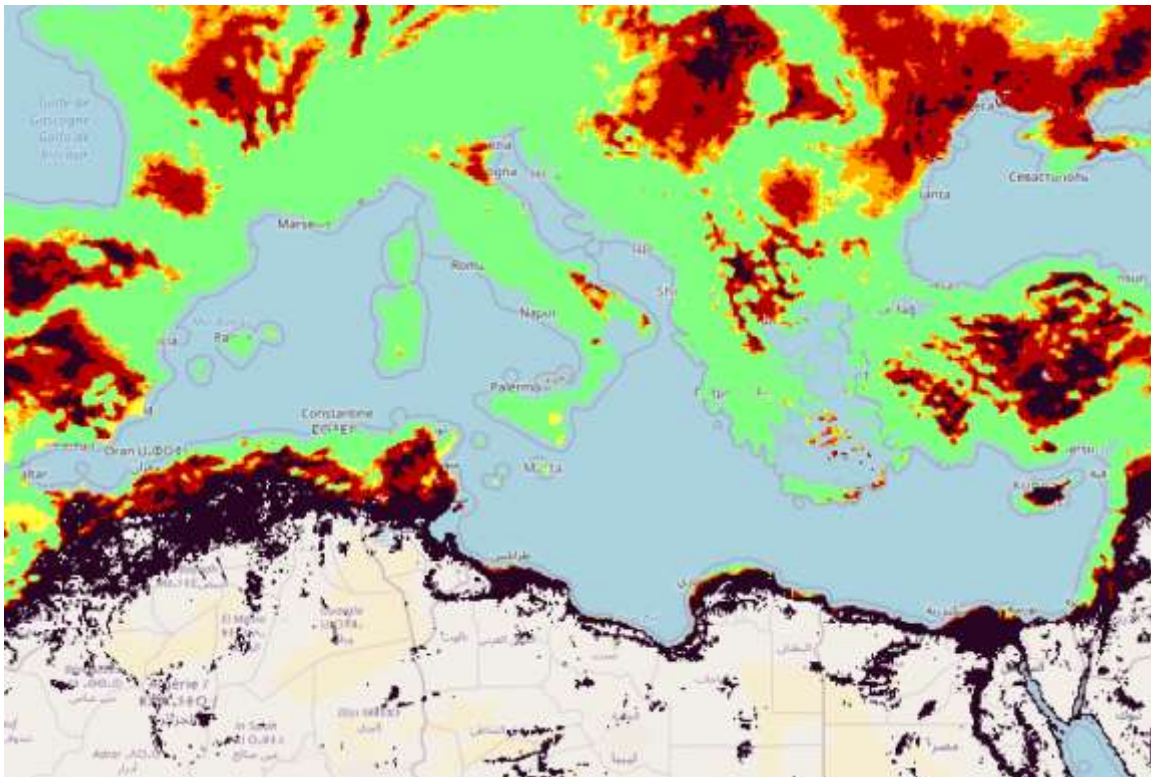
Χάρτης 7 Δείκτης επικινδυνότητας υγρασίας καυσίμου FWI

Να σημειωθεί ότι ο δείκτης έχει ακριβώς την ίδια εικόνα καθ' όλη την διάρκεια του φετινού καλοκαιριού. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπήρχε κίνδυνος αυτανάφλεξης της καύσιμης ύλης και οι πυρκαγιές που συνέβησαν φέτος το καλοκαίρι προκλήθηκαν από ανθρωπογενή παράγοντα.

Παρουσίαση δείκτη Keetch-Byram Drought Index (KBDI)

Και για αυτόν τον δείκτη, η εισαγωγή των δεδομένων για τον Ν. Χανίων θα γίνει από τον WMS server του Ευρωπαϊκού Πληροφοριακού Συστήματος Δασικών Πυρκαγιών (European Forest Fire Information System-EFFIS).

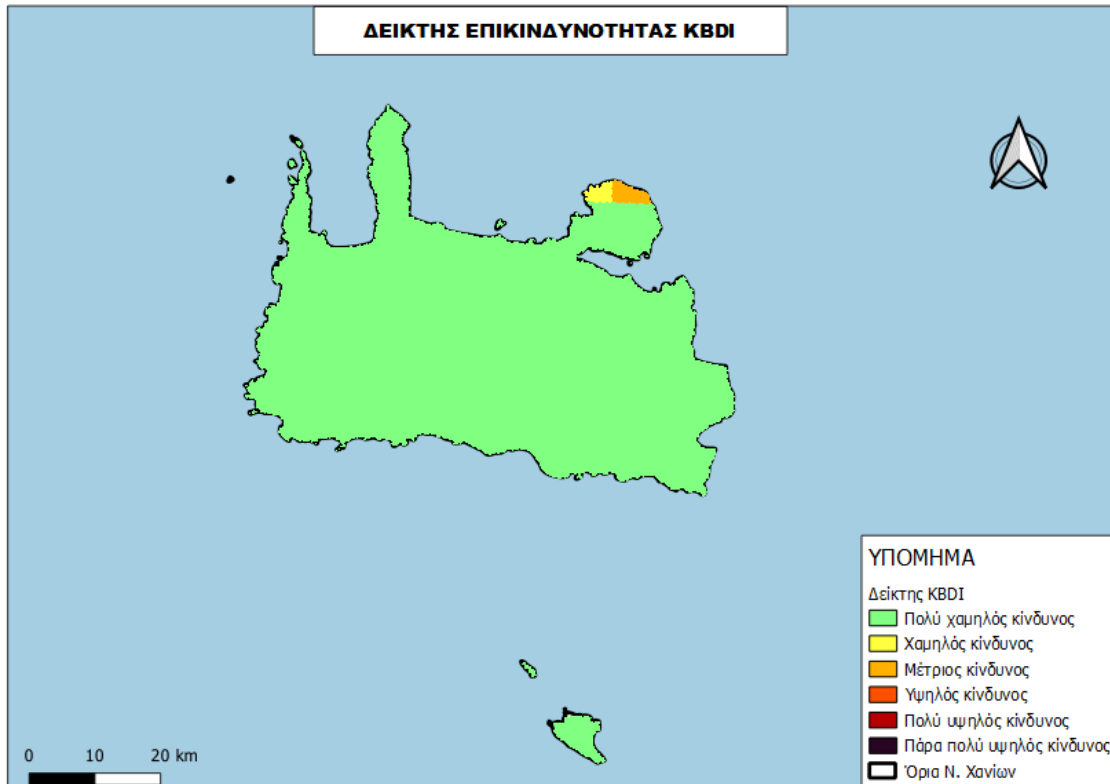
Δείκτης KBDI για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου:



Εικόνα 64 Δείκτης KBDI για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου



Για την περιοχή μελέτης:



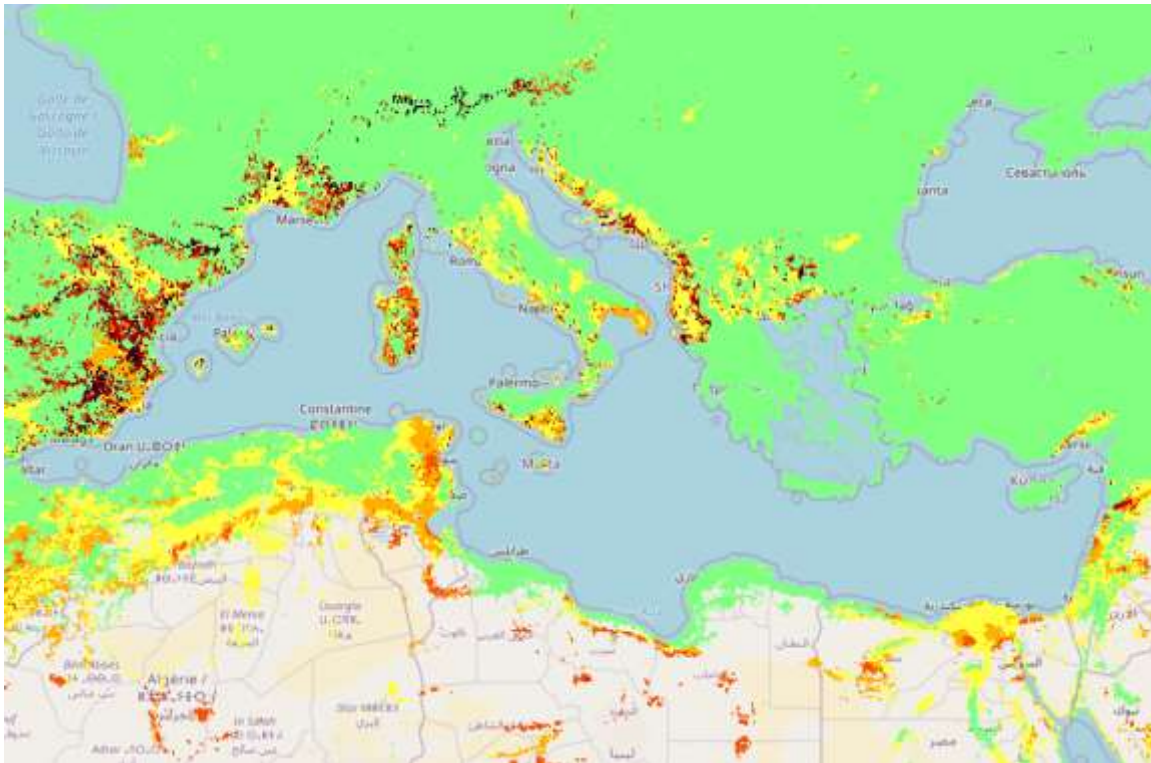
Χάρτης 8 Χάρτης επικινδυνότητας ΚΒΔΙ

Αυτός ο δείκτης δείχνει το βόρειο τμήμα του Ακρωτηρίου με αυξημένη επικινδυνότητα σε σχέση με το υπόλοιπο νομό. Ο δείκτης ΚΒΔΙ βασίζεται κυρίως στην ξηρασία του εδάφους σε συνδυασμό με τις μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Το Ακρωτήριο έχει ελάχιστη βλάστηση, πολύ ξηρό έδαφος και εκτίθεται σε υψηλούς ανέμους συνεπώς είναι λογικό ο δείκτης ξηρασίας να είναι πιο υψηλός.

Παρουσίαση δείκτη Baumgartner Index (BI)

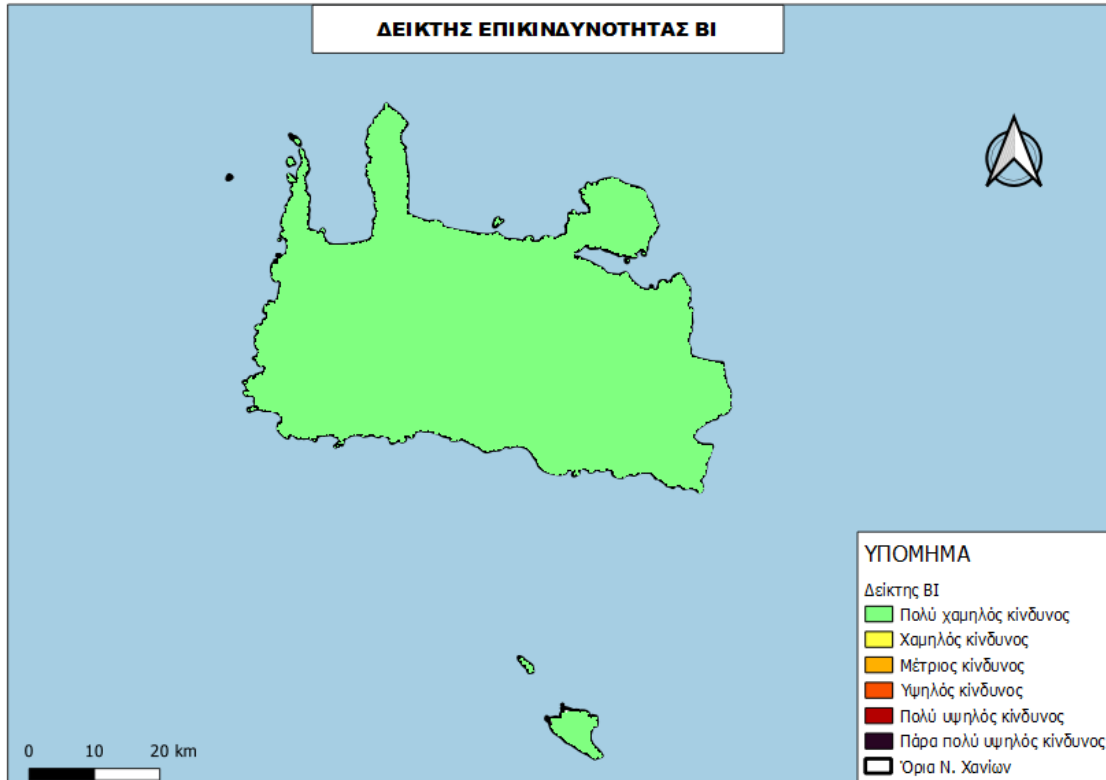
Επίσης για αυτόν τον δείκτη, η εισαγωγή των δεδομένων για τον Ν. Χαλίων θα γίνει από τον WMS server του Ευρωπαϊκού Πληροφοριακού Συστήματος Δασικών Πυρκαγιών (European Forest Fire Information System-EFFIS).

Ο δείκτης BI για την ευρύτερη περιοχή της μεσογείου, τις ημέρες του Αυγούστου παρουσιάζεται στην Εικόνα 65.



Εικόνα 65 Δείκτης BI στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου

Πιο ειδικά για την περιοχή μελέτης:



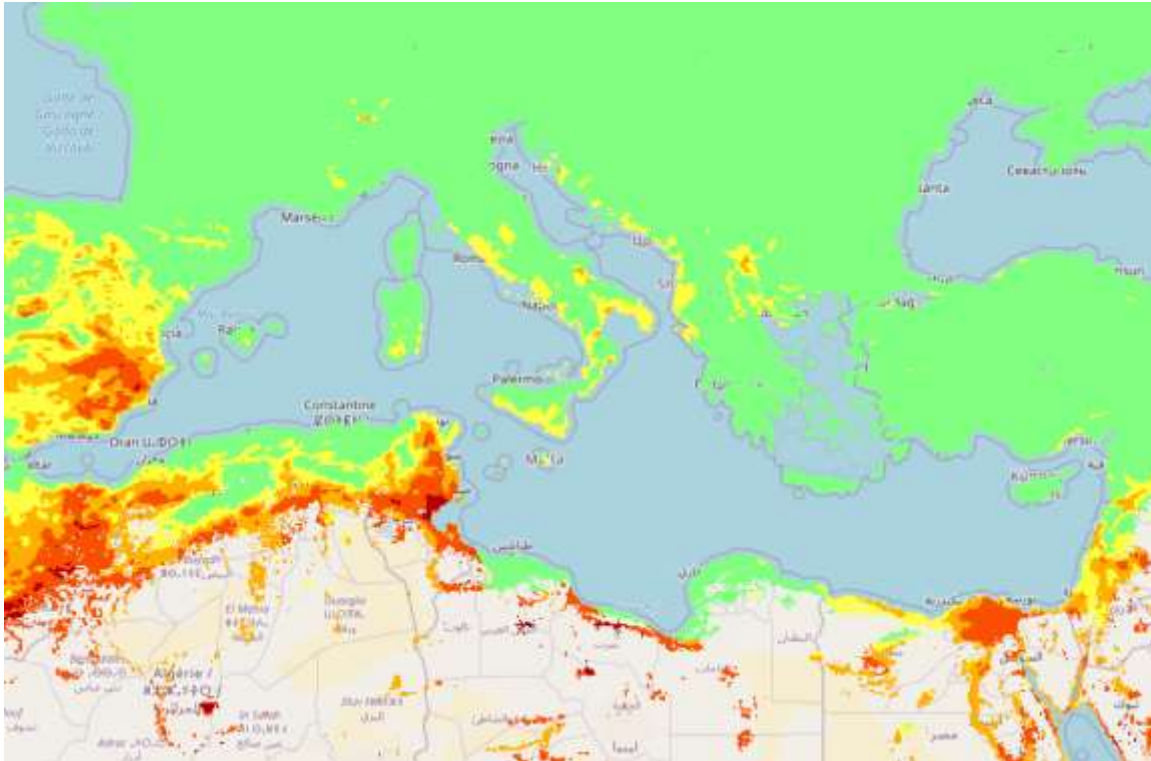
Χάρτης 9 Χάρτης επικινδυνότητας ΒΙ

Παρατηρείται ότι και ο δείκτης ΒΙ αποτυπώνει την περιοχή του Ν. Χανίων ως μια περιοχή πολύ χαμηλού κινδύνου. Ο υπολογισμός του δείκτη Baumgartner υπολογίζεται με βάση ημερήσια βροχόπτωση [mm] και την πιθανή εξατμισοδιαπνοή και έχει σκοπό να αποτυπώσει τις πιο ξηρές περιοχές.

Παρουσίαση δείκτη Fire Danger Index (FDI)

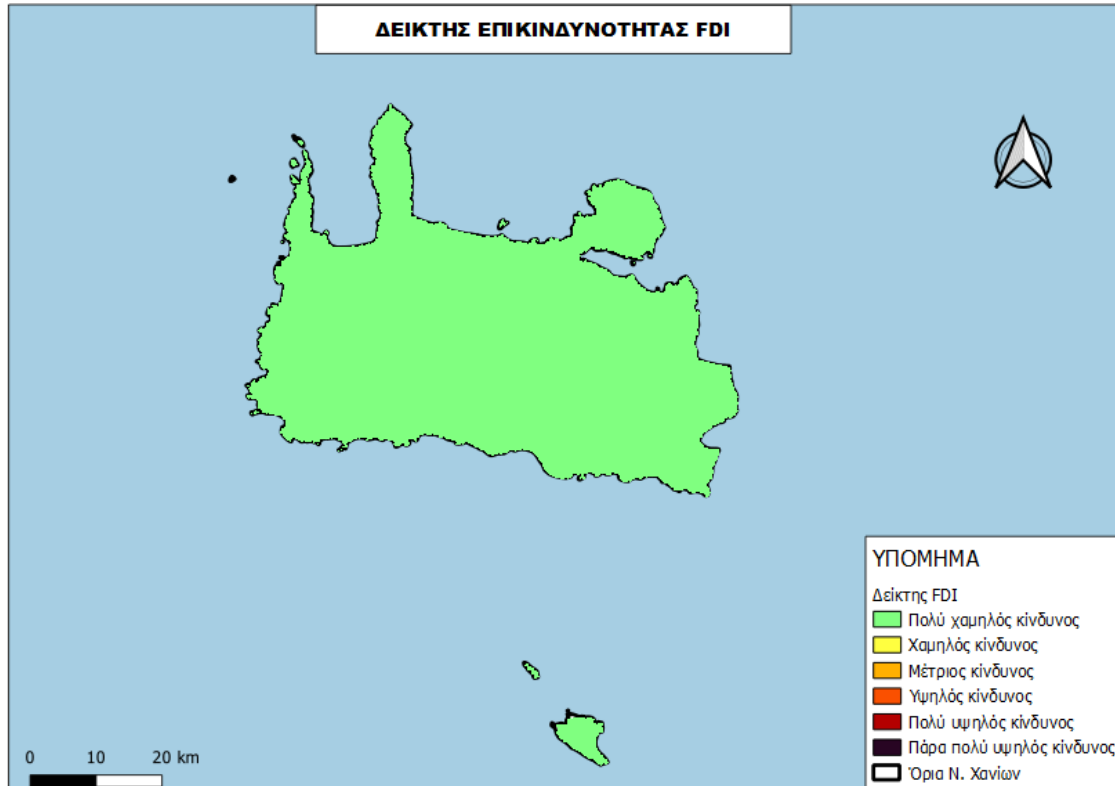
Ομοίως, ο δείκτης παρέχεται από τον WMS server του Ευρωπαϊκού Πληροφοριακού Συστήματος Δασικών Πυρκαγιών (European Forest Fire Information System-EFFIS).

Ο δείκτης FDI για την ευρύτερη περιοχή της μεσογείου, τις ημέρες του Αυγούστου παρουσιάζεται στην Εικόνα 66.



Εικόνα 66 Τιμές δείκτη FDI για την ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου

Για το Νομό Χανίων:



Χάρτης 10 Χάρτης επικινδυνότητας FDI

Ο δείκτης FDI είναι άλλος ένας δείκτης βλάστησης καυσίμου που απεικονίζει το Ν. Χανίων ως μια περιοχή πολύ χαμηλού κινδύνου για εκδήλωση πυρκαγιάς. Ο δείκτης κατασκευάστηκε με σκοπό την πρόβλεψη πυρκαγιάς σε δάση ευκαλύπτου και έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως στην Ανατολική Αυστραλία. Για τον υπολογισμό του απαιτείται η θερμοκρασία, η σχετική υγρασία, η ταχύτητα ανέμου και ο δείκτης διαθεσιμότητας καυσίμου (δηλαδή συντελεστής ξηρασίας).

## Υπολογισμός τοπογραφικών δεικτών επικινδυνότητας

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει ο υπολογισμός των τοπογραφικών δεικτών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και οι μεταβλητές τους μπορούν να υπολογιστούν. Στο τέλος της ενότητας, θα πρέπει κάποιο μοντέλο να ταιριάζει με τις περιοχές των καμένων εκτάσεων κατά τα έτη 2000-2019.

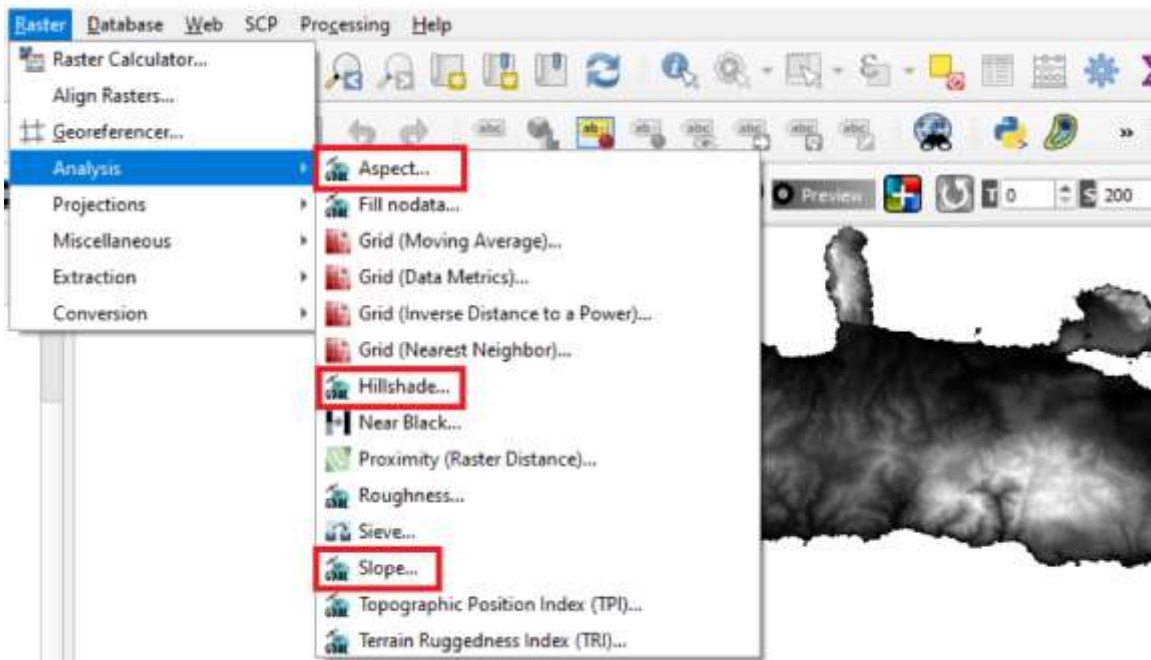
### Υπολογισμός δείκτη TDI

Ο δείκτης Topographic Danger Index θα χρησιμοποιηθεί για να απεικονίσει την επίδραση της τοπογραφίας στο χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιάς.

$$TDI = 17.4 * \text{Elevation(m)} + 7.2 * \text{Slope(\%)} + 4.8 * \text{Aspect}$$

Για τον υπολογισμό του δείκτη απαιτούνται η κλίση, το υψόμετρο και ο προσανατολισμός του εδάφους. Σαν βάση για την υλοποίηση των layers, χρησιμοποιήθηκαν τα αρχεία DEM (Digital Elevation Models) για την περιοχή μελέτης από την ιστοσελίδα <https://opendem.info/>.

Με χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους και του εργαλείου Raster Analysis του QGIS, δημιουργήθηκαν τα αντίστοιχα rasters για το υψόμετρο, τον προσανατολισμό και τις κλίσεις των πρανών.



Εικόνα 67 Δημιουργία Rasters υψόμετρου, προσανατολισμού και κλίσης

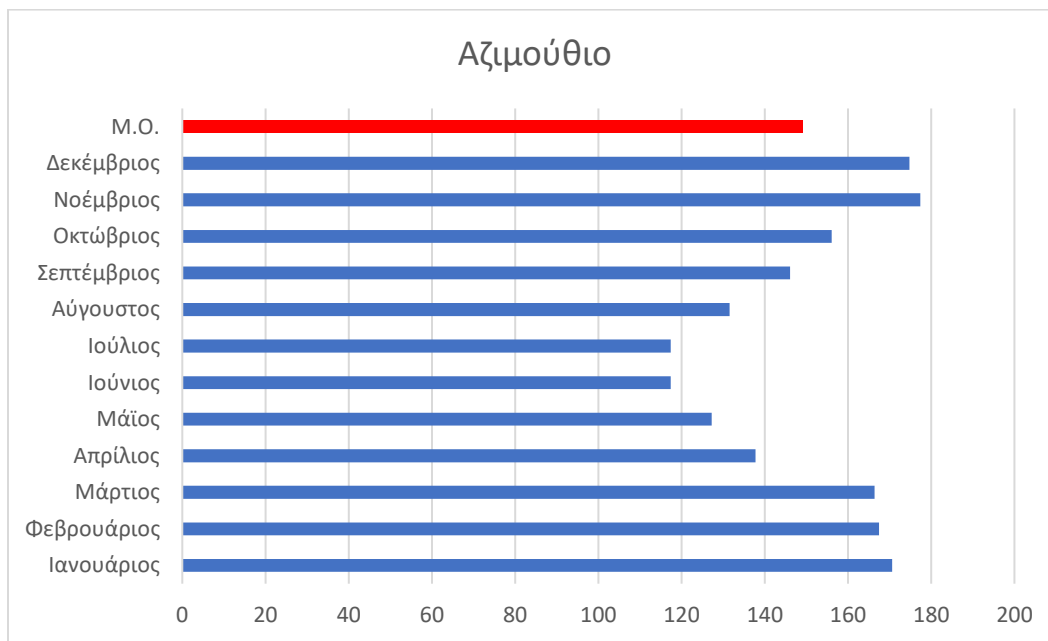
Πριν τον υπολογισμό του δείκτη TDI, θα γίνει ταξινόμηση του προσανατολισμού (aspect). Δεδομένου ότι οι πλαγιές με περισσότερη ηλιοφάνεια θα είναι οι πιο θερμές και οι πιο ξηρές.

Με χρήση των δεδομένων από την ιστοσελίδα [www.suncalc.org](http://www.suncalc.org) υπολογίστηκε το αζιμούθιο στις 15 κάθε μήνα, στις 12 το μεσημέρι λαμβάνοντας υπόψιν τη θερινή ώρα για τους μήνες

Απρίλιο έως Οκτώβριο. Ο μέσος όρος είναι 149,18°, συνεπώς οι περιοχές με νοτιοανατολική κατεύθυνση προσανατολισμού είναι οι πιο θερμές και ξηρές.

Μήνας	Αζιμούθιο
Ιανουάριος	170.63
Φεβρουάριος	167.48
Μάρτιος	166.41
Απρίλιος	137.81
Μάιος	127.27
Ιούνιος	117.36
Ιούλιος	117.43
Αύγουστος	131.57
Σεπτέμβριος	146.07
Οκτώβριος	156.06
Νοέμβριος	177.37
Δεκέμβριος	174.73
<b>Μ.Ο.</b>	<b>149.1825</b>

Πίνακας 29 Τιμές αζιμούθιου για τις 15 κάθε μήνα στις 12 το μεσημέρι



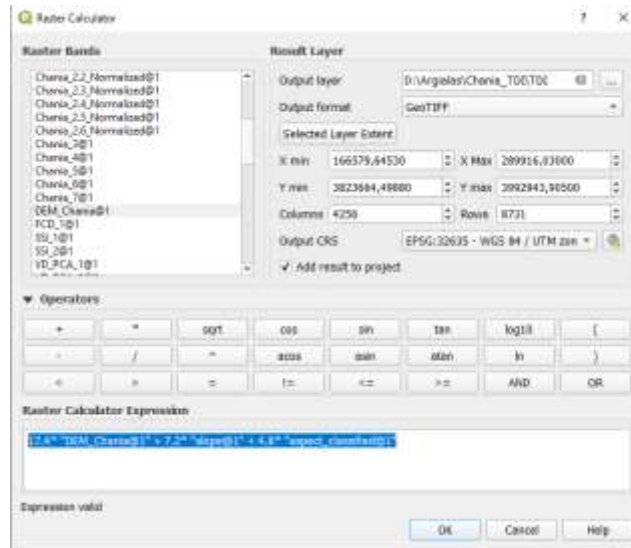
Εικόνα 68 Μηνιαίες τιμές και μέσος όρος αζιμούθιων

Η ταξινόμηση υλοποιήθηκε με χρήση του Raster Calculator, ως ακολούθως:

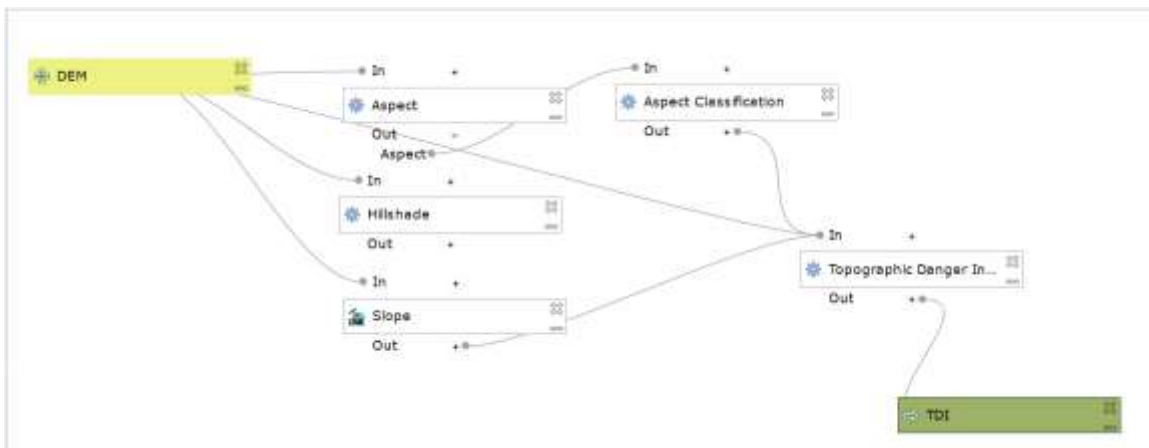
$$\begin{aligned}
 & ( 0.0 \leq \text{"aspect@1"} ) * 5 + \\
 & ( ( 22.5 \leq \text{"aspect@1"} ) \text{ AND } ( \text{"aspect@1"} < 67.499 ) ) * 40 + \\
 & ( ( 67.5 \leq \text{"aspect@1"} ) \text{ AND } ( \text{"aspect@1"} < 112.499 ) ) * 60 + \\
 & ( ( 112.5 \leq \text{"aspect@1"} ) \text{ AND } ( \text{"aspect@1"} < 157.499 ) ) * 80 + \\
 & ( ( 157.5 \leq \text{"aspect@1"} ) \text{ AND } ( \text{"aspect@1"} < 202.499 ) ) * 60 + \\
 & ( ( 202.5 \leq \text{"aspect@1"} ) \text{ AND } ( \text{"aspect@1"} < 247.499 ) ) * 40 + \\
 & ( ( 247.5 \leq \text{"aspect@1"} ) \text{ AND } ( \text{"aspect@1"} < 292.499 ) ) * 20 + \\
 & ( ( 292.5 \leq \text{"aspect@1"} ) \text{ AND } ( \text{"aspect@1"} < 337.499 ) ) * 10 + \\
 & ( 337.5 \leq \text{"aspect@1"} ) * 5
 \end{aligned}$$

Τέλος, με χρήση του Raster Calculator, για τις κανονικοποιημένες τιμές των μεταβλητών, υπολογίζεται ο δείκτης TDI:

$$17.4 * \text{"DEM\_Chania@1"} + 7.2 * \text{"slope@1"} + 4.8 * \text{"aspect\_classified@1"}$$



Εικόνα 69 Υπολογισμός δείκτη TDI



Εικόνα 70 Υπολογισμός TDI με modeler

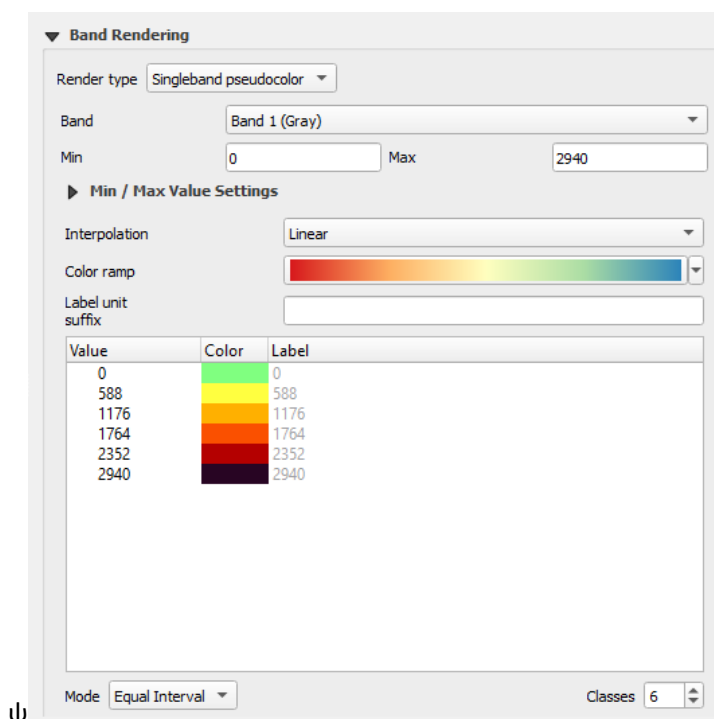


Ο δείκτης TDI, με βάση τον παραπάνω τύπο, μπορεί να λάβει τιμές στο διάστημα [0 - 2940]. Η ταξινόμηση θα γίνει σε 6 ίσες κλάσεις. Ο αριθμός των κλάσεων που χρησιμοποιούν τα περισσότερα μοντέλα αλλά και ο καναδικός δείκτης καυσίμου είναι συνολικά έξι. Ο δείκτης που δίνει ο wms server του effis χρησιμοποιεί 6 διαβαθμίσεις επικινδυνότητας με τα εξής χρώματα:



Εικόνα 71 Κλάσεις επικινδυνότητας δείκτη FWI από τον wms server του effis.

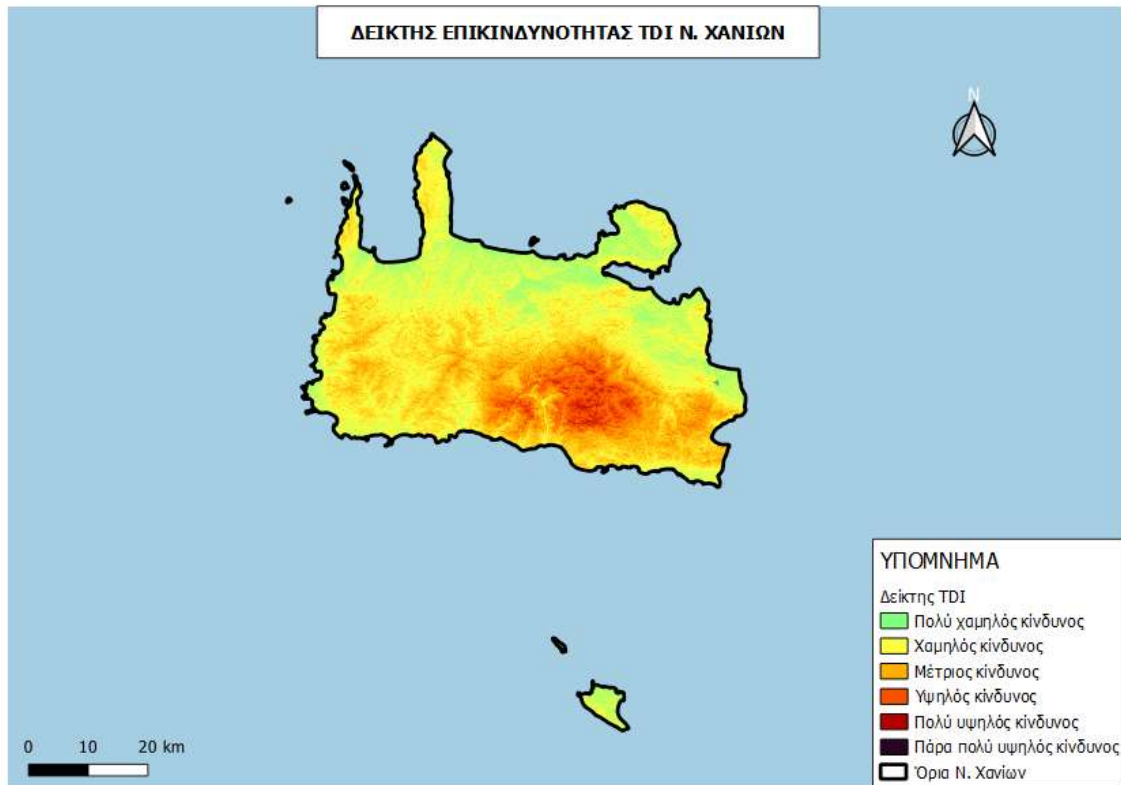
Σε όλους τους χάρτες, θα γίνει ταξινόμηση των τιμών σε έξι κλάσεις με την ίδια επιλογή χρωμάτων του effis wms server.



ψ

Εικόνα 72 Band rendering για το TDI raster.

Και προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης επικινδυνότητας πυρκαγιάς του δείκτη TDI:



Χάρτης 11 Τοπογραφικός δείκτης επικινδυνότητας Ν. Χανίων

Για τον δείκτη TDI, οι πιο επικίνδυνες περιοχές είναι αυτές που έχουν έντονο ανάγλυφο. Οι πιο επικίνδυνες περιοχές βρίσκονται στα τα Λευκά Όρη τα οποία έχουν μέγιστο υψόμετρο εντός νομού τα 2400 μέτρα.

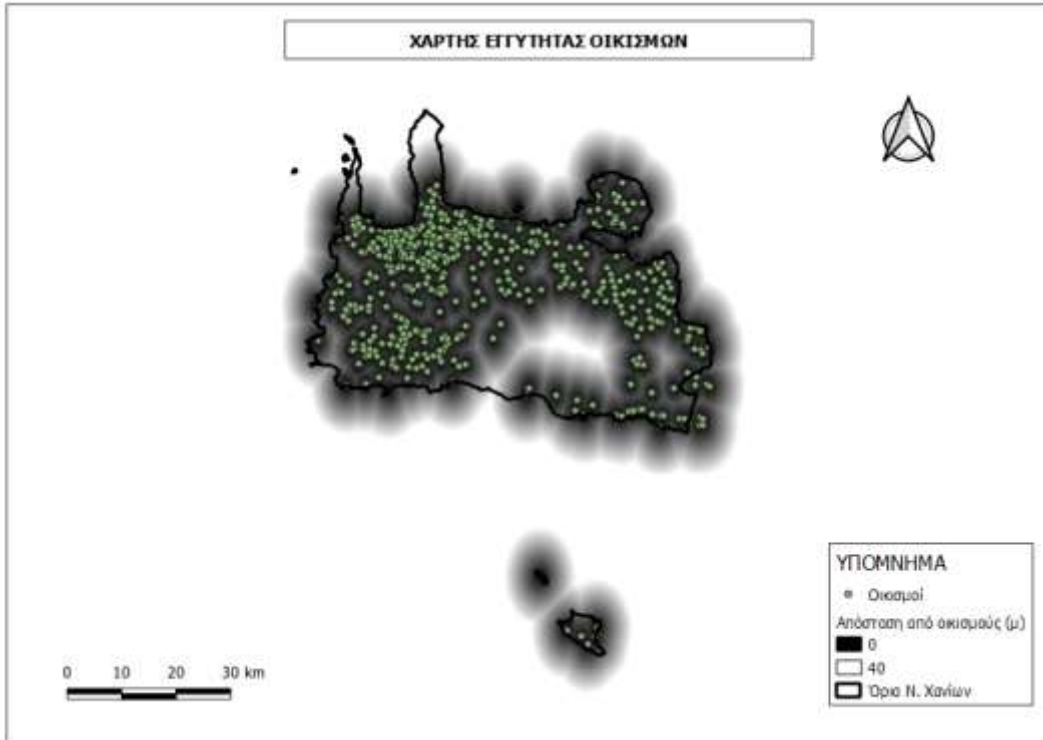
Υπολογισμός δείκτη Fire Risk (FR)

Ο δείκτης FR λαμβάνει υπόψη του τη βλάστηση  $F$ , τον ανθρώπινο παράγοντα  $H$ , την ύπαρξη των δρόμων  $R$  και την κλίση του εδάφους. Υπολογίζεται από τον τύπο:

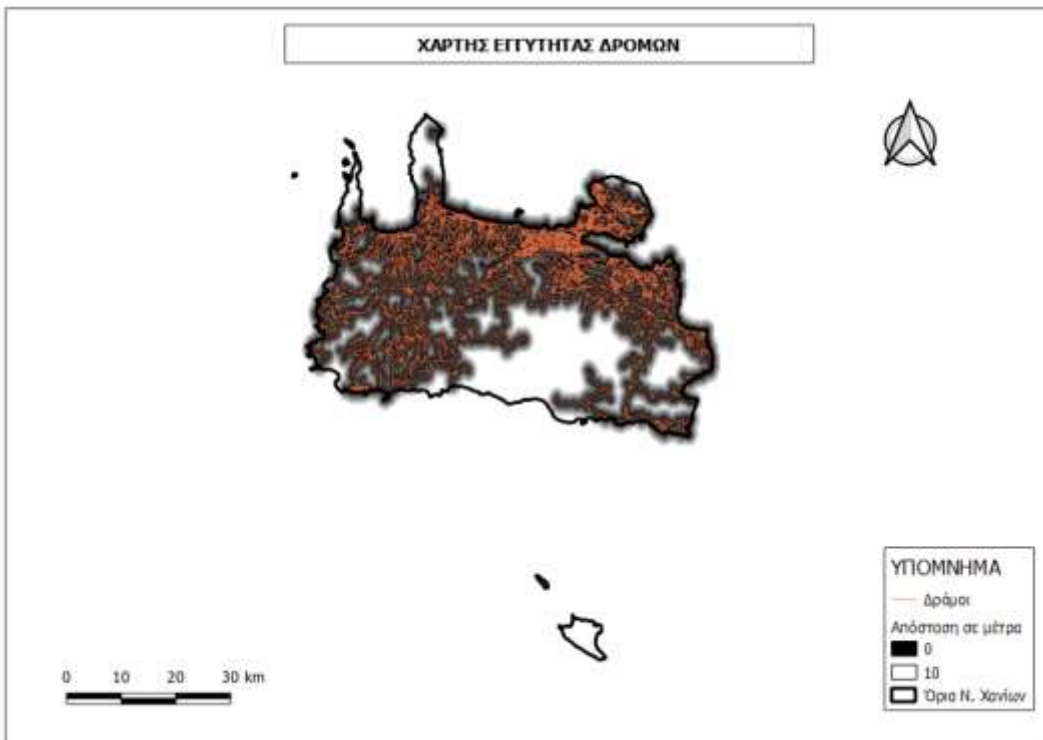
$$FR = 10 F + 2 H + 2 R + 3 S$$

Για το Ν. Χανίων, για τον παράγοντα βλάστηση θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης Forest Canopy Index, για τον ανθρώπινο παράγοντα θα δημιουργηθεί ένας χάρτης εγγύτητας από τους οικισμούς και για τον παράγοντα του οδικού δικτύου, θα χρησιμοποιηθεί ένας χάρτης εγγύτητας από τους δρόμους.

Για την δημιουργία των χαρτών εγγύτητας, μετατρέπεται αρχικά το vector layer σε raster και έπειτα χρησιμοποιείται το proximity tool.



Χάρτης 12 Χάρτης εγγύτητας οικισμών (40μ)



Χάρτης 13 Χάρτης εγγύτητας δρόμων

Για τον υπολογισμό του δείκτη FR, απαιτούνται οι κανονικοποιημένες τιμές των μεταβλητών του στο εύρος 0-100. Η κανονικοποίηση θα υλοποιηθεί με χρήση του raster calculator, ως εξής:

Για την κανονικοποίηση του δείκτη FCD: "FCD@1" \* ( 100/9 )

Για την κανονικοποίηση της κλίσης "slope@1" /2

Για την κανονικοποίηση του ανθρώπινου παράγοντα:

"Chania\_oikismoi\_proximity@1" \*(100/367)

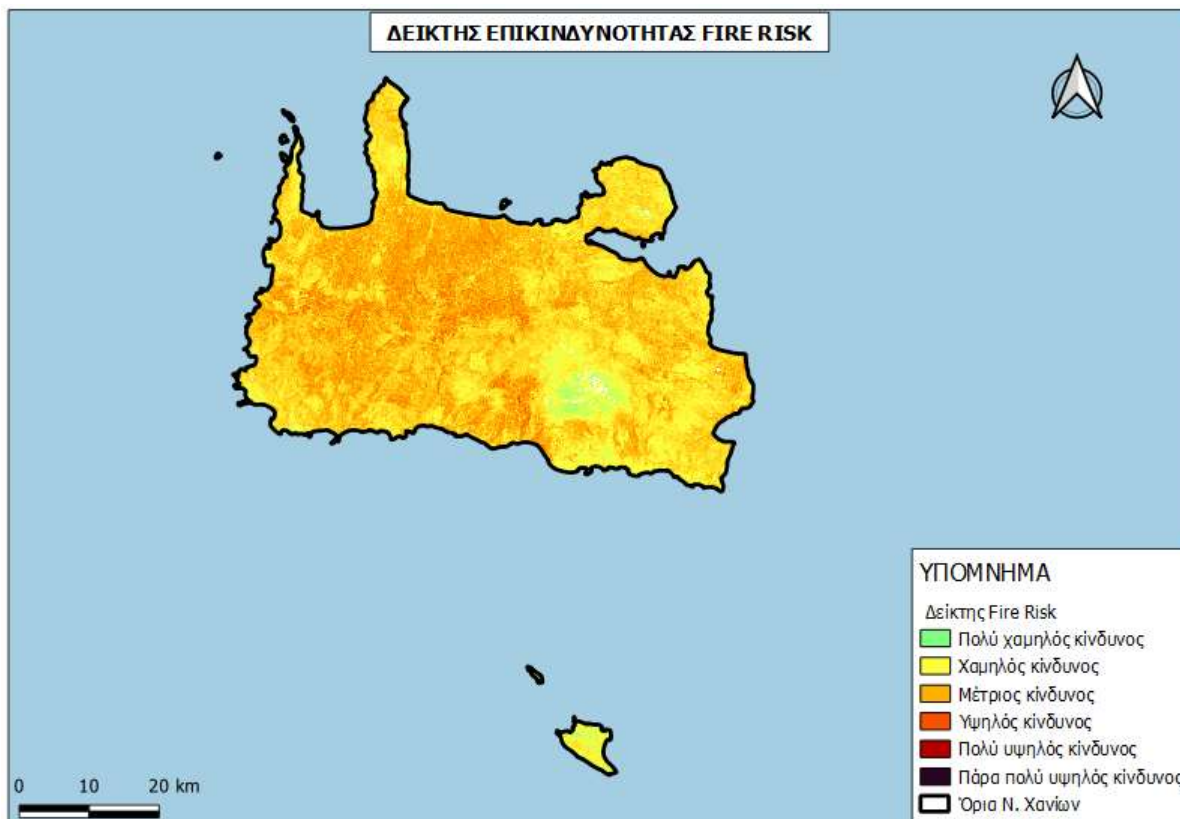
Για την κανονικοποίηση του οδικού δικτύου:

"Chania\_roads\_proximity@1" \* ( 100/371)

Τέλος, υπολογίζεται και ο δείκτης FR:

$$10 * "FCD\_0\_100@1" + 2 *(1 - "oikismoi\_prox\_0\_100@1" ) + 2 * (1 - "roads\_prox\_0\_100@1" ) + 3 * "slope\_0\_200\_norm@1"$$

Ο δείκτης FR έχει εύρος τιμών 0 – 1700 και μετά την ταξινόμηση των τιμών του σε 6 κλάσεις, προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης:



Χάρτης 14 δείκτης επικινδυνότητας FR

Ο δείκτης FR συνυπολογίζει τη βλάστηση και την κλίση του εδάφους με τον ανθρώπινο παράγοντα για αυτό και παρουσιάζει μια διαφορετική εικόνα από τους προηγούμενους τοπογραφικούς δείκτες. Η γειτνίαση σε οικισμούς και δρόμους αποτελεί βασική παράμετρο επικινδυνότητας. Ο νομός αποτελείται κυρίως από περιοχές χαμηλού και μέτριου κινδύνου.

#### Υπολογισμός δείκτη Risk Index

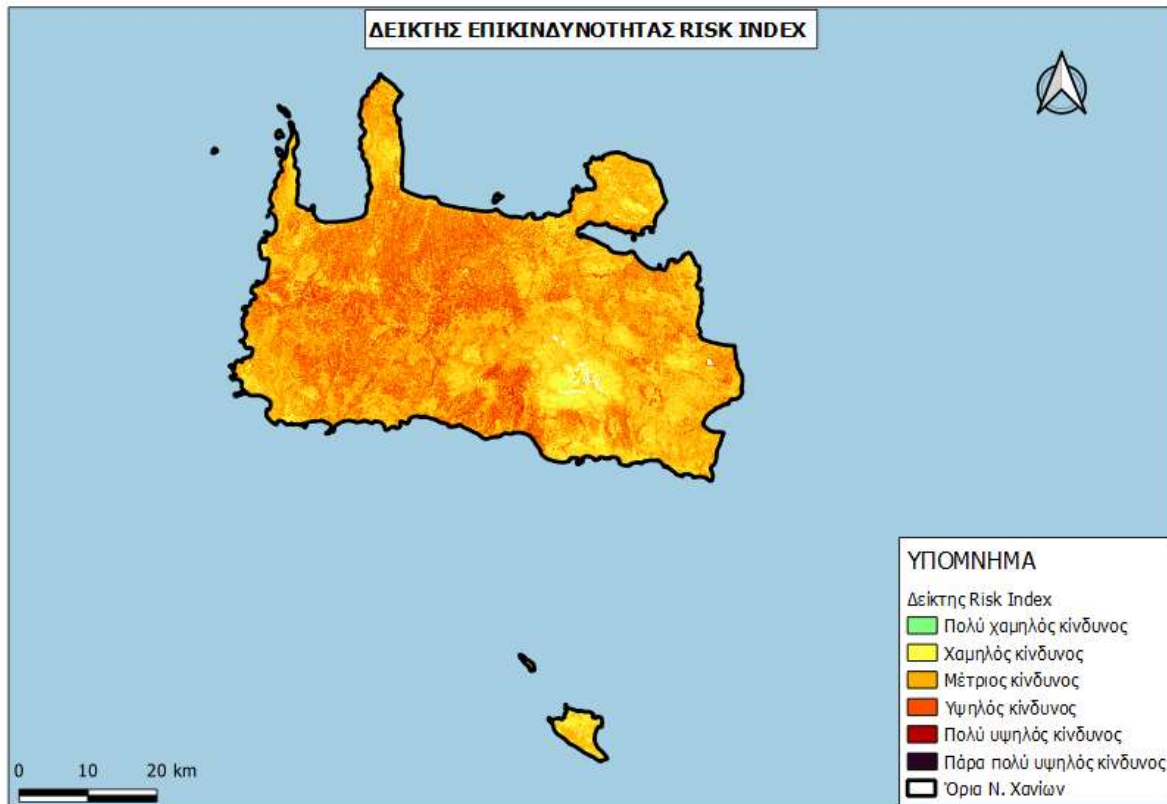
Ο δείκτης RI, συνυπολογίζει τη βλάστηση (Vegetation) στην οποία αποδίδει και τη μεγαλύτερη βαρύτητα, την κλίση (Slope), τον προσανατολισμό (Aspect), την ύπαρξη των δρόμων (Road) και το υψόμετρο (Elevation). Υπολογίζεται από τον τύπο: (Congalton, 1991)

$$RI = 1 + 100V + 30S + 10A + 5R + 2E$$

Ομοίως με τον δείκτη FR, και σε αυτόν το δείκτη για την μεταβλητή της βλάστησης θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης FCD και για την ύπαρξη των δρόμων θα χρησιμοποιηθεί ο αντίστοιχος χάρτης εγγύτητας. Για την μεταβλητή aspect θα χρησιμοποιηθεί το ταξινομημένο layer που χρησιμοποιήθηκε στον υπολογισμό του δείκτη TDI. Το εύρος τιμών των μεταβλητών θα είναι [0,1] και το εύρος τιμών του δείκτη θα είναι [1,148] και οι τιμές θα σε έξι κλάσεις.

Ο υπολογισμός του δείκτη υλοποιήθηκε με χρήση του raster calculator:

$$1 + 100 * "FCD\_0\_1@1" + 30 * "slope\_0\_1@1" + 10 * "aspect\_0\_1@1" + 5 * (1 - "roads\_prox\_0\_1@1") + 2 * "DEM\_0\_1@1"$$



Χάρτης 15 Χάρτης επικινδυνότητας RI

Ο χάρτης RI βασίζεται κυρίως στην ύπαρξη βλάστησης και αυτός είναι ο κύριος λόγος που οι ορεινοί όγκοι δεν είναι επικίνδυνοι. Συνοπολογίζει επίσης και την παρουσία δρόμων, κλίσης και προσανατολισμού. Ο νομός αποτελείται κυρίως από περιοχές μέτριου και υψηλού κινδύνου.

#### Υπολογισμός δείκτη Cumulative Fire Risk Index (CFRISK)

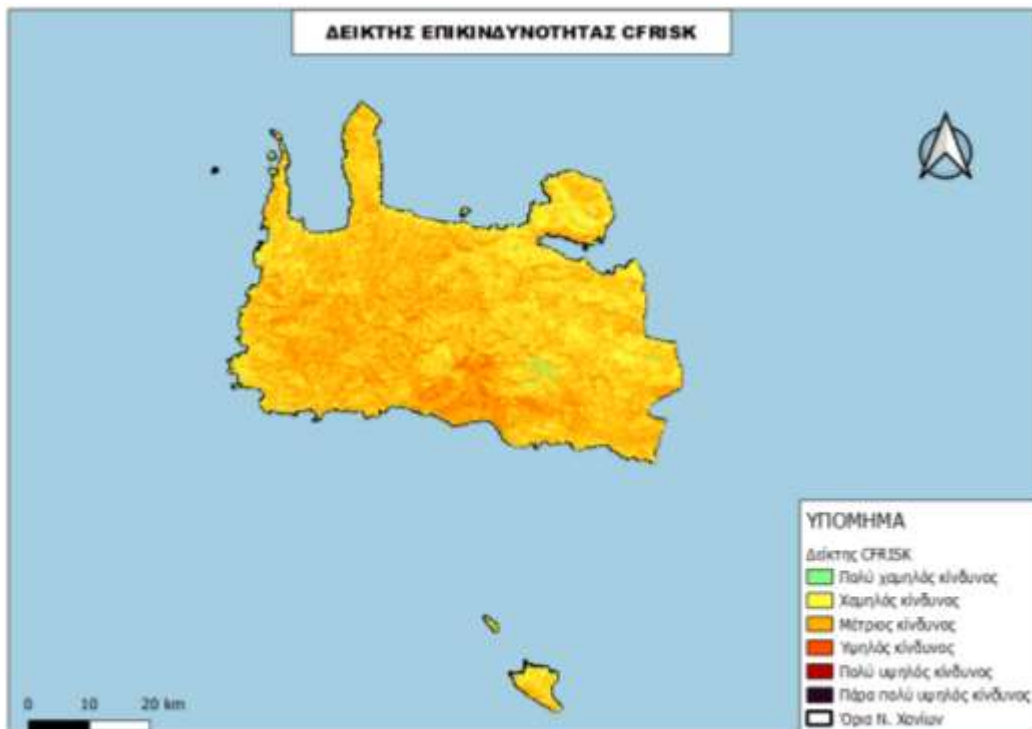
Ο δείκτης CFRISK συνοπολογίζει πέντε παράγοντες στην αξιολόγηση επικινδυνότητας πυρκαγιάς. Το δείκτη FUI (Fuel-Type Index) για τον τύπο καυσίμου, ο οποίος έχει και τη μεγαλύτερη βαρύτητα, το δείκτη ELI (Elevation Index) για το υψόμετρο, το δείκτη SLI (Slope Index) για την κλίση, το δείκτη ASI (Aspect Index) για τον προσανατολισμό, το δείκτη RI (Road Index) για τη παρουσία και τη μορφή του οδικού δικτύου και τον δείκτη SI (Settlement Index) που αφορά την παρουσία υποδομών. Υπολογίζεται από

$$CFRISK = ELI + 2 \cdot SLI + 3 \cdot ASI + SI + RI + 4 \cdot FUI$$

για τον δείκτη FUI, θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης FCD, για τον δείκτη υποδομών θα χρησιμοποιηθεί ο χάρτης εγγύτητας από τους οικισμούς και για τον δείκτη παρουσίας δρόμων ο αντίστοιχος χάρτης εγγύτητας.

$$\begin{aligned} & "DEM\_0\_100@1" + 2 * "slope\_0\_200\_norm@1" + 3 * \\ & "aspect\_0\_100@1" + "oikismo\i\_prox\_0\_100@1" + "roads\_prox\_0\_100@1" + 4 * \\ & "FCD\_0\_100@1" \end{aligned}$$

Το εύρος τιμών του δείκτη είναι 0-1200 και ταξινομώντας τις τιμές σε 6 κλάσεις, προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης επικινδυνότητας:



Χάρτης 16 Χάρτης επικινδυνότητας CFRISK

Με βάση τον δείκτη CFRISK, ο νομός έχει χαμηλή προς μέτρια επικινδυνότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς. Και σε αυτόν το χάρτη το έντονο ανάγλυφο έχει εξουδετερωθεί από τον ανθρώπινο παράγοντα.

Υπολογισμός δείκτη Ignition Risk

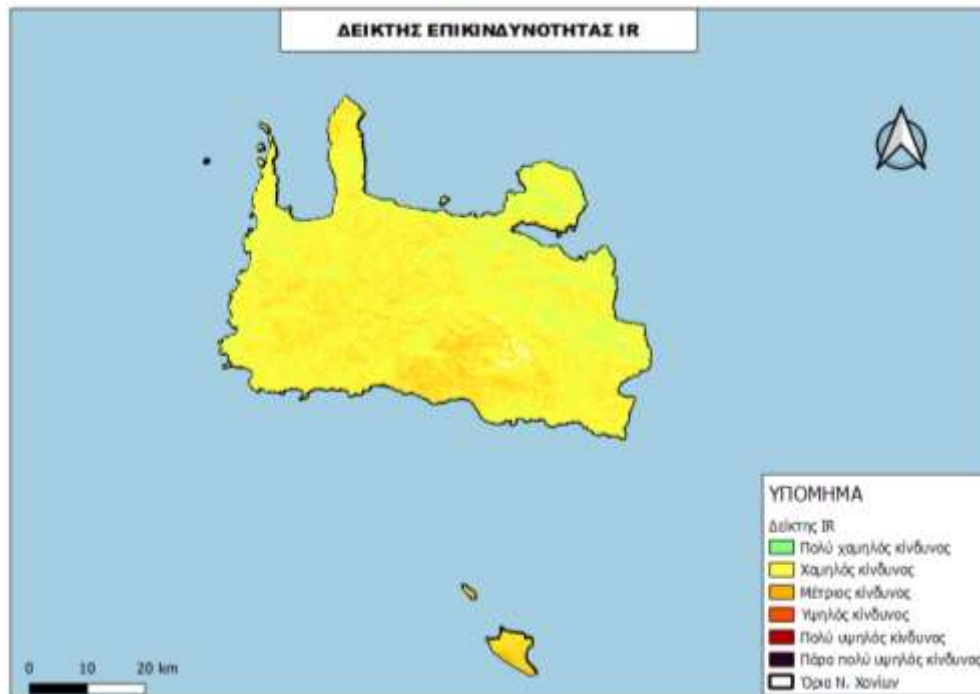
Ο δείκτης IR, υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$IR = 4H + 3V + 2I + E$$

Και σε αυτόν τον δείκτη, θα χρησιμοποιηθεί ο δείκτης FCD για την μεταβλητή της βλάστησης, θα δημιουργηθεί ένας χάρτης εγγύτητας από οικισμούς και δρόμους για την μεταβλητή του ανθρώπινου παράγοντα και τέλος η ηλιακή ακτινοβολία θα αποτυπωθεί μέσω του ταξινομημένου προσανατολισμού. Οι τιμές των μεταβλητών κυμαίνονται από 0 ως 100 και οι τιμές του δείκτη από 0 ως 1400.

Με χρήση του raster calculator και ταξινόμηση των τιμών σε 6 κλάσεις, προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης επικινδυνότητας:

$$4 * ("οικισμοί_prox_0_100@1" + "roads_prox_0_100@1") + 3 * "FCD_0_100@1" + 2 * "aspect_0_100@1" + "DEM_0_100@1"$$



Χάρτης 17 Χάρτης επικινδυνότητας IR

Με βάση τον δείκτη IR, ο νομός έχει με χαμηλή επικινδυνότητα εκδήλωσης πυρκαγιάς. Εδώ ο ανθρώπινος παράγοντας και η βλάστηση έχουν μεγαλύτερη βαρύτητα σε σχέση με το ανάγλυφο.

## Αξιολόγηση του κινδύνου πυρκαγιάς με βάση τις χρήσεις γης

Εκτός από τους δείκτες που προαναφέρθηκαν και υπολογίστηκαν, μπορεί να γίνει μια εκτίμηση της επικινδυνότητας με βάση τις χρήσεις γης. Για να διευκρινιστούν τα χαρακτηριστικά της κάλυψης γης, θα χρησιμοποιηθεί ο χάρτης χρήσεων γης Corine Land Cover 2018.

Με χρήση του εργαλείου SAGA Unique Values, παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο τμήμα της επιφάνειας του Ν. Χανίων καλύπτεται από σκληροφυλλική βλάστηση, φυσικούς βοσκότοπους και ελαιώνες:

Κωδικός Corine	Pixel count	Area (km <sup>2</sup> )	Corine Land Cover
28	58159	574.7525604	Σκληροφυλλική βλάστηση
26	50450	498.5688659	Φυσικοί βοσκότοποι
17	43362	428.5221638	Ελαιώνες
21	16322	161.3011106	Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης
24	14475	143.0482524	Δάσος κωνοφόρων
29	12576	124.2815076	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις
20	9602	94.8911447	Σύνθετες καλλιέργειες
32	9049	89.42615792	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση
31	5085	50.252184	Απογυμνωμένοι βράχοι
16	4749	46.93168571	Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς
23	4687	46.31897471	Δάσος πλατύφυλλων
2	4027	39.79656735	Ασυνεχής αστικός ιστός
18	1501	14.83353553	Λιβάδια
27	1313	12.97563768	Θάμνοι και χερσότοποι
44	1044	10.31726256	Θάλασσες και ωκεανοί
13	818	8.083832156	Μόνιμα αρδευόμενη γη
6	660	6.522407363	Αεροδρόμια
12	565	5.583576	Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη
4	364	3.597206485	Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα
15	356	3.518147002	Αμπελώνες
3	328	3.241438811	Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες
11	306	3.024025232	Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής
33	198	1.956722209	Αποτεφρωμένες εκτάσεις
7	129	1.274834166	Χώροι εξορύξεως ορυκτών
30	103	1.017890846	Παραλίες, αμμόλοφοι, Αμμουδιές
25	99	0.978361104	Μικτό δάσος
41	94	0.928948927	Επιφάνειες στάσιμου ύδατος
1	88	0.869654315	Συνεχής αστικός ιστός
9	87	0.85977188	Χώροι οικοδόμησης
5	42	0.415062287	Ζώνες λιμένων
8	19	0.187766273	Χώροι απορρίψεως απορριμάτων

Πίνακας 30 Χρήσεις γης και αντίστοιχο εμβαδόν



Θα γίνει μια προσπάθεια δημιουργίας χάρτη επικινδυνότητας, αποκλειστικά με βάση τις χρήσεις γης. Κάθε μια από τις 33 κατηγορίες που εμφανίζεται στο Ν. Χανίων θα εκτιμηθεί για την πιθανότητα έναρξης πυρκαγιάς και θα της αποδοθεί το αντίστοιχο βάρος.

Δεδομένου ότι οι περισσότερες δασικές πυρκαγιές οφείλονται στον ανθρώπινο παράγοντα, η βλάστηση που συνορεύει με το οδικό δίκτυο θα θεωρηθεί υψηλού κινδύνου. Οι βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες αλλά και οι εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής, θα θεωρηθούν μέτριας επικινδυνότητας επειδή από το νόμο είναι υποχρεωμένες να έχουν διαθέσιμα μέτρα πυροπροστασίας.

Αν η κατηγορία περιέχει νερό ή αποτελεί τεχνητή επιφάνεια, η επικινδυνότητα θα θεωρηθεί μηδέν.

Το δάσος κωνοφόρων, το δάσος πλατύφυλλων, τα λιβάδια οι μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις και η σκληροφυλλική βλάστηση θα θεωρηθούν υψηλής επικινδυνότητας επιφάνειες, ενώ οι ελαιώνες και οι καλλιέργειες λιγότερο επικίνδυνες, λόγω των αποστάσεων που υπάρχουν ανάμεσα στα φυτά, του ύψους τους αλλά και επειδή ως καλλιεργήσιμη έκταση προστατεύεται από τους γεωργούς της.

Οι φυσικοί βοσκότοποι παρόλο που έχουν αραιή βλάστηση την περίοδο του καλοκαιριού λόγω του φαινομένου της υπερβόσκησης, θα θεωρηθούν επιφάνειες μέτριας επικινδυνότητας λόγω της υψηλής αναφλεξιμότητας καύσιμης ύλης λόγω ξήρανσης. Στην ίδια κατηγορία θα ταξινομηθούν οι θάμνοι και χερσότοποι.

Η ταξινόμηση διαμορφώνεται ως εξής:

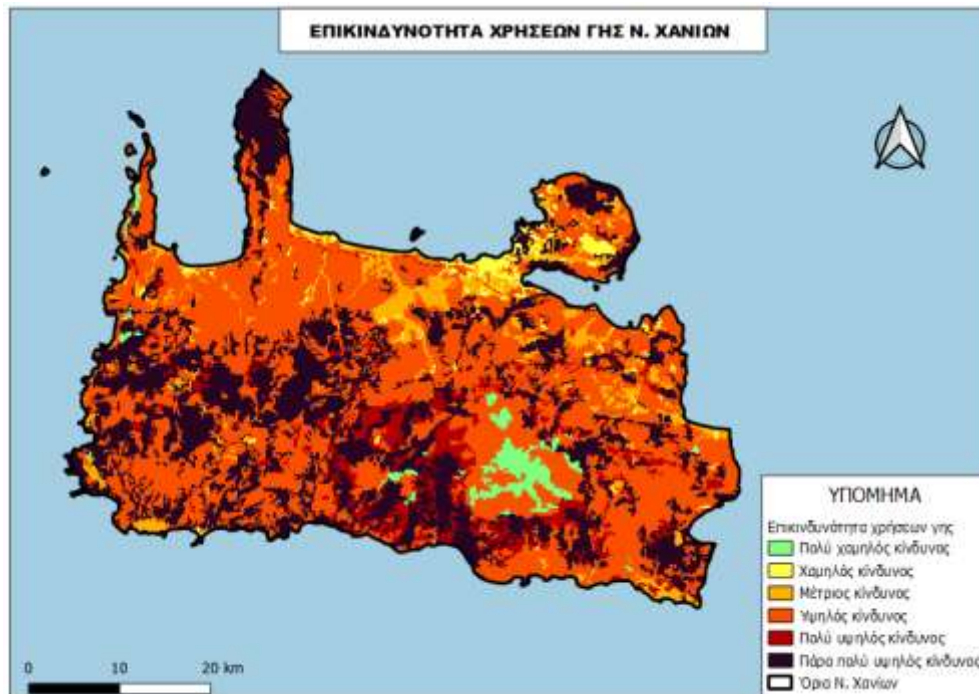
Χρήσεις γης	Κωδικός Corine	Βάρος
Δάσος κωνοφόρων	24	5
Δάσος πλατύφυλλων	23	
Μικτό δάσος	25	
Σκληροφυλλική βλάστηση	28	
Χώροι απορρίψεως απορριμάτων	8	
Οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα	4	4
Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	29	
Μη αρδευόμενη αρόσιμη γη	12	
Λιβάδια	18	
Θάμνοι και χερσότοποι	27	
Γη που χρησιμοποιείται κυρίως για γεωργία μαζί με σημαντικά τμήματα φυσικής βλάστησης	21	
Ελαιώνες	17	
Φυσικοί βοσκότοποι	26	
Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	32	
Αμπελώνες	15	
Μόνιμα αρδευόμενη γη	13	
Σύνθετες καλλιέργειες	20	
Οπωροφόρα δένδρα και φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	16	
Βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες	3	
Χώροι εξορύξεως ορυκτών	7	
Αεροδρόμια	6	2
Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	11	
Ασυνεχής αστικός ιστός	2	
Συνεχής αστικός ιστός	1	
Χώροι οικοδόμησης	9	
Παραλίες, αμμόλοφοι, Αμμουδιές	30	1
Απογυμνωμένοι βράχοι	31	
Ζώνες λιμένων	5	
Αποτεφρωμένες εκτάσεις	33	
Επιφάνειες στάσιμου ύδατος	41	
Θάλασσες και ωκεανοί	44	

Πίνακας 31 Ταξινόμηση χρήσεων γης με βάση την επικινδυνότητα τους

Η υλοποίηση του χάρτη θα γίνει με την βοήθεια του Raster Calculator:

$$\begin{aligned}
 & ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 24 ) * 6 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 23 ) * 6 + \\
 & ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 25 ) * 6 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 28 ) * 6 + ( \\
 & \quad \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 8 ) * 6 + \\
 & ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 4 ) * 5 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 29 ) * 5 + ( \\
 & \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 12 ) * 5 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 18 ) * 5 + ( \\
 & \quad \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 27 ) * 5 + \\
 & ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 21 ) * 4 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 17 ) * 4 + \\
 & ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 26 ) * 4 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 32 ) * 4 + ( \\
 & \quad \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 15 ) * 4 + \\
 & ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 13 ) * 3 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 20 ) * 3 + \\
 & ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 16 ) * 3 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 3 ) * 3 + ( \\
 & \quad \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 7 ) * 3 + \\
 & ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 6 ) * 2 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 11 ) * 2 + ( \\
 & \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 2 ) * 2 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 1 ) * 2 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} \\
 & \quad = 9 ) * 2 + \\
 & ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 30 ) * 1 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 31 ) * 1 + ( \\
 & \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 5 ) * 1 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 33 ) * 1 + ( \\
 & \quad \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 41 ) * 1 + ( \text{"Corine_clipped\_2018@1"} = 44 ) * 1
 \end{aligned}$$

Προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης επικινδυνότητας χρήσεων γης:



Χάρτης 18 Επικινδυνότητα χρήσεων γης Ν. Χανίων

Ο χάρτης επικινδυνότητας με βάση τις χρήσεις γης και τα κριτήρια που αναλύθηκαν, δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στον τύπο της βλάστησης. Σε αυτό τον χάρτη υπάρχουν αρκετές περιοχές πάρα πολύ υψηλού κινδύνου.

## Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των δεικτών με βάση τις πυρκαγιές της εικοσαετίας 2000 - 2019

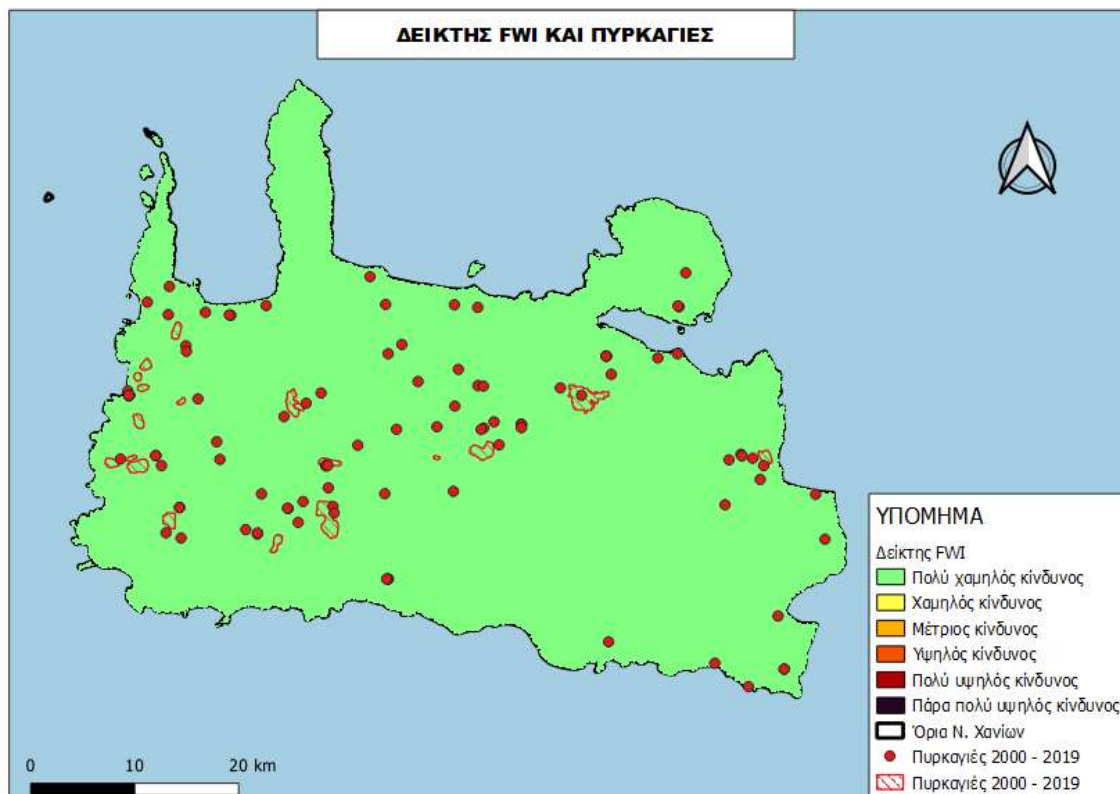
Σε αυτή την ενότητα θα γίνει μια αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων των δεικτών που υπολογίστηκαν με τα σημεία και τα πολύγωνα των πυρκαγιών της περιόδου 2000 ως 2019.

Η εργασία αυτή είχε την προσδοκία ότι τουλάχιστον ένας δείκτης από την βιβλιογραφία θα ταίριαζε με τα σημεία των πυρκαγιών και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν χάρτης πρόβλεψης.

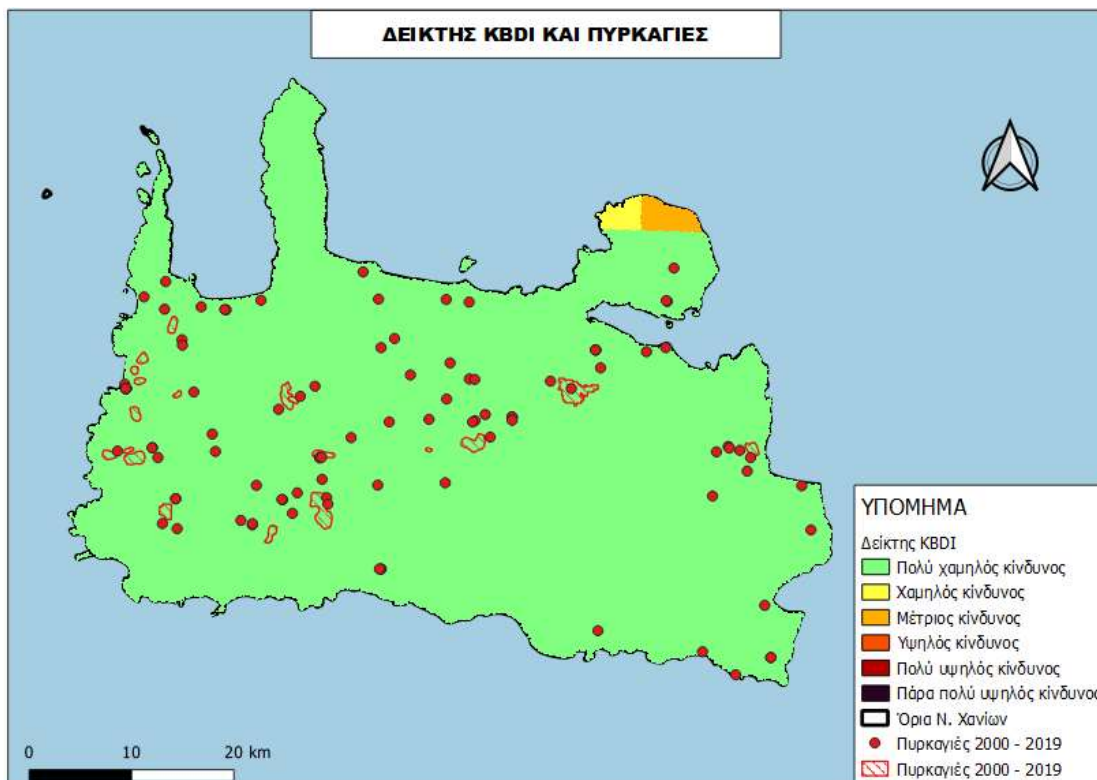
Όπως παρατηρείται από τους χάρτες που ακολουθούν, κανένας δείκτης δεν μπόρεσε να προβλέψει σωστά την επικινδυνότητα των περιοχών που κάηκαν την περίοδο 2000 -2019..

### Χάρτες δεικτών υγρασίας καυσίμου:

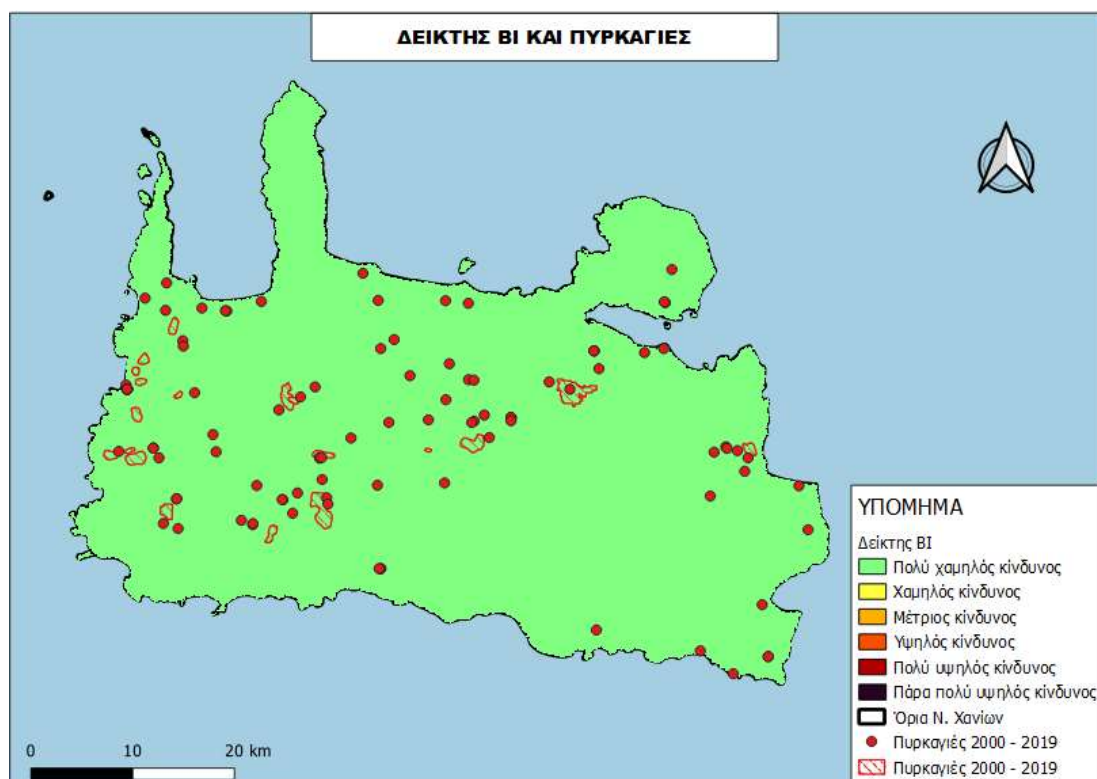
Όλοι οι χάρτες δεικτών υγρασίας καυσίου απεικονίζουν τον Ν. Χανίων ως μια περιοχή πολύ χαμηλού κινδύνου. Με βάση αυτούς τους δείκτες καμία πυρκαγιά δεν θα έπρεπε να συμβεί. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπολογίστηκαν για τον μήνα Αύγουστο που είναι ο πιο θερμός και ξηρός μήνας του έτους. Είναι αναμενόμενο κανένας χάρτης να μην ταιριάζει με τα σημεία των πυρκαγιών.



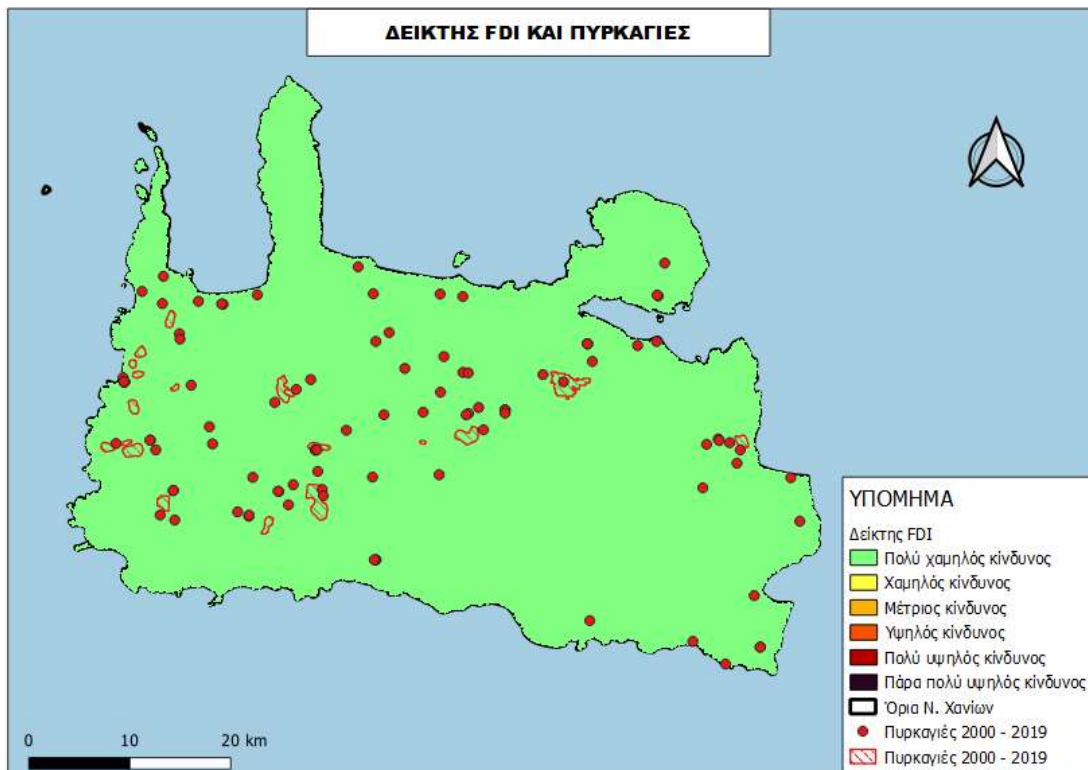
Χάρτης 19 Χάρτης επικινδυνότητας FWI και πυρκαγιές



Χάρτης 20 Χάρτης επικινδυνότητας ΚΒΔΙ και πυρκαγιές



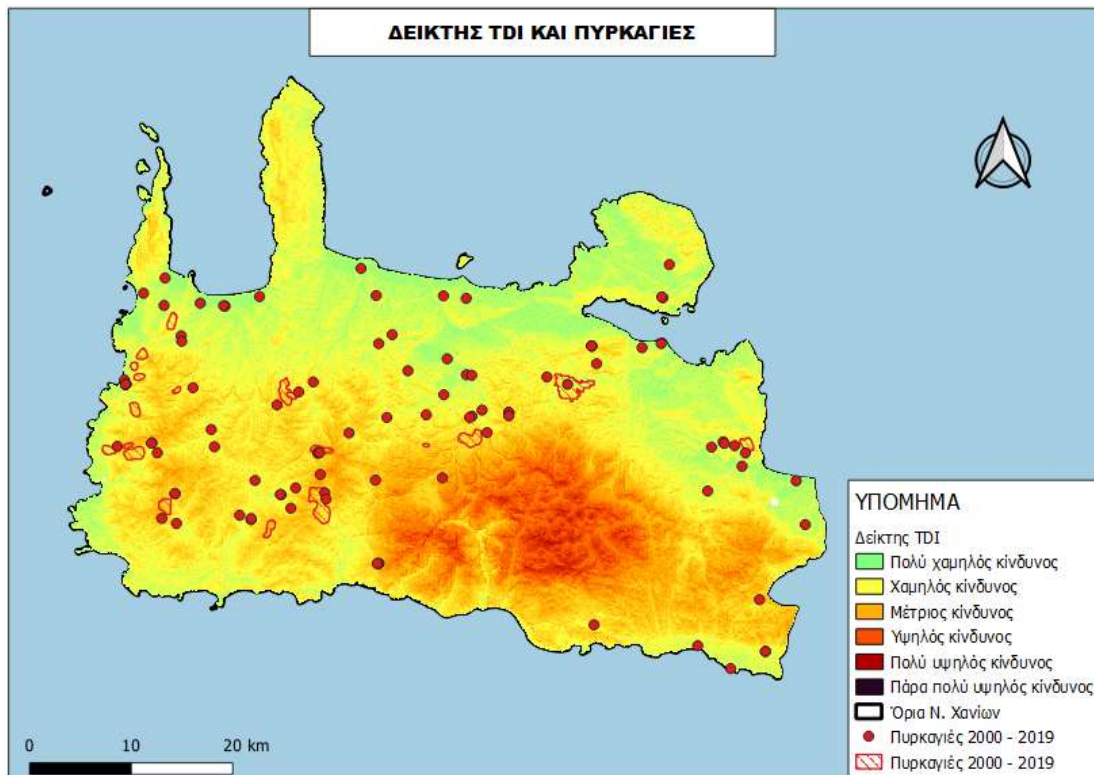
Χάρτης 21 Χάρτης επικινδυνότητας ΒΙ και πυρκαγιές



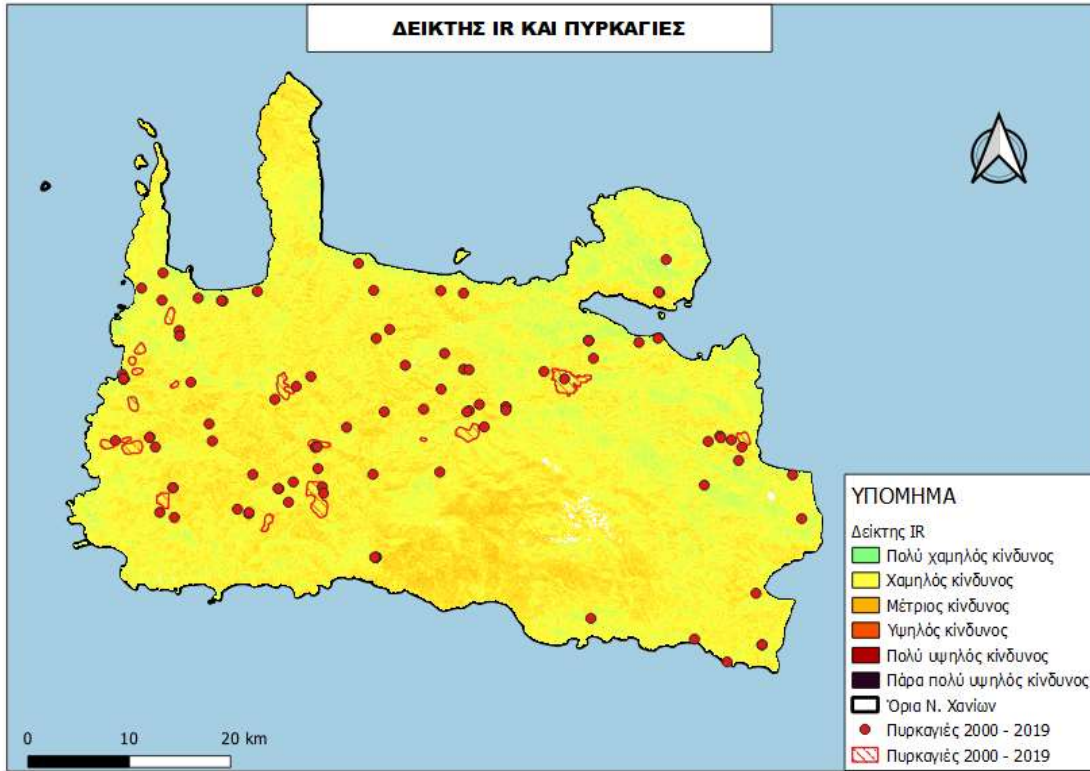
Χάρτης 22 Χάρτης επικινδυνότητας FDI και πυρκαγιές

### Τοπογραφικοί Χάρτες:

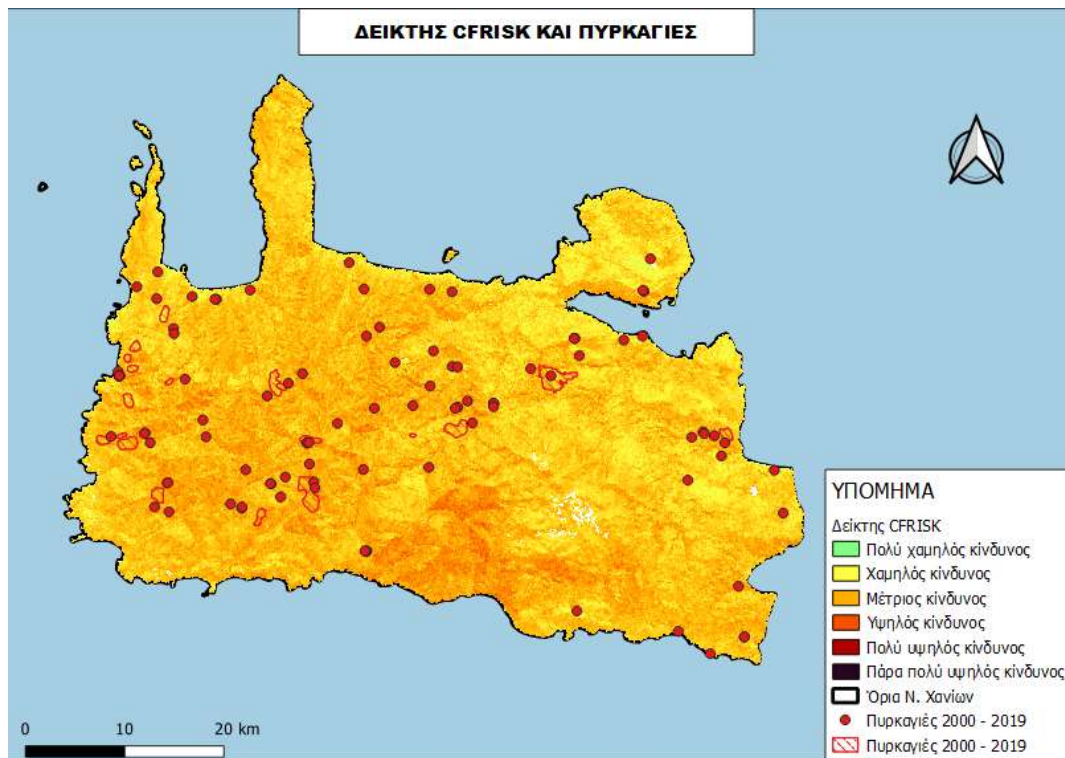
Οι τοπογραφικοί χάρτες απεικονίζουν την επίδραση του αναγλύφου και του ανθρώπινου παράγοντα χωρίς να λαμβάνουν υπόψιν τα μετεωρολογικά δεδομένα. Τα αποτελέσματά τους δεν εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και έχουν ισχύ όλο το έτος θα μπορούσαν να εξηγήσουν τουλάχιστον τις χειμερινές πυρκαγιές αλλά δυστυχώς κανένας χάρτης δεν μπόρεσε να τις προβλέψει.



Χάρτης 23 Χάρτης επικινδυνότητας TDI και πυρκαγιές

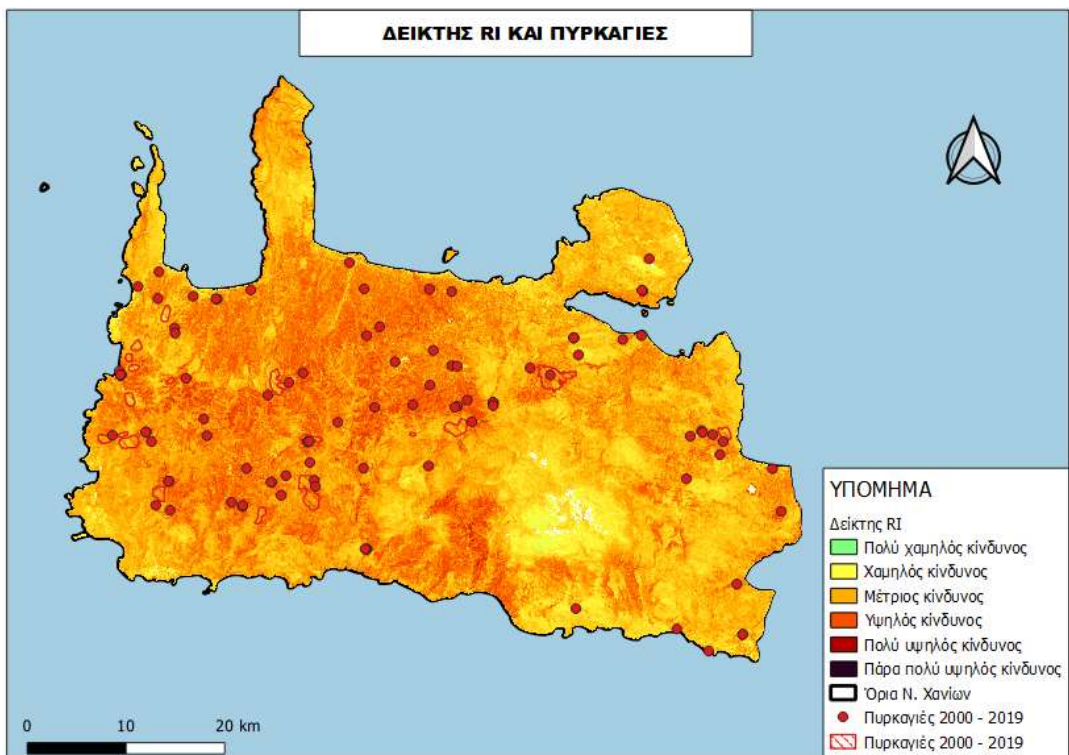


Χάρτης 24 Χάρτης επικινδυνότητας IR και πυρκαγιές

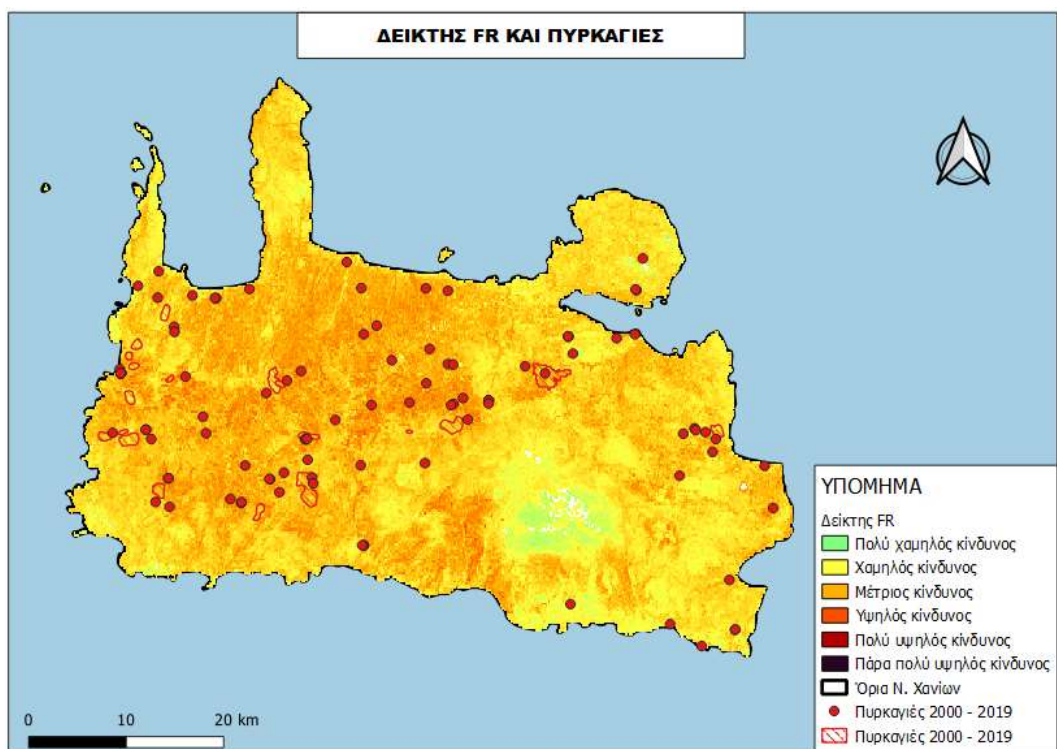


Χάρτης 25 Χάρτης επικινδυνότητας CFRISK και πυρκαγιές

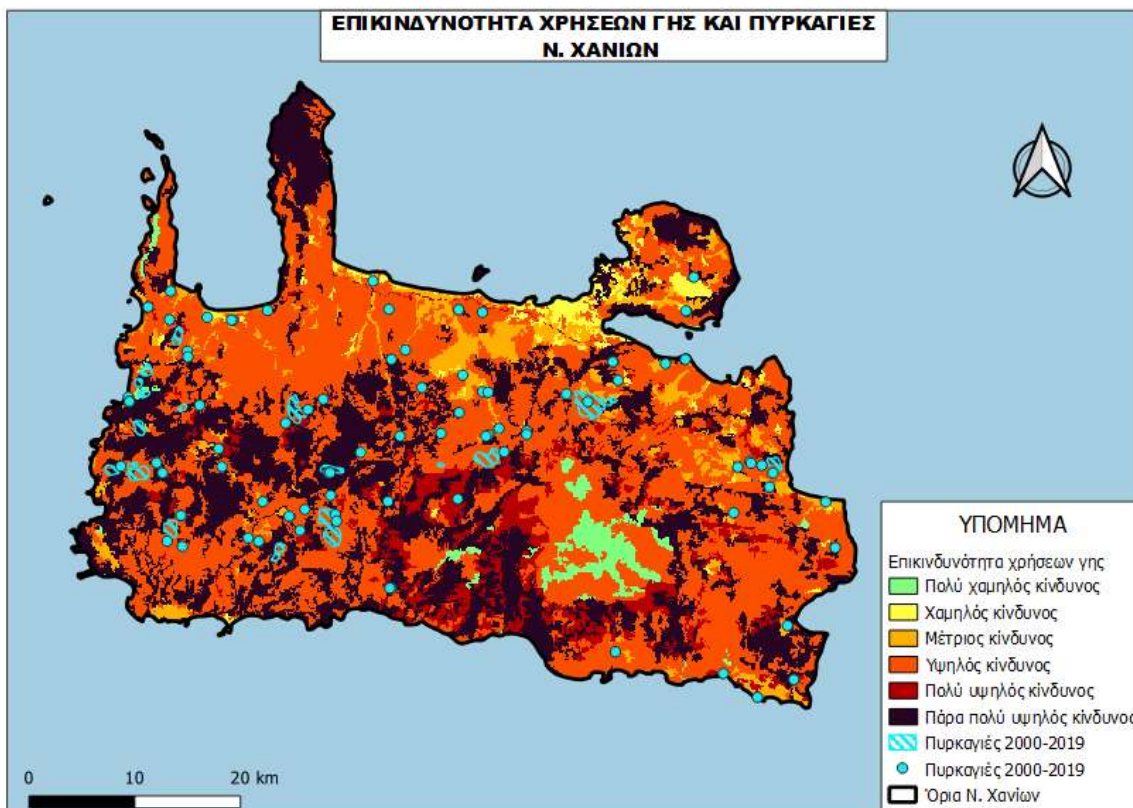




Χάρτης 26 Χάρτης επικινδυνότητας RI και πυρκαγιές



Χάρτης 27 Χάρτης επικινδυνότητας FR και πυρκαγιές

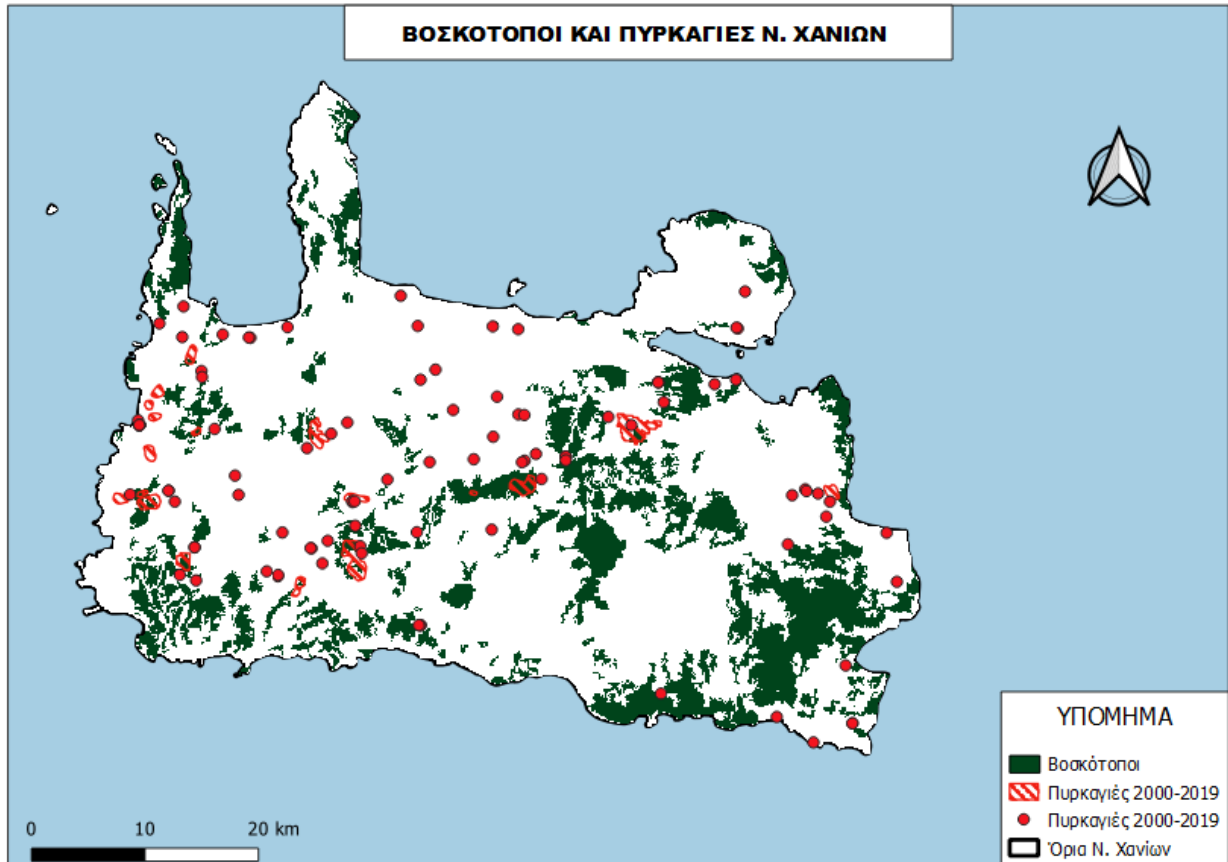


Χάρτης 28 Επικινδυνότητα χρήσεων γης και πυρκαγιές

## Προτεινόμενος χάρτης επικινδυνότητας για το Ν. Χανίων

Μετά την αποτυχία των δεικτών της βιβλιογραφίας να αποτυπώσουν την επικινδυνότητα των περιοχών, έγινε μια προσπάθεια δημιουργίας ενός χάρτη ξεκινώντας από τα χαρακτηριστικά των περιοχών που έχει ξεσπάσει πυρκαγιά.

Αρχικά, με βάση το υπόβαθρο του Corine Land Cover, παρατηρήθηκε ότι οι πυρκαγιές ήταν στην πλειοψηφία τους κοντά σε βοσκότοπους και σε δρόμους.



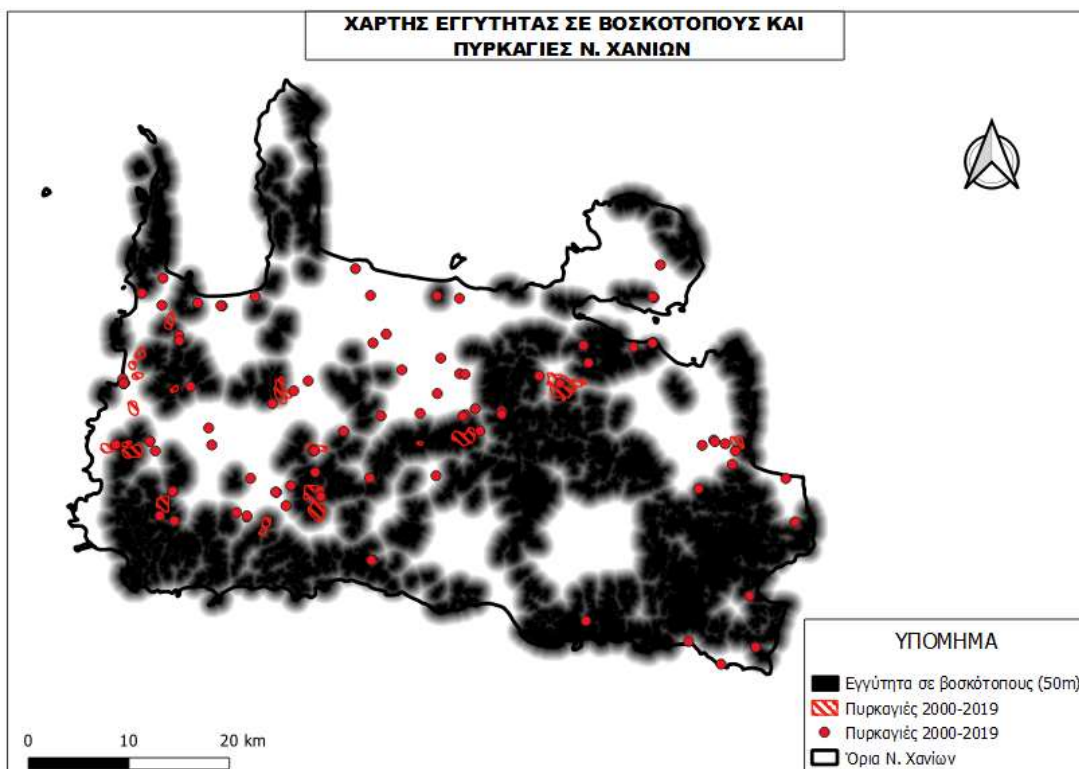
Χάρτης 29 Βοσκότοποι Ν. Χανίων

Εστιάζοντας πιο κοντά στον παραπάνω χάρτη, είναι εμφανές ότι αρκετές περιοχές έχουν καεί πολλές φορές. Για παράδειγμα, με βάση τα στοιχεία της πυροσβεστικής, στο Σφηνάρι έχουν καταγραφεί 16 πυρκαγιές την εικοσαετία 2000 – 2019. Το Σφηνάρι έχει 150 μόνιμους κατοίκους με βάση το του αρχείο της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής για την απογραφή πληθυσμού της Ελλάδας του 2011.

Η βελτίωση των βοσκοτόπων με τη χρήση φωτιάς είναι γνωστή στους κτηνοτρόφους, αλλά και στους ειδικούς. Έτσι τους μήνες Σεπτέμβριο και Οκτώβριο γίνεται χρήση της φωτιάς προκειμένου να καταστρέψουν τα φρύγανα και τους χαμηλούς θάμνους που εμποδίζουν τη βόσκηση, αλλά και για το λόγο ότι σε σύντομο χρονικό διάστημα με τις φθινοπωρινές βροχές παράγεται νέο γρασίδι που φυτρώνει στις καψάλες και αποτελεί άριστη τροφή για τα ζώα τους.

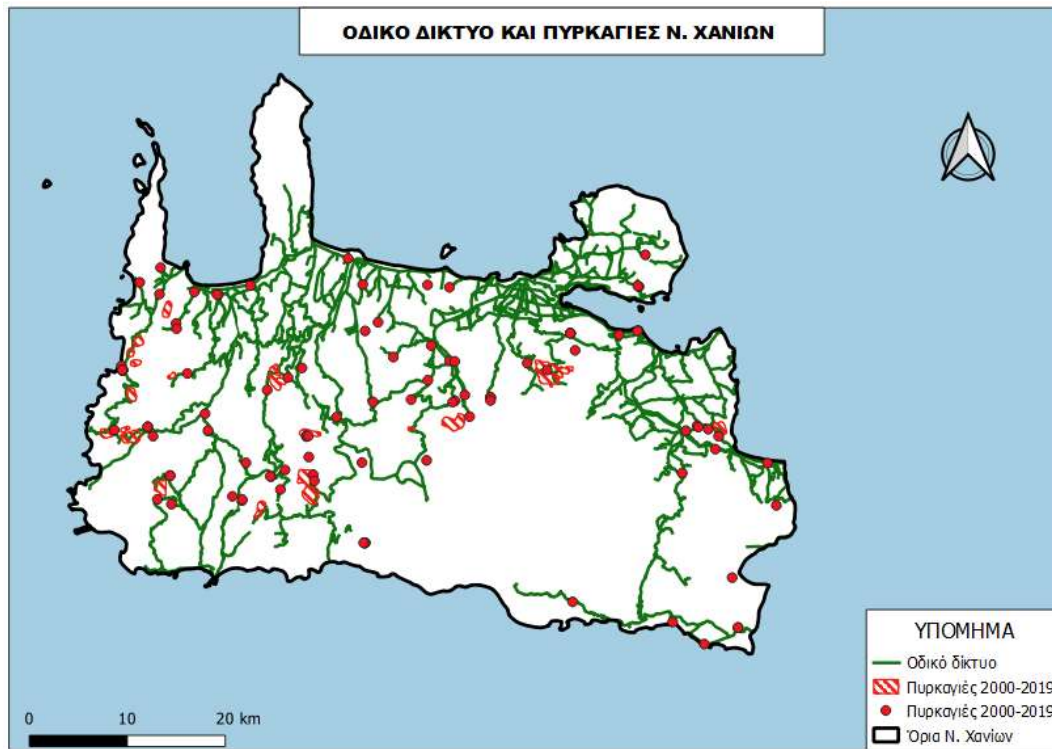


Χάρτης 30 Βοσκότοποι και καμένες εκτάσεις ΝΔ του Ν. Χανίων

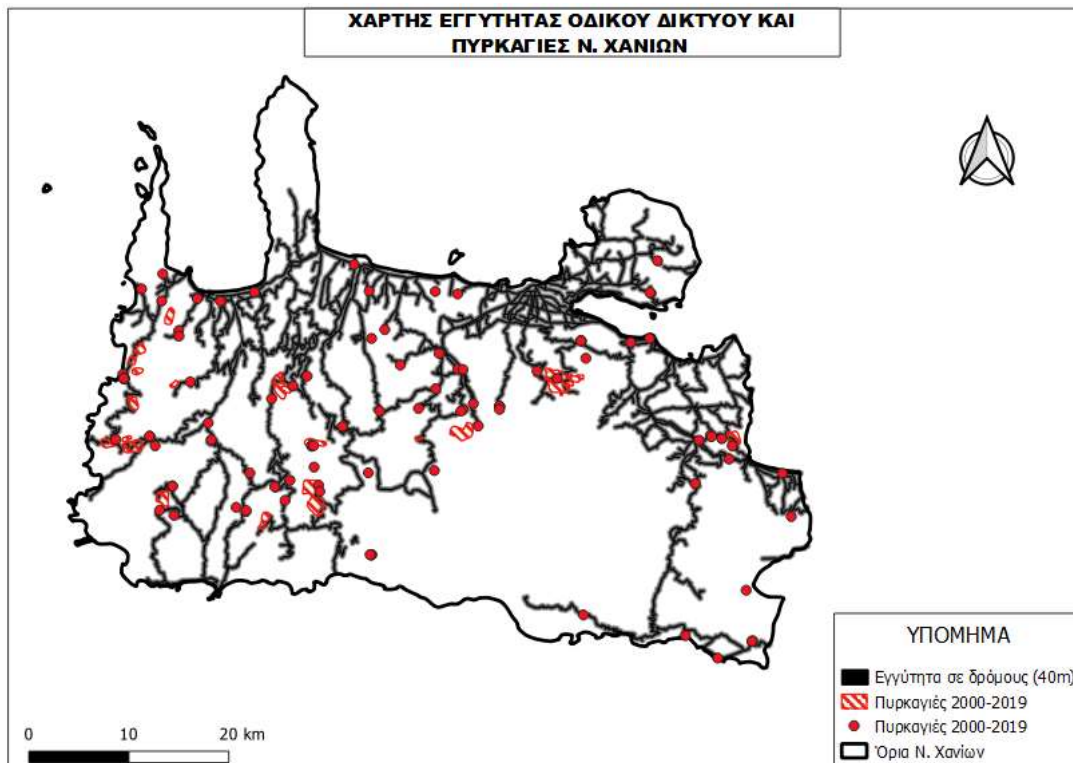


Χάρτης 31 Χάρτης εγγύτητας σε βοσκότοπους και πυρκαγιές

Επίσης άμεση είναι η σχέση του οδικού δικτύου με τα σημεία πυρκαγιάς:



Χάρτης 32 Οδικό δίκτυο Ν. Χανίων και πυρκαγιές



Χάρτης 33 Χάρτης εγγύτητας σε δρόμους και πυρκαγιές

Η απόσταση από το οδικό δίκτυο και η απόσταση από τους βοσκότοπους είναι τα 2 πιο βασικά χαρακτηριστικά των πυρκαγιών που παρατηρήθηκαν.

Χρησιμοποιώντας χάρτες εγγύτητας από το οδικό δίκτυο και από τους βοσκότοπους, μετά από αρκετές δοκιμές, προέκυψε η εξής ταξινόμηση:

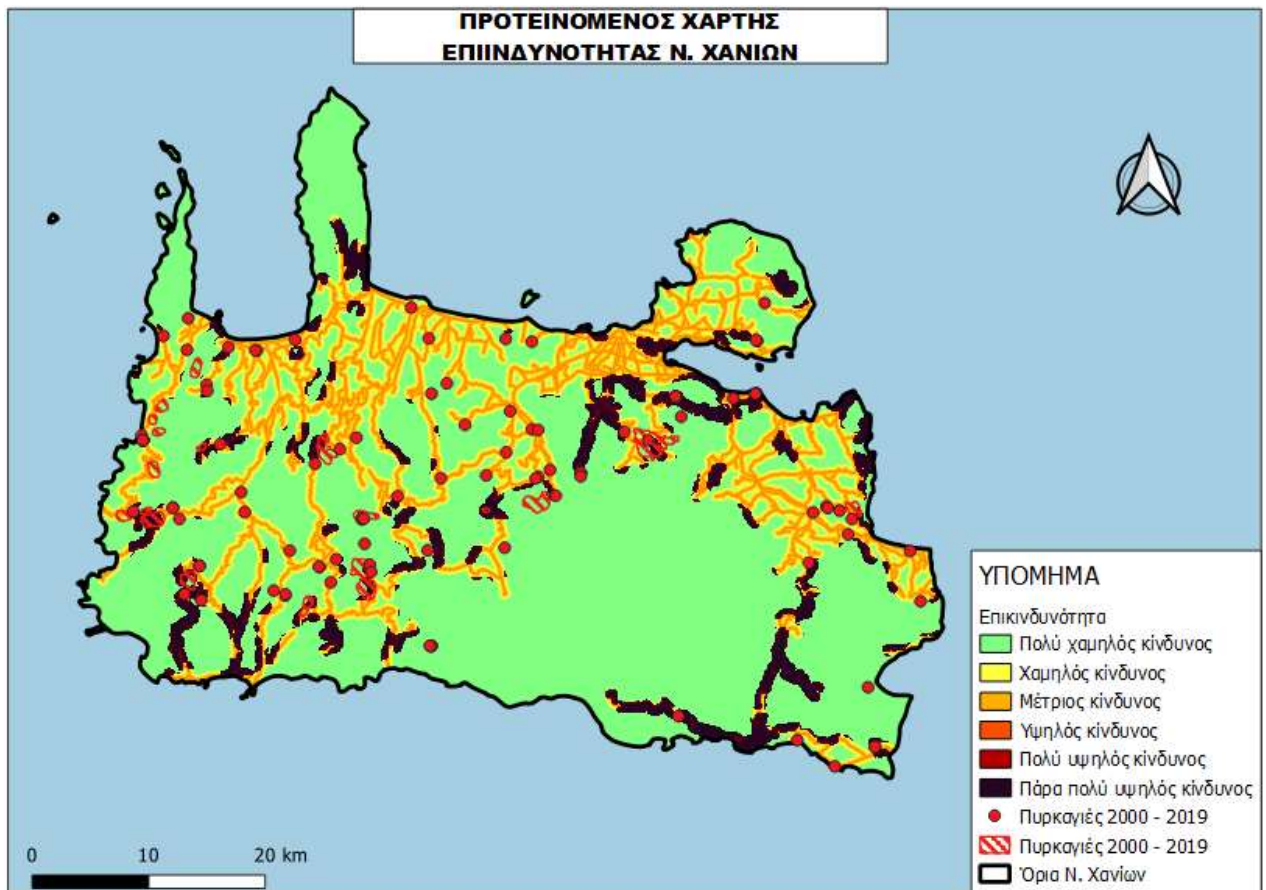
Απόσταση από βοσκότοπους (m)	Απόσταση από δρόμους (m)	Βάρος
<10	>200	0
<10	100 <= roads <= 200	25 – απόσταση από βοσκότοπους
<10	<100	100 – απόσταση από βοσκότοπους
=>10	<=100	50 - απόσταση από δρόμους
=>10	>100	0

Πίνακας 32 Συνδυασμός αποστάσεων από δρόμους και βοσκότοπους

Με χρήση του raster calculator:

```
(("Chania_voskotopoi_prox@1" <10)AND ("Main_roads_proximity@1">=200))*0+
(("Chania_voskotopoi_prox@1" <10)AND (200>"Main_roads_proximity@1">=100))*(25 -
("Chania_voskotopoi_prox@1"))+
(("Chania_voskotopoi_prox@1" <10)AND ("Main_roads_proximity@1"<100))*(100 -
"Chania_voskotopoi_prox@1")+
(("Chania_voskotopoi_prox@1" >=10)AND ("Main_roads_proximity@1"<100))*(50 -
"Main_roads_proximity@1")+
(("Chania_voskotopoi_prox@1" >=10)AND ("Main_roads_proximity@1">100))*0
```

Και μετά την ταξινόμηση των τιμών του μοντέλου σε 6 κλάσεις, προκύπτει ο ακόλουθος χάρτης:



Χάρτης 34 Προτεινόμενος χάρτης επικινδυνότητας Ν. Χανίων

## Συμπεράσματα

Οι καταστρεπτικές συνέπειες των πυρκαγιών των περασμένων ετών σε συνδυασμό με το ότι δεν βαίνουν μειούμενες στο χρόνο, αποτέλεσαν την αφορμή για αυτή την εργασία η οποία είχε σκοπό την δημιουργία ενός χάρτη επικινδυνότητας εμφάνισης πυρκαγιών για την περιοχή μελέτης.

Μέσω της ανάλυσης των υφιστάμενων δεικτών επικινδυνότητας πυρκαγιάς έγινε σαφές ότι οι δείκτες έχουν κατασκευαστεί για να προβλέψουν κυρίως πυρκαγιές λόγω ξηρασίας της καύσιμης ύλης. Υπάρχουν δύο κατηγορίες δεικτών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία χάρτη επικινδυνότητας πυρκαγιάς, οι δείκτες υγρασίας καυσίμου και οι τοπογραφικοί δείκτες.

Οι δείκτες υγρασίας καυσίμου έχουν σκοπό να προβλέψουν τις περιοχές που είναι επικίνδυνες λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις συνθήκες ξηρασίας της καύσιμης ύλης λόγω κλίματος. Αυτή η κατηγορία δεικτών θα έπρεπε να μπορεί να εξηγήσει τουλάχιστον τις πυρκαγιές που συνέβησαν κατά τους θερινούς μήνες, δεδομένου ότι τους υπόλοιπους μήνες δεν υπάρχουν συνθήκες ξήρανσης της βλάστησης.

Οι τοπογραφικοί δείκτες, βασίζονται κυρίως σε τοπογραφικά δεδομένα (κλίση, προσανατολισμός, υψόμετρο) και είναι πιο κατάλληλοι για να ερμηνεύσουν τις πυρκαγιές που συμβαίνουν καθόλη τη διάρκεια του έτους. Ωστόσο δεν αγνοούν τις απαραίτητες συνθήκες ξηρασίας για την εμφάνιση φωτιάς. Μέσω της στάθμισης των μεταβλητών που χρησιμοποιούν αξιολογούν κάποιες περιοχές ως πιο ξηρές, άρα και πιο πιθανές για εμφάνιση πυρκαγιάς. Για παράδειγμα, έμμεσα μέσω του προσανατολισμού, γίνεται μια ταξινόμηση των φυτών που δέχονται περισσότερη ακτινοβολία και είναι περισσότερο εκτεθειμένα σε συνθήκες έντονου αέρα, άρα έχουν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία σε σχέση με τα φυτά που βρίσκονται στην άλλη πλευρά της πλαγιάς. Επιπλέον, κάποιοι τοπογραφικοί δείκτες λαμβάνουν υπόψιν και τον ανθρώπινο παράγοντα, μέσω χαρτών εγγύτητας.

Με βάση τη στατιστική ανάλυση των στοιχείων της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας για την περίοδο 2000-2019 για τις δασικές πυρκαγιές του Νομού Χανίων, παρατηρήθηκε ότι εκδηλώνονται κατά μέσο όρο 200 πυρκαγιές το χρόνο οι οποίες εκδηλώνονται σχεδόν ομοιόμορφα σε όλους του μήνες του έτους. Πιο συγκεκριμένα, στο διάστημα της αντιπυρικής περιόδου, από τον Ιούνιο έως τον Οκτώβριο, το ποσοστό των πυρκαγιών φτάνει το 55%.

Κατά την επίθεση των ιστορικών δεδομένων των καμένων εκτάσεων επί των χαρτών επικινδυνότητας που δημιουργήθηκαν, παρατηρείται ότι οι καμένες εκτάσεις εμπίπτουν σε ζώνες χαμηλού κινδύνου πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα, οι δείκτες υγρασίας καυσίμου, υπολογίστηκαν για τις πιο ζεστές μέρες του Αυγούστου και οι χάρτες που προέκυψαν, αποτυπώνουν όλο το Νομό ως μια περιοχή χαμηλού κινδύνου πυρκαγιάς. Δηλαδή, δεν θα έπρεπε να έχουμε καμία πυρκαγιά. Ομοίως, οι τοπογραφικοί δείκτες επίσης απέτυχαν να προβλέψουν τις επικίνδυνες περιοχές. Κατά συνέπεια, η αιτία των πυρκαγιών μάλλον πρέπει να αναζητηθεί στον ανθρώπινο παράγοντα.

Από την ανάλυση των ιστορικών στοιχείων για τις θέσεις των πυρκαγιών της εικοσαετίας 2000 - 2019 για το Νομό Χανίων, σε συνδυασμό με τις χρήσεις γης του Corine Land Cover 2018 και του



οδικού δικτύου παρατηρήθηκε ότι η πλειονότητα των πυρκαγιών παρουσιάστηκαν σε βοσκοτόπους ή κοντά σε δρόμο. Παρατηρήθηκε επίσης ότι βοσκοτόποι σε μεγάλη απόσταση από το κεντρικό οδικό δίκτυο δεν έχουν ιστορικό πυρκαγιάς. Με βάση αυτή την ανάλυση δημιουργήθηκε ένα νέος δείκτης επικινδυνότητας που επαληθεύεται από τα σημεία εμφάνισης καμένων εκτάσεων και μπορεί να αξιοποιηθεί για την πρόβλεψη και την έγκαιρη αντιμετώπιση μελλοντικών πυρκαγιών στο Νομό Χανίων.

## Προοπτικές

Λαμβάνοντας υπόψη όσα έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες παραγράφους και με δεδομένα τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, αναφέρονται παρακάτω ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα :

- Επέκταση της μελέτης σε όλο τον Ελλαδικό χώρο για περαιτέρω αξιολόγηση των υφιστάμενων δεικτών και εντοπισμό μοτίβων ανθρώπινου παράγοντα.
- Αυτοματοποίηση της διαδικασίας δημιουργίας των χαρτών επικινδυνότητας, για να είναι εφικτή η συχνή ανανέωση τους.
- Δημιουργία ιστοσελίδας παρουσίασης των χαρτών - ενημέρωση των φορέων που είναι υπεύθυνοι για την πρόληψη και την καταστολή των πυρκαγιών.
- Δημιουργία μιας ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων για τις δασικές πυρκαγιές με στοιχεία χωρικών δεδομένων.

## Αναφορές

- Aatmesh. (2016, 12 19). *Forest fires of Indonesia*. (THE INTEGRAL SCHOOL HYDERABAD)  
Ανάκτηση 8 15, 2019, από <https://theintegralschoolblog.org>:  
<https://theintegralschoolblog.org/2016/12/19/forest-fires-of-indonesia/>
- Aguado, I., Chuvieco, E., Martín, P., & Salas, J. (2003, 11 26). Assessment of forest fire danger conditions in southern Spain from NOAA images and meteorological indices. *International Journal of Remote Sensing*, σσ. 1653-1668.  
doi:10.1080/01431160210144688
- Alexander, M. (1990, 01 01). Computer calculation of the Keetch-Byram drought index – Programmers Beware! *Fire Management Notes*, 51(4), σσ. 23-24.
- Antognelli, S. (2018, 05 29). *NDVI AND NDMI VEGETATION INDICES: INSTRUCTIONS FOR USE*.  
Ανάκτηση 05 23, 2020, από <https://www.agricolus.com/>:  
<https://www.agricolus.com/en/indici-vegetazione-ndvi-ndmi-istruzioni-luso/>
- Antognelli, S. (2018, 05 01). *NDVI and NDMI Vegetation Indices: Instuctions for use*. Ανάκτηση 05 15, 2019, από <https://www.agricolus.com/en/>: <https://www.agricolus.com/en/indici-vegetazione-ndvi-ndmi-istruzioni-luso/>
- Ashaari, F., Kamal, M., & Dirgahayu, D. (2018, 06 22). COMPARISON OF MODEL ACCURACY IN TREE CANOPY DENSITY ESTIMATION USING SINGLE BAND, VEGETATION INDICES AND FOREST CANOPY DENSITY (FCD) BASED ON LANDSAT-8 IMAGERY (CASE STUDY: PEAT SWAMP FOREST IN RIAU PROVINCE). *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 15(1), σσ. 81-92. doi:<http://dx.doi.org/10.30536/j.ijreses.2018.v15.a2845>
- Auburn University at Montgomery. (2004, 12). *Weather elements that affect fire behaviour*.  
Ανάκτηση 02 15, 2020, από <https://www.auburn.edu/>:  
[https://www.auburn.edu/academic/forestry\\_wildlife/fire/weather\\_elements.htm](https://www.auburn.edu/academic/forestry_wildlife/fire/weather_elements.htm)
- Brzezinska, D., Bryant, P., & Markowski, A. (2019, 09 30). Fire Risk Index Assesment as an Evaluation Method for Fire Strategies in the Process industry. *Chemical Engineering Transactions*, 77, σσ. 79-84. doi:<https://doi.org/10.3303/CET1977014>
- Burgan, R. (1988, 11 1). *1988 Revisions to the 1978 National Fire-Danger Rating System*. Southeastern Forest Experiment Station. Asheville: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. doi:10.2737/SE-RP-273
- Byun, H.-R., & Wilhite, D. (1999, 09 01). Objective Quantification of Drought Severity and Duration. *Journal of Climate*, σσ. 2747–2756. doi:[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2)
- Castro, R., & Chuvieco, E. (2008, 09 17). Modeling forest fire danger from geographic information systems. *Geocarto International*, 13(1), σσ. 15-23.
- Chuvieco, E. (1997). *A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires*. Alcalá de Henares, Spain: Universidad de Alcalá.

- Chuvieco, E. (2003). *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping*. Spain: University of Alcalá.  
doi:<https://doi.org/10.1142/5364>
- Combe, Y. (2015, 01 01). *Introduction to Wildland Fire Behavior*. Ανάκτηση 09 07, 2019, από <https://slideplayer.com/>: <https://slideplayer.com/slide/3833061/>
- Congalton, R. (1991, 10 15). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. (U. ο. California, Επμ.) *Remote Sensing of Environment*, 37(1), σσ. 35-46.  
doi:10.1016/0034-4257(91)90048-B
- Costantino, S., Arca, B., Salis, M., & Duce, P. (2018, 09 01). Assessing the performance of fire danger indexes in a Mediterranean area. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 5, σσ. 563-571. doi:10.3832/ifor2679-011
- Country Fire Authority. (χ.χ.). *How Fire Behaves*. (V. S. Government, Επιμελητής, & Country Fire Authority) Ανάκτηση 8 15, 2019, από <https://www.cfa.vic.gov.au>:  
<https://www.cfa.vic.gov.au/plan-prepare/how-fire-behaves>
- Developer, eCognition. (2013). *Manual for Satellite Data Analysis*. eCognition.
- Dimitrakopoulos, A., & Bemmerzouk, A. (2002, 11 20). Predicting live herbaceous moisture content from a seasonal drought index. *International Journal of Biometeorology*, 47(2), σσ. 73-79. doi:10.1007/s00484-002-0151-1
- Dolling, K., Chu, P. S., & Fujioka, F. (2005, 11 10). A climatological study of the Keetch/Byram drought index and fire activity in the Hawaiian Islands. *Agricultural and Forest Meteorology*, 133(1-4), σσ. 17-27. doi:10.1016/j.agrformet.2005.07.016
- Dowdy, A., Mills, G., Finkele, K., & de Groot, W. (2009). *Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index*. Melbourne, Australia: Centre for Australian Weather and Climate Research. Ανάκτηση από [https://www.cawcr.gov.au/technical-reports/CTR\\_010.pdf](https://www.cawcr.gov.au/technical-reports/CTR_010.pdf)
- Environmental Systems Research Institute. (2020, 01 07). *Indices gallery*. Ανάκτηση 05 23, 2020, από <https://pro.arcgis.com/>: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/help/data/imagery/indices-gallery.htm>
- European Space Agency. (2014, 01 13). *Representación de las imágenes de satélite*. Ανάκτηση 01 05, 2020, από <https://www.esa.int>:  
[https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Disasters\\_ES/SEMFZR66AQH\\_0.html#subhead5](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Disasters_ES/SEMFZR66AQH_0.html#subhead5)
- Feidas, Nouloupoulou, & Makrogiannis. (2006, 06 14). Trend analysis of precipitation time series in Greece and their relationship with circulation using surface and satellite data. *Theoretical and Applied Climatology*, 87, σσ. 155–177.  
doi:<https://doi.org/10.1007/s00704-006-0200-5>
- Fire Wiki. (2020, 04 22). *Baumgartner index*. Ανάκτηση 09 15, 2020, από Fire Weather Indices WIKI: <https://wikifire.wsl.ch/tiki-indexcd24.html?page=Baumgartner+index>

- Fire Wiki. (2020, 04 01). *Portuguese index*. Ανάκτηση 09 15, 2020, από Fire Weather Indices WIKI: <https://wikifire.wsl.ch/tiki-index656a.html?page=Portuguese+index&structure=Fire>
- Fosberg, M. (1978). Weather in wildland fire management: the fire weather. *Proceedings of the conference on Sierra Nevada meteorology* (σσ. 1-4). South Lake Tahoe: American Meteorological Society.
- Goodrick, S. (2002, 01 10). Modification of the Fosberg fire weather index to include drought. *International Journal of Wildland Fire*, 11(4), σσ. 205-210. doi:10.1071/WF02005
- Gouma, V., & Chronopoulou Sereli, A. (1998, 03 01). Wildland Fire Danger Zoning – a Methodology. *International Journal of Wildland Fire*, 8(1), σσ. 37-43. doi:10.1071/WF9980037
- Govindjee, J. W. (1995, 09 01). Concepts in Photobiology: Photosynthesis and Photomorphogenesis. *Encyclopedia of Applied Physics*, 13, σσ. 513-532. Ανάκτηση από <http://www.life.illinois.edu/govindjee/paper/gov.html>
- Griffith, J. (2004, 11 01). *Understanding the Role of Fire in Forest Management*. Ανάκτηση 01 15, 2020, από <https://slideplayer.com/>: <https://slideplayer.com/slide/9479778/>
- Groisman, P., Knight, R., Easterling, D., Levinson, D., Heim, R., Karl, T., . . . Stroumentova, N. (2004). Changes in precipitation distribution spectra and contemporary warming of the extratropics: implications for intense rainfall, droughts, and potential forest fire danger. *iGWO/GEWEX/UNESCO Workshop in Global Trends in Water Cycle Variables and their relevance for IPCC Science assessment*, (σσ. 1-12). Paris, France. Ανάκτηση από [https://www.researchgate.net/publication/255712446\\_Changes\\_in\\_precipitation\\_distribution\\_spectra\\_and\\_contemporary\\_warming\\_of\\_the\\_extra\\_tropics\\_Implications\\_for\\_intense\\_rainfall\\_droughts\\_and\\_potential\\_forest\\_fire\\_danger](https://www.researchgate.net/publication/255712446_Changes_in_precipitation_distribution_spectra_and_contemporary_warming_of_the_extra_tropics_Implications_for_intense_rainfall_droughts_and_potential_forest_fire_danger)
- Heim, R. R. (2002, 02 12). A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, σσ. 1149-1166. doi:10.1175/1520-0477-83.8.1149
- Jaiswal, R., Mukherjee, S., Raju, D., & Saxena, R. (2002, 08). Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(1), σσ. 1-10. doi:10.1016/S0303-2434(02)00006-5
- Jamalabad, S., & Abkar, A. (2004). Forest Canopy Density Monitoring, Using Satellite Images. *XXth ISPRS Congress Technical Commission VII*, 7, σσ. 244-249. Istanbul: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Ανάκτηση από <https://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm7/papers/48.pdf>
- Janis, M., Johnson, M., & Forthun, G. (2002, 11 15). Near-real time mapping of Keetch-Byram drought index in the south-eastern United States. *International Journal of Wildland Fire*, 11(4), σσ. 281-289. doi:10.1071/WF02013

- Kairis, T. (2011, 11 13). *Αίτια πρόκλησης δασικών πυρκαγιών*. Ανάκτηση 01 15, 2020, από <https://slideplayer.gr/>: <https://slideplayer.gr/slide/2866678/>
- Keetch, J., & Byram, G. (1968, 11). A Drought Index for Forest Fire Control. *U.S.D.A. Forest Service Research Paper S E - 38*, σσ. 1-35. Ανάκτηση από [https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/rp/rp\\_se038.pdf](https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/rp/rp_se038.pdf)
- Krishnendu Banerjee, S. P. (2014, 09). Forest Canopy Density Mapping Using Advance Geospatial Technique. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, σσ. 358-363. Ανάκτηση από [http://www.ijiset.com/v1s7/IJSET\\_V1\\_I7\\_53.pdf](http://www.ijiset.com/v1s7/IJSET_V1_I7_53.pdf)
- ktimatologio.gr. (2019, 05 19). *Γεωχωρικές υπηρεσίες*. Ανάκτηση 07 25, 2020, από [ktimatologio.gr](https://www.ktimatologio.gr/): <https://www.ktimatologio.gr/posts/copernicus-land-monitoring-services-nrcs-land-cover-2017-2021>
- Makario, S. (2019, 1 6). *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Remote Sensing*. Ανάκτηση 1 2, 2020, από [https://blog.heptanalytics.com](https://blog.heptanalytics.com/): <https://blog.heptanalytics.com/normalized-difference-vegetation-indexndvi-in-remote-sensing/>
- McFeeters, S. (1996, 05 25). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), σσ. 1425-1432. doi:<https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Michele A. Kuester, J. M. (2005, 08). Remote sensing and modeling of wildfires. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 8. Seoul, South Korea: IEEE. doi:10.1109/IGARSS.2005.1526079
- NASA. (2019, 02 14). *Spaceborne Remote Sensing*. Ανάκτηση 12 02, 2019, από <https://www.nasa.gov/>: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/spectrum/spaceborne\\_remote\\_sensing/](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/spectrum/spaceborne_remote_sensing/)
- Palmer, W. (1965, 01 01). *Meteorological Drought*. Washington, DC: US Department of Commerce.
- Patah, N., Mansor, S., & Mispan, M. (2006). An application of remote sensing and geographic information system for forest fire risk mapping. *Malaysian Centre for Remote Sensing*, σσ. 54-67. Ανάκτηση από <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.97.1605&rep=rep1&type=pdf>
- Pladsrichuay, S., Suwanwerakamtorn, R., & Pannucharoenwong, N. (2018). Estimating Vegetation Canopy Density in the Lower Chi Basin, Northeast,. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(6), σσ. 3215-3219. Ανάκτηση από [https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n6\\_11.pdf](https://www.ripublication.com/ijaer18/ijaerv13n6_11.pdf)
- Plaza, J., Plaza, A., Valencia, D., & Paz, A. (2009). Massively Parallel Processing of Remotely Sensed Hyperspectral Images. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 7455, σσ. 0-11. Proc. of SPIE. doi:10.1117/12.825455

- Rikimaru, A. (1999). Concept of FCD Mapping Model and Semi-Expert System. Στο I. T. Association, *FCD-Mapper, User's Guide* (σσ. 1-30,1-60). JOFCA. Ανάκτηση 05 23, 2020, από [http://www.itto.int/files/itto\\_project\\_db\\_input/2056/Technical/pd13-97-3%20rev1\(F\)%20FCD-Mapper%20User's%20Guide\\_e.pdf](http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2056/Technical/pd13-97-3%20rev1(F)%20FCD-Mapper%20User's%20Guide_e.pdf)
- Rikimaru, A., Roy, P., & Miyatake, S. (2002). Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology*, 43(1), σσ. 39-47. doi:ISSN 0564-3295
- Rikimaru, A. (1996). LANDSAT TM Data Processing Guide for Forest Canopy Density Mapping and Monitoring Model. *ITTO Workshop on Utilization of Remote Sensing in Site Assessment and Planning for Rehabilitation of Logged-Over Forests*, (σσ. 1-8). Bangkok.
- San-Miguel-Ayanz, J. (2012). Comprehensive Monitoring of Wildfires in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS). Στο J. P. Tiefenbacher, *Approaches to Managing Disaster – Assessing Hazards, Emergencies and Disaster Impacts* (σ. 88). Texas: Texas State University. doi:10.5772/11112
- Sharma, L., Kanga, S., Nathawat, M., Sinha, S., & Pandey, P. (2012, 08 14). Fuzzy AHP for forest fire risk modeling. *Disaster Prevention and Management*, 22(2), σσ. 160-171. doi:10.1108/09653561211219964
- Sharples, J., McRae, R., Weber, R., & Gill, M. (2009, 05). A simple index for assessing fuel moisture content. *Environmental Modelling & Software*, 24(5), σσ. 637-646. doi:10.1016/j.envsoft.2008.10.012
- Sharples, J., Weber, R., McRae, R., & Gill, A. (2009, 06). A simple index for assessing fire danger rating. *Environmental Modelling and Software*, 24(6), σσ. 764-774. doi:10.1016/j.envsoft.2008.11.004
- Skvarenina, J., Mindas, J., Holec, J., & Tucek, J. (2003). Analysis of the natural and meteorological conditions during two largest forest fire events in the Slovak Paradise National Park. *Proceedings of the International Scientific Workshop on Forest Fires in the Wildland–Urban Interface and Rural Areas in Europe: an integral planning and management challenge*, (σσ. 15-16). Athens.
- Tošić, I., Mladjan, D., Gavrilov, M., Zivanovic, S., Radaković, M., Putniković, S., . . . Mistrizelović, K. (2019, 08 01). Potential influence of meteorological variables on forest fire risk in Serbia during the period 2000-2017. *Open Geosciences*, 11(1), σσ. 414-425. doi:10.1515/geo-2019-0033
- U.S. Geological Survey. (2013, 11 11). *U.S. Geological Survey*. Ανάκτηση από Landsat 8 band designations: <https://www.usgs.gov/media/images/landsat-8-band-designations>
- United States Geological Survey. (2018, 10). *Landsat Surface Reflectance-Derived Spectral Indices*. Ανάκτηση 05 23, 020, από <https://www.usgs.gov>: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/normalized-difference-moisture-index>

- User Guide to EFFIS applications*. (2018, 05 01). Ανάκτηση 02 23, 2019, από The European Forest Fire Information: [https://effis.jrc.ec.europa.eu/media/filer\\_public/25/e7/25e7c98d-e6b7-4169-8d9a-793909d16d7b/effis-userguide-23.pdf](https://effis.jrc.ec.europa.eu/media/filer_public/25/e7/25e7c98d-e6b7-4169-8d9a-793909d16d7b/effis-userguide-23.pdf)
- Venevsky, S., Sitch, S., Thonicke, K., & Cramer, W. (2002, 09 06). Simulating fire regimes in human-dominated ecosystems: Iberian Peninsula case study. *Global Change Biology*, σσ. 984-998. doi:10.1046/j.1365-2486.2002.00528.x
- Verbesselt, J., Lhermitte, S., Jonsson, P., & van Aardt, J. (2006, 07). Evaluating satellite and climate data-derived indices as fire risk indicators in savanna ecosystems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6), σσ. 1622-1632. doi:10.1109/TGRS.2005.862262
- Viegas, D., & Pinol. (2001, 01 01). Estimating live fine fuel moisture content using meteorologically-based indices. *International Journal of Wildland Fire*, 10(2), σσ. 223-240. doi:10.1071/WF01022
- Viegas, D., Bovio, G., Ferreira, A., & Nosenzo, A. (1999, 12). Comparative Study of Various Methods of Fire Danger Evaluation in Southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, 9(4), σσ. 235-246. doi:10.1071/WF00015
- Wagner, V. (1974). Structure of the Canadian forest fire weather index. *Departmental Publication 1333*, σ. 49. Ανάκτηση από <https://cfs.nrcan.gc.ca/pubwarehouse/pdfs/24864.pdf>
- Wikipedia. (2007, 05 10). *Τηλεπισκόπηση*. Ανάκτηση 11 02, 2019, από <https://el.wikipedia.org/>: <https://el.wikipedia.org/wiki/Τηλεπισκόπηση>
- Wikipedia. (2019, 08 22). *Τρίγωνο της φωτιάς*. Ανάκτηση 8 4, 2019, από <https://el.wikipedia.org/>: [https://el.wikipedia.org/wiki/Τρίγωνο\\_της\\_φωτιάς](https://el.wikipedia.org/wiki/Τρίγωνο_της_φωτιάς)
- Wilson, E., & Sader, S. (2002, 06). Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80(3), σσ. 385-396. doi:[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00318-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00318-2)
- Xenos. (1999). *Anopoli*. Ανάκτηση από <https://www.anopolirooms.gr/>: <https://www.anopolirooms.gr/el/photos/lefka-ori-pachnes.html>
- Xue, J., & Baofeng, S. (2017, 05 23). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017, σσ. 1353691:1-1353691:17. doi:10.1155/2017/1353691
- Αργιαλάς, Δ. (1998). Ερμηνεία πολυφασματικών εικόνων τηλεπισκόπησης. Στο Δ. Αργιαλάς, *Ψηφιακή Τηλεπισκόπηση* (σ. 1). Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Αργιαλάς, Δ. (1999). Ψηφιακή Επεξεργασία Εικόνων. Στο Α. Δημήτρης, *Φωτοερμηνεία - Τηλεπισκόπηση* (σσ. 46-47). Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- Αργιαλάς, Δ., & Δερκέζος, Π. (2002). eCognition: Ένα εργαλείο Χαρτογράφησης Γεωμορφών. *Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Αργιαλάς, Δ., & Δερκέζος, Π. (2002). Χαρτογράφηση αστικού πράσινου απο δεδομένα IKONOS με αντικειμενοστραφή βάση γνώσης και ασαφή λογική. *6ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνεδρίο της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας* (σσ. 39-46). Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Αργιαλάς, Δ., & Τζώσος, Ά. (2007). Εφαρμογή Τεχνικών Αντικειμενοστραφούς Ανάλυσης Εικόνας Για Την Ταξινόμηση Αμιγούς Αστικής Περιοχής (Εφαρμογή Για Την Περιοχή Γουδιού Αττικής) Με Τη Χρήση Τηλεπισκοπικών Δεδομένων Υψηλής Διακριτικής Ικανότητας. *8ο Πανελλήνιο Γεωγραφικό Συνέδριο*, (σσ. 335-343). Αθήνα.
- Αργυροπούλου, Ε. (2013). *Αυτόματη αναγνώριση ρηξιγενών επιφανειών με αντικειμενοστραφή ανάλυση σε ψηφιακό μοντέλο υποθαλάσσιου αναγλύφου, στην περιοχή του Βορείου Αιγαίου*. (Δ. Αργιαλάς, Επιμ.) Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.  
doi:<http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.13296>
- Βατούγιου, Σ. (2014). *Συγκριτική διερεύνηση φασματικών χαρακτηριστικών του landsat 5 tm και landsat 8 oli/tirs με επιβλεπόμενη και αντικειμενοστραφή ταξινόμηση*. (Δ. Αργιαλάς, Επιμ.) Αθήνα, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.  
doi:<http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.7293>
- Βικιπαίδεια. (χ.χ.). *Τηλεπισκόπηση*. Ανάκτηση 01 05, 2020, από <https://el.wikipedia.org/wiki/Τηλεπισκόπηση>
- Βορίσης, Δ. (2001). *Η καταστολή των δασικών πυρκαγιών*. Αθήνα: Αρχηγείο Πυροσβεστικού Σώματος.
- Βορίσης, Δ. (2012, 05 20). *Δασικές Πυρκαγιές*. Ανάκτηση 7 31, 2019, από <http://www.firesecurity.gr/Pdf/070110.pdf>
- Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. (2013, 06 03). *Μορφολογία, υδρογραφία, κλίμα*. Ανάκτηση από <http://diocles.civil.duth.gr/>:  
<http://diocles.civil.duth.gr/links/home/database/chania/pr51ge.pdf>
- Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. (χ.χ.). *Πλατφόρμα Τηλεκπαίδευσης*. Ανάκτηση 01 15, 2020, από <https://eclass.uoa.gr/>:  
[https%3A%2F%2Feclass.uoa.gr%2Fmodules%2Fdocument%2Findex.php%3Fcourse%3D%2FPHYS131%26download%3D%2F4ece69e0xu92%2F4ecf5273gfao.pdf&psig=AOvVaw3IMFd2K\\_FVxW5f108ftrno&ust=1602513273704000&source=images&cd=vfe&ved=0CAMQjB1qFw](https%3A%2F%2Feclass.uoa.gr%2Fmodules%2Fdocument%2Findex.php%3Fcourse%3D%2FPHYS131%26download%3D%2F4ece69e0xu92%2F4ecf5273gfao.pdf&psig=AOvVaw3IMFd2K_FVxW5f108ftrno&ust=1602513273704000&source=images&cd=vfe&ved=0CAMQjB1qFw)
- Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων. (2007, 01). *Η Σχέση Δασικών Καυσίμων και Πυρκαγιών*. Ανάκτηση 9 07, 2019, από <http://www.fria.gr/>:  
<http://www.fria.gr/mmfria/index.php?id=100&catid=43&lan=GR&tl=CATEGORYID>
- Καϊλίδης Δ., Κ. Π. (2004). *Δασικές πυρκαγιές 1900 - 2000*. Γιαχούδη Γιαπούλη.



- Καλαμποκίδης, Κ., Ηλιόπουλος, Ν., & Γλιγλίνος, Δ. (2013). *Πυρο-Μετεωρολογία και Συμπεριφορά Δασικών Πυρκαγιών σε ένα Μεταβαλλόμενο Κλίμα*. Εκδοτικός Όμιλος ΙΩΝ. doi:978-960-508-045-7
- Καττέ, Β. (2014). *Η διαχρονική εξέλιξη των καλύψεων γης στο νησί Ικαρία τα τριάντα τελευταία χρόνια με την χρήση δορυφορικών εικόνων*. Βόλος: Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας. doi:http://dx.doi.org/10.26253/heal.uth.1130
- Κούλη, Ρ. (2014). *Αυτόματη Αναγνώριση των Γεωμορφολογικών και Μορφοτεκτονικών Δομών με Αντικειμενοστρεφή Ανάλυση Εικόνας σε Ψηφιακό Μοντέλο Υποθαλάσσιου Αναγλύφου στην περιοχή νότια της Κρήτης*. (Δ. Αργιαλάς, Επιμ.) Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κωνσταντινίδης, Π. (2003). *Μαθαίνοντας να Ζούμε με τις Δασικές Πυρκαγιές*. Χριστοδουλίδης. doi:9789608183377
- Μακρυγιάννης, & Σαχσαμάνογλου. (1994). *Στοιχεία Γενικής Μετεωρολογίας*. ART OF TEXT. doi:9603120324
- Μητράκα, Ζ. (2011). *Ταξινόμηση Δορυφορικών Εικόνων σε Επίπεδο Υπό-εικονοστοιχείου για την Εκτίμηση του Συντελεστή Εκπομπής Επιφάνειας Εδάφους σε Αστικές Περιοχές*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης. Ανάκτηση από <https://dias.library.tuc.gr/view/16504?locale=el>
- Παπαδόπουλος, Κ. (2012). *Σύστημα κατάσβεσης με εκνέφωση*. Χανιά: Ακαδημία Εμπορικού Ναυτικού Κρήτης.
- Σουλιώτης, Γ. (2008). Η αμέλεια βάζει φωτιά στα δάση. *Καθημερινή*, 2. Ανάκτηση από <https://www.kathimerini.gr/332187/article/epikairothta/ellada/h-ameleia-vazei-fwtia-sta-dash>
- Σχολή Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών. (2011, 05 27). *Ελληνική ονοματολογία CORINE LAND COVER*. Ανάκτηση 11 15, 2019, από <http://portal.survey.ntua.gr/>: [http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/rsens/rs/corine\\_nomenclature\\_el.pdf](http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/rsens/rs/corine_nomenclature_el.pdf)
- Ταμπάκης, Σ., & Καρανικόλα, Π. (2015). *Δασικές Πυρκαγιές και Κοινωνία*. Θράκη: Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. doi:978-960-9698-10-8
- Φλόκας, Α. (1997). *Μαθήματα μετεωρολογίας και κλιματολογίας*. Θεσσαλονίκη: Ζήτη. doi:9789604312887