



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Ταμείο
Περιφερειακής Ανάπτυξης



ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ
ΙΟΝΙΩΝ
ΝΗΣΙΩΝ



ΕΣΠΑ
2014-2020
ανάπτυξη - εργασία - αλληλεγγύη

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΛΑΕΡΤΗΣ

ΤΙΤΛΟΣ ΠΡΑΞΗΣ: «ΛΑΕΡΤΗΣ – ΚΑΙΝΟΤΟΜΟ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑ ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ»

**ΥΠΟΕΡΓΟ 2: Τρέχουσες Μετεωρολογικές Συνθήκες, Κλιματική Μεταβλητότητα και Εκτίμηση Κινδύνου
Δασικής Πυρκαγιάς στα Επτάνησα**

ΚΩΔΙΚΟΣ ΟΠΣ (MIS): 5010951

ΦΟΡΕΑΣ: ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΠΑΚΕΤΟ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**ΠΕ 2.1.5 : Συλλογή δεδομένων πεδίου και λήψη φασματικών υπογραφών, για τον υπολογισμό της
δασικής βιομάζας της νήσου Ιθάκης, με τηλεπισκοπικές μεθόδους και συμμετοχή στην επιστημονική
ανάλυση – έρευνα για την εκτίμηση της δασικής βιομάζας με τηλεσκοπικές μεθόδους.**

**ΥΠΟ-ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ: Συλλογή δεδομένων πεδίου, εκτίμηση και ταξινόμηση δασικής βιομάζας (μοντέλων
καύσιμης ύλης) με χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης της νήσου Ιθάκης, ανάλυση συμπεριφοράς δασικής
πυρκαγιάς στη βάση αυτών των εκτιμήσεων υπό διαφορετικά σενάρια κλιματικών μεταβλητών.**

Κ. Ποϊραζίδης – Α. Μαρτίνης - Π. Ξόφης

ΖΑΚΥΝΘΟΣ 2023

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	6
2. Συλλογή δεδομένων πεδίου και εκτίμηση βιομάζας – Καύσιμης ύλης.	11
3. Προσομοίωση δασικών πυρκαγιών και εκτίμηση κινδύνου πυρκαγιάς υπό διαφορετικά σενάρια κλιματικών συνθηκών,	33
3.1. <i>FARSITE-Fire Area Simulator</i>	34
3.2. <i>FLAMMAP</i>	35
3.3. <i>Συλλογή και δημιουργία Γεωγραφικών δεδομένων</i>	37
3.3.1. Ψηφιακό Μοντέλο καύσιμης ύλης,	37
3.3.2. Τοπογραφικές συνθήκες της περιοχής μελέτης	39
3.3.3. Ψηφιακό μοντέλο πυκνότητας ανωρόφου.	45
3.4. <i>Προσομοίωση συμπεριφοράς δασικής πυρκαγιάς και εκτίμηση των βασικών παραμέτρων συμπεριφοράς.</i>	47
3.5. <i>Εκτίμηση Κινδύνου Πυρκαγιάς</i>	63
4. Συμπεράσματα	75
5. Βιβλιογραφία	76

Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Ποσοστά Χρήσεων γης (%)	12
Εικόνα 2. Διασπορά θέσεων δειγματοληψίας.....	13
Εικόνα 3. Αποτελέσματα ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (PCA)	14
Εικόνα 4. Εικόνα Sentinel-2 λήψης 16/8/2022 σε ψευδοχρωμοσύνθεση: R:NIR, G:RED, B:Green.....	19
Εικόνα 5. Εικόνα Sentinel-1 λήψης 30/8/2022	20
Εικόνα 6. Normalised Difference Vegetation Index 16/8/2022	21
Εικόνα 7. Green Normalised Vegetation Index 16/8/2022	22
Εικόνα 8. Normalised Difference Moisture Index 16/8/2022	23
Εικόνα 9. Normalised Difference Water Index 16/8/2022.....	24
Εικόνα 10. Modified Anthocyanin Reflectance Index 16/8/2022	25
Εικόνα 11. Moisture Stress Index 16/8/2022.....	26
Εικόνα 12. Soil Adjusted Vegetation Index 16/8/2022	27
Εικόνα 13. Plant Senescence Reflectance Index 16/8/2022	28
Εικόνα 14. Αλγόριθμος υλοποίησης της ταξινόμησης σε μοντέλα καύσιμης ύλης.....	30
Εικόνα 15. Χαρτογραφική αποτύπωση τύπων βλάστησης.....	32
Εικόνα 16. Μοντέλα καύσιμης ύλης N. Ιθάκης.....	41
Εικόνα 17. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους.....	42
Εικόνα 18. Ψηφιακό μοντέλο κλίσεων.....	43
Εικόνα 19. Ψηφιακό μοντέλο εκθέσεων.....	44
Εικόνα 20. Ψηφιακό μοντέλο πυκνότητας ανωρόφου	46
Εικόνα 21. Χάρτης Έντασης Μετώπου υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθήκων ανέμου (3 Bft) και υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο i).....	51
Εικόνα 22. Χάρτης Έντασης Μετώπου υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθήκων ανέμου (3 Bft) και παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλη (Σενάριο ii)	52
Εικόνα 23. Χάρτης Έντασης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο iii)	53
Εικόνα 24. Χάρτης Έντασης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλη (Σενάριο iv).....	54
Εικόνα 25. Χάρτης Έντασης Μετώπου υπό συνθήκες εξαιρετικά ισχυρού ανέμου (7 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο v)	55
Εικόνα 26. Χάρτης Έντασης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (7 Bft) παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλη (Σενάριο vi).....	56
Εικόνα 27. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθήκων ανέμου (3 Bft) και υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο i).....	57
Εικόνα 28. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης Μετώπου υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθήκων ανέμου (3 Bft) και παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλη (Σενάριο ii).....	58
Εικόνα 29. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο iii)	59
Εικόνα 30. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλη (Σενάριο iv)....	60
Εικόνα 31. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης Μετώπου υπό συνθήκες εξαιρετικά ισχυρού ανέμου (7 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο v).....	61

Εικόνα 32. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (7 Bft) παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης (Σενάριο vi)....	62
Εικόνα 33. Δείκτης ανθρώπινης επίδρασης (HI) που αποτυπώνει την πιθανότητα έναρξης πυρκαγιάς από κάποια ανθρώπινη δραστηριότητα.....	65
Εικόνα 34. Δείκτης Πυρικού Ιστορικού (PH) που αποτυπώνει την πιθανότητα έναρξης πυρκαγιάς με βάση το προηγούμενο ιστορικό.....	66
Εικόνα 35. Διακύμανση των ποσοστών της έκτασης του νησιού στις δυο βασικές κατηγορίες κινδύνου για κάθε ένα από τα σενάρια.....	68
Εικόνα 36. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθήκων ανέμου (3 Bft) και υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο i).....	69
Εικόνα 37. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθήκων ανέμου (3 Bft) και παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης (Σενάριο ii)	70
Εικόνα 38. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο iii)	71
Εικόνα 39. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης (Σενάριο iv)....	72
Εικόνα 40. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό συνθήκες εξαιρετικά ισχυρού ανέμου (7 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο v)	73
Εικόνα 41. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (7 Bft) παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης (Σενάριο vi)....	74

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Αντιστοίχιση τύπου βλάστησης με μοντέλο καύσιμης ύλης	15
Πίνακας 2. Φορτίο καύσιμης ύλης για τους τύπους βλάστησης της περιοχής	16
Πίνακας 3. Φασματική και Χωρική Αναλυση δεδομένων Sentinel-2.	17
Πίνακας 4. Εκτάσεις και ποσοστά κάλυψης τύπων βλάστησης και καύσιμης ύλης.	31
Πίνακας 5. Έκταση ανά κλάση έντασης μετώπου πυρκαγιάς για κάθε ένα από τα έξι σενάρια.....	49
Πίνακας 6. Έκταση ανά κλάση κατηγορίας κινδύνου πυρκαγιάς για κάθε ένα από τα έξι σενάρια.....	67

1. Εισαγωγή

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν έναν σημαντικό περιβαλλοντικό παράγοντα με μια παρουσία που ξεκινά από τη στιγμή που υπήρχε οποιασδήποτε μορφής χερσαία βλάστηση στον πλανήτη. Για τον χώρο της Μεσογειακής λεκάνης, ιδιαίτερα, οι δασικές πυρκαγιές, ως φαινόμενο με περιοδική παρουσία και σημαντικό οικολογικό ρόλο, ξεκινά από τα πρώτα στάδια εγκατάστασης του Μεσογειακού τύπου κλίματος (Trabaud, 1987, 1994) περίπου πριν τρία εκατομμύρια χρόνια (Suc, 1984), ως αποτέλεσμα της μετάβασης από έναν υποτροπικό τύπο κλίματος σε έναν τύπο με χαρακτηριστική εποχικότητα στην διασπορά των βροχοπτώσεων και μια παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Έκτοτε υπήρξε τόσο σημαντικός ο ρόλος της φωτιάς στη διαμόρφωση του Μεσογειακού τοπίου, ώστε μόνο είδη που είτε διέθεταν είτε ανέπτυξαν μηχανισμούς για να ξεπερνούν τις καταστροφικές συνέπειες μιας πυρκαγιάς, κατάφεραν να διατηρηθούν στο βιοκλιματικό αυτό χώρο. Μάλιστα είναι τέτοια η προσαρμογή των διαφόρων φυτικών ειδών στην περιοδική παρουσία των πυρκαγιών που οδήγησε κάποιους επιστήμονες, στις αρχές της δεκαετίας του 1970, να διατυπώσουν την άποψη ότι τα μεσογειακά φυτά ευνοούνται από τις πυρκαγιές σε τέτοιο βαθμό ώστε να έχουν αναπτύξει μηχανισμούς πρόκλησης πυρκαγιάς (Much, 1970; Rundel, 1981). Αυτή η άποψη βέβαια παρά τις όποιες πειραματικές ή μη προσπάθειες (π.χ. Williamson & Black, 1981; Buckley, 1983 και 1984) δεν μπόρεσε ποτέ να στηριχτεί σε σοβαρά επιστημονικά δεδομένα και σε μια λογική επιστημονική βάση (Snyder, 1984; Troumbis & Trabaud, 1989; Bond & Midgley, 1995; Schwilk & Kerr; 2002).

Για εκατομμύρια χρόνια η φωτιά αποτελούσε έναν φυσικό περιβαλλοντικό παράγοντα προκαλούμενη από φυσικά αίτια, όπως πτώση κεραυνών, εκρήξεις ηφαιστειών, πτώση βράχων κ.α. (Edwards, 1984; Kruger & Bigalke, 1984; Whelan, 1995), ο οποίος είχε μια περιοδική παρουσία (κύκλος φωτιάς) οδηγώντας, ως φυσικό αποτέλεσμα, στην περιοδική ανανέωση των οικοσυστημάτων. Αργότερα, ωστόσο, και μετά το πέρασμα του ανθρώπου σε μια φάση διαμορφωτή του περιβάλλοντος στο οποίο ζει, η φωτιά αποτέλεσε για αυτόν ένα σημαντικό εργαλείο για τη διαμόρφωση καλύτερων συνθηκών διαβίωσης. Την χρησιμοποίησε για την δημιουργία κατάλληλων χώρων για ανάπτυξη αγροτικών δραστηριοτήτων, για τη βελτίωση βοσκοτόπων, ακόμη και ως όπλο για την καταπολέμηση ζώων που του δημιουργούσαν πρόβλημα. Έτσι λοιπόν η φωτιά από ένας φυσικός παράγοντας μετατρέπεται σταδιακά σε έναν καταστροφικό για το φυσικό περιβάλλον παράγοντα με πολύ συχνότερη εμφάνιση στις ίδιες θέσεις (μικρότερος κύκλος φωτιάς), χωρίς ωστόσο να αντιμετωπίζεται ως τέτοιος από τον άνθρωπο (Naveh & Dan, 1973).

Από τότε μέχρι σήμερα έχουν όμως αλλάξει πολλά. Ο άνθρωπος εξακολουθεί να αποτελεί ένα δομικό, μάλλον, στοιχείο των δασικών οικοσυστημάτων, μόνο που ο ρόλος του μέσα σε αυτά αλλά και οι υπηρεσίες που αυτά του προσφέρουν είναι εντελώς διαφορετικές. Τα δασικά οικοσυστήματα δεν αποτελούν πλέον εμπόδιο στην εξέλιξη και ανάπτυξή του αλλά απαραίτητη προϋπόθεση για την αειφορική του παρουσία. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να αντιμετωπίζονται οι δασικές πυρκαγιές στις μέρες μας σαν μια από τις μεγαλύτερες ίσως απειλές για το φυσικό περιβάλλον και επομένως και για την ίδια την ευημερία του ανθρώπου.

Έτσι από τις αρχές αλλά κυρίως από τα μέσα του προηγούμενου αιώνα αρχίζουν να εφαρμόζονται, σε όλες τις περιοχές με συχνή εμφάνιση πυρκαγιών, διάφορες στρατηγικές αντιμετώπισης τους με περισσότερη ή λιγότερη επιτυχία. Η αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών αποτελείται ουσιαστικά από τρεις διακριτές αλλά και αλληλένδετες φάσεις: **την πρόληψη, την καταστολή και την αποκατάσταση**. Για να είναι αποτελεσματική μια στρατηγική αντιμετώπισης των δασικών πυρκαγιών πρέπει και οι τρεις παραπάνω φάσεις να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Το στάδιο της αποκατάστασης είναι έξω από τον σκοπό της παρούσας γι' αυτό θα αναλυθούν παρακάτω τα δυο πρώτα στάδια της αντιπυρικής στρατηγικής.

Για την Ελλάδα μπορούν να γίνουν μια σειρά από παρατηρήσεις για την μέχρι τώρα στρατηγική αντιμετώπισης των δασικών πυρκαγιών που ενδεχομένως να εξηγήσουν τους λόγους για τη σημερινή κατάσταση που αντιμετωπίζεται σε κάθε σχεδόν αντιπυρική περίοδο. Σε ότι αφορά την πρόληψη μπορεί με βεβαιότητα να ειπωθεί ότι είναι ουσιαστικά ανύπαρκτη και όπου αυτή εφαρμόζεται γίνεται με όρους και μέτρα που παραπέμπουν σε εποχές προ πεντακονταετίας, όταν η σχετική επιστημονική γνώση είχε μόλις αρχίσει να αναπτύσσεται. Χωρίς ουσιαστικούς στόχους και χωρίς μετρήσιμα αποτελέσματα που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αποτελεσματικά μέτρα πρόληψης. Το πιο ίσως ενδεικτικό παράδειγμα της αποτυχίας στην πρόληψη των δασικών πυρκαγιών είναι η έλλειψη αξιόπιστων στοιχείων τόσο στατιστικών όσο και γεωγραφικών που να αφορά τα πραγματικά αίτια των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα. Αντίθετα έχει κυριαρχήσει η άποψη ότι τα δάση της χώρας καίγονται σχεδόν αποκλειστικά από πυρκαγιές που προκαλούνται από σκόπιμες και κακοπροαίρετες εμπρηστικές ενέργειες. Η άρνηση όμως να αναλυθούν τα πραγματικά αίτια που προκαλούν τις δασικές πυρκαγιές οδηγούν αναγκαστικά στη μη λύση του προβλήματος αφού κανένα πρόβλημα δεν μπορεί να λυθεί εάν δεν έχουν προηγουμένως αναλυθεί τα αίτια που το προκαλούν.

Από τη διεθνή βιβλιογραφία και για περιοχές με παρόμοιες συνθήκες με αυτές της Ελλάδας γνωρίζουμε πλέον ότι οι δασικές πυρκαγιές προκαλούνται από ανθρωπογενή αίτια σε ποσοστό που φτάνει το 98%. Τα ίδια στοιχεία δείχνουν επίσης ότι από το σύνολο των δασικών πυρκαγιών αυτές που προέρχονται από κακοπροαίρετους εμπρησμούς σπανίως ξεπερνούν ένα ποσοστό της τάξεως του 8-10% ενώ οι υπόλοιπες οφείλονται σε ανθρωπογενή μεν αίτια, που σχετίζονται όμως περισσότερο με την αμέλεια και την ελλιπή λήψη μέτρων. Γίνεται επομένως εύκολα αντιληπτό ότι με σωστή και λεπτομερή ανάλυση τόσο στατιστική όσο και γεωγραφική των αιτιών που προκαλούν τις δασικές πυρκαγιές υπάρχει ένα τεράστιο πεδίο βελτίωσης στον τομέα της πρόληψης των δασικών πυρκαγιών.

Το σύστημα καταστολής εκτός από τα δικά του ενδογενή προβλήματα έχει να αντιμετωπίσει και ένα αυξημένο φορτίο, συνέπεια της περιορισμένης απόδοσης του προηγούμενου σταδίου αντιπυρικής προστασίας. Σε επιχειρησιακό επίπεδο το σύστημα καταστολής σπανίως λαμβάνει υπόψη του τις ιδιαίτερες συνθήκες που δημιουργούν κάθε φορά οι ιδιαιτερότητες της καύσιμης ύλης ενώ υπάρχει ελλιπής γνώση και πληροφόρηση αναφορικά με τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς υπό συγκεκριμένες συνθήκες ευφλεκτότητας, τοπογραφίας και καιρικών συνθηκών. Εξακολουθεί να στηρίζεται σε μέτρα πυροπροστασίας, όπως η διακοπή της συνέχειας της καύσιμης ύλης με υψηλές ζώνες αντιπυρικής προστασίας, που έχουν εδώ και δεκαετίες αποδειχθεί ανεπαρκείς και οικολογικά καταστροφικές. Αντίθετα, άλλα μέτρα διαχείρισης της καύσιμης ύλης δεν εξετάζονται καν, αν και έχουν εφαρμοστεί σε άλλες περιοχές με παρόμοιες συνθήκες και έχουν αποδώσει. Το αποτέλεσμα είναι το σύστημα καταστολής να είναι αφενός πολυδάπανο, αφού τα εναέρια μέσα χρησιμοποιούνται πλέον αφειδώς, αφετέρου η αποτελεσματικότητά του δεν έχει φτάσει σε επίπεδο που να διασφαλίζει την οικολογική ακεραιότητα των φυσικών οικοσυστημάτων.

Σε ότι αφορά την αποκατάσταση μπορεί και εδώ να γίνουν ανάλογες διαπιστώσεις για την αναποτελεσματικότητα των μέτρων και πρακτικών που εφαρμόζονται. Το σημαντικότερο ίσως όλων είναι ότι δεν υπάρχει κεντρικός σχεδιασμός για την αποκατάσταση των καμένων εκτάσεων. Αντίθετα αποφάσεις παίρνονται εν θερμώ και συχνά με καθαρά επικοινωνιακά κριτήρια, οδηγώντας πολλές φορές στα αντίθετα αποτελέσματα, δηλαδή στην περαιτέρω υποβάθμιση του τοπίου.

Τα μέτρα προστασίας που λαμβάνονται για τις καμένες εκτάσεις, όπως η απαγόρευση βόσκησης, δεν υποστηρίζονται επαρκώς με αποτέλεσμα να έχουμε συχνά την συνεπίδραση βόσκησης και φωτιάς που μπορεί να οδηγήσει μεγάλες δασικές εκτάσεις της χώρας ακόμη και σε ερημοποίηση.

Τέλος, οι αναδασώσεις δεν γίνονται μετά από ολοκληρωμένο σχεδιασμό ο οποίος να λαμβάνει υπόψη τις ιδιαιτερότητες κάθε περιοχής με αποτέλεσμα να γίνονται αναδασώσεις εκεί που δεν χρειάζονται και να μην γίνονται εκεί που πραγματικά υπάρχει ανάγκη παρέμβασης. Παράλληλα, σε πολλές περιπτώσεις, η επιλογή των ειδών είναι ατυχής αφού δεν λαμβάνει υπόψη της την οικολογία μίας περιοχής αλλά τη διαθεσιμότητα των δασικών φυτωρίων. Έτσι εκτός του ότι αυτόχθονοι πληθυσμοί δέχονται μεγάλη πίεση μια τέτοια πρακτική μπορεί και να οδηγήσει σε γενετική επιμόλυνση πληθυσμούς με μεγάλη οικολογική αξία.

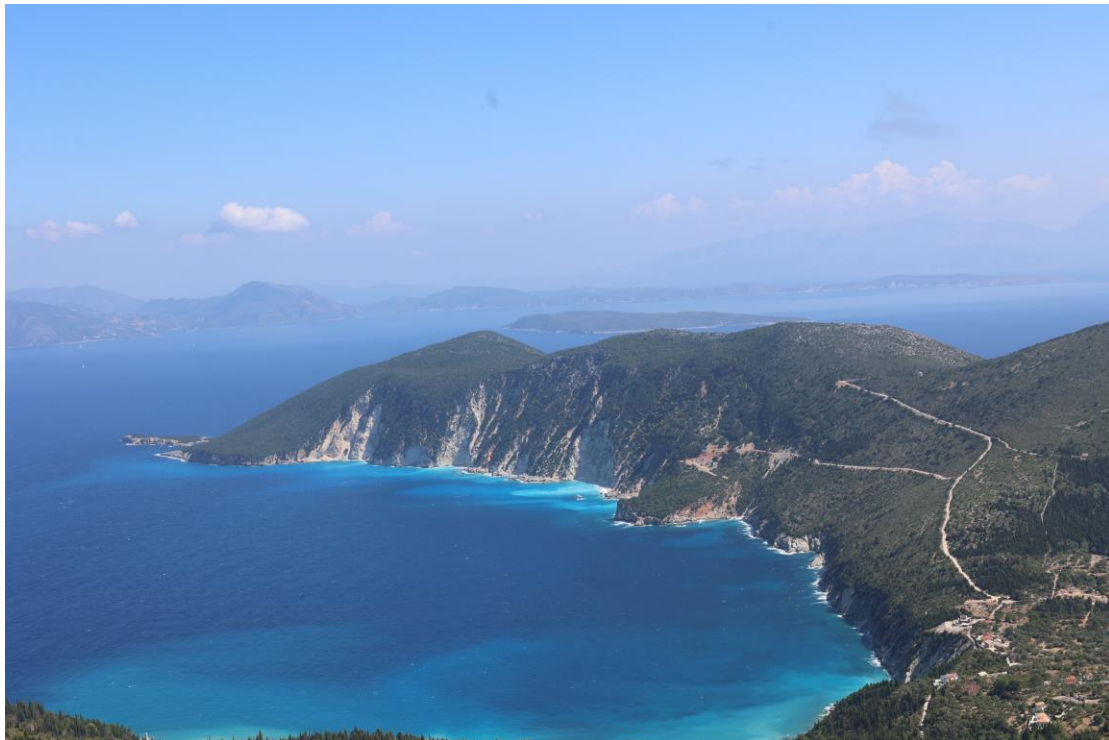
Γίνεται επομένως εύκολα αντιληπτό ότι η μέχρι τώρα στρατηγική αντιμετώπισης των δασικών πυρκαγιών της χώρας βασίζεται σε μια λάθος αντίληψη για το φαινόμενο της δασικής πυρκαγιάς. Έχει σαν σκοπό την ολική εξάλειψη του φαινομένου αντιμετωπίζοντας το αποσπασματικά, τόσο χρονικά όσο και χωρικά, χωρίς να αναλύεται ο ρόλος του τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Η ολοκληρωτική εξάλειψη όμως του φαινομένου των δασικών πυρκαγιών είναι πρακτικώς αδύνατη και οικολογικά εξαιρετικά αμφιλεγόμενη. Άλλωστε οι δασικές πυρκαγιές έχουν επιβάλει την παρουσία τους μέσα από τον ιστορικό ρόλο που έχουν παίξει στη σημερινή διαμόρφωση του Μεσογειακού τοπίου (Naveh, 1975).

Η πρόσφατη εμπειρία αποδεικνύει ότι μια στρατηγική αντιμετώπισης που στηρίζεται σχεδόν αποκλειστικά στη βελτίωση των μέσων καταστολής, χωρίς να περιλαμβάνει τη διαχείριση του ίδιου του αντικειμένου της πυρκαγιάς, δηλαδή τα δασικά οικοσυστήματα, είναι αναποτελεσματική με συνέπεια τις τελευταίες δεκαετίες να αυξάνεται όχι μόνο η συχνότητα των πυρκαγιών στο χώρο της Μεσογείου, (FAO, 2001) αλλά και η καταστρεπτικότητά τους. Αρκεί να σημειωθεί ότι ενώ οι μεγάλης έκτασης δασικές πυρκαγιές αντιστοιχούν μόλις στο 3% του συνολικού αριθμού των πυρκαγιών εντούτοις, η έκταση που επηρεάζεται από αυτές αντιστοιχεί στο 75% της συνολικής καμένης έκτασης. Αυτό σε μεγάλο βαθμό οφείλεται και στις νέες συνθήκες που δημιουργούνται από τη μείωση της δραστηριότητας του ανθρώπου μέσα στα δάση και την αύξηση της βιομάζας που τα καθιστά ευαίσθητα σε φαινόμενα πυρκαγιών (Keramitsoglou et al., 2008).

Και αν ακόμη το υπάρχον σύστημα αντιπυρικής προστασίας λειτουργούσε με εξαιρετική αποτελεσματικότητα εξαλείφοντας το φαινόμενο για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα αυτό θα δημιουργούσε μια οικολογική ανισορροπία οδηγώντας σε τεράστια και μη φυσική συγκέντρωση καύσιμης ύλης έτσι που όταν κάποια στιγμή εμφανιζόταν και πάλι η δασική πυρκαγιά αυτή θα οδηγούσε σε μια πραγματική και πιθανώς μη αναστρέψιμη οικολογική καταστροφή.

Επομένως καθίσταται πλέον επιτακτική η υιοθέτηση μιας στρατηγικής η οποία να αντιμετωπίζει την φωτιά σαν οικολογικό παράγοντα και ζωντανό οργανισμό με συγκεκριμένη γεωγραφική εξάπλωση, που καθορίζεται από τις κλιματικές συνθήκες, ο οποίος έχει συγκεκριμένη συμπεριφορά στο χώρο και στο χρόνο και συγκεκριμένες αδυναμίες. Στόχος μιας αποτελεσματικής στρατηγικής αντιπυρικής προστασίας δεν πρέπει να είναι η ουτοπία της εξάλειψης του φαινόμενου των δασικών πυρκαγιών. Ο στόχος θα πρέπει να είναι η μετατροπή του από έναν αδηφάγο οργανισμό που κατασπαράσσει τα πάντα στο πέρασμα του, σε έναν οργανισμό τρωτό και αντιμετωπίσιμο με διακριτική παρουσία και έναν οικολογικό ρόλο που θα εξακολουθεί να παίζει, χωρίς όμως να δημιουργεί τα σημερινά προβλήματα στο φυσικό περιβάλλον.

Για να επιτευχθεί όμως ο παραπάνω στόχος θα πρέπει να υπάρχει σε βάθος γνώση της πιθανής συμπεριφορά του σε έναν συγκεκριμένο γεωγραφικό χώρο με τις συγκεκριμένες ιδιαιτερότητές του τόσο τις τοπογραφικές όσο τις βιολογικές και τις κλιματικές. Έτσι θα είναι δυνατή η ανάπτυξη εναλλακτικών λύσεων για την αντιμετώπιση του με μέτρα και δράσεις που δεν θα διαταράσσουν την οικολογική ισορροπία και ταυτόχρονα θα διασφαλίζουν την αειφορική παρουσία των δασικών οικοσυστημάτων και το σύγχρονο ρόλο που αυτά καλούνται να παίζουν.



2. Συλλογή δεδομένων πεδίου και εκτίμηση βιομάζας – καύσιμης ύλης.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει δοθεί μεγάλη προσοχή στις οικολογικές επιπτώσεις της πυρκαγιάς, οι οποίες καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη συμπεριφορά της. Η συμπεριφορά της φωτιάς έχει ιδιαίτερη σημασία όχι μόνο γιατί πυρκαγιές με διαφορετική συμπεριφορά οδηγούν σε διαφορετικές οικολογικές επιπτώσεις, αλλά και επειδή καθορίζει τη βέλτιστη στρατηγική καταστολής κάθε δεδομένης πυρκαγιάς. Έτσι, έχουν γίνει διάφορες προσπάθειες για την ανάπτυξη εργαλείων και μοντέλων που θα μπορούσαν να αξιολογήσουν, αφενός, τον κίνδυνο πυρκαγιάς με ακρίβεια, και αφετέρου την συμπεριφορά μιας δασικής πυρκαγιάς (π.χ. Rothermel, 1972; Keramitsoglou et al., 2004; Vakalis et al., 2004a,b, Xofis et al. 2020a,b).

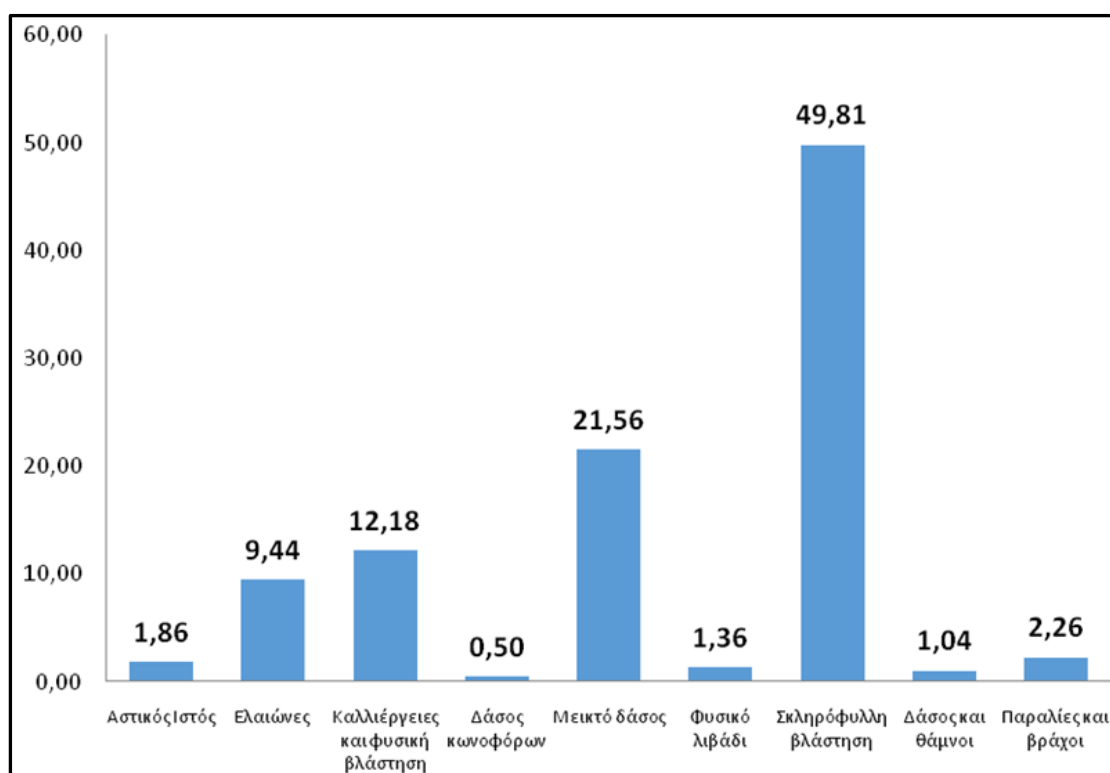
Οι δύο πιο σημαντικοί καθοριστικοί παράγοντες της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς είναι η ένταση του μετώπου και η ταχύτητα εξάπλωσής του, και επηρεάζονται και τα δύο, μεταξύ άλλων παραγόντων, από το είδος της καύσιμης ύλης, την ποσότητα της καύσιμης ύλης και τη συνέχεια της καύσιμης ύλης (Whelan, 1995). Διαφορετικά είδη φυτών και φυτοκοινοτήτων παράγουν διαφορετικούς τύπους καύσιμης ύλης με ορισμένα είδη, όπως τα μεσογειακά πεύκα να είναι πιο εύφλεκτα από άλλα λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε εύφλεκτα έλαια και ρητίνες, που μπορούν να δώσουν πυρκαγιές μεγάλης έντασης. Τόσο το συνολικό φορτίο καύσιμης ύλης όσο και η οριζόντια συνέχειά της σχετίζονται με την συνολική βιομάζα και το ποσοστό της επιφάνειας που καλύπτεται από βλάστηση και έτσι με δυνητικά καύσιμη ύλη (Whelan, 1995).

Η αποτελεσματικότητα και η ακρίβεια οποιουδήποτε εργαλείου που θα χρησιμοποιηθεί για εκτίμηση κινδύνου πυρκαγιάς ή η προσομοίωση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς εξαρτάται από την διαθεσιμότητα και ακρίβεια δεδομένων που σχετίζονται με τις παραπάνω οικοσυστημικές ιδιότητες. Θεματικά και χωρικά ακριβή δεδομένα κάλυψης γης και πληροφορίες για το ποσοστό της βλάστησης είναι επομένως ιδιαίτερης σημασίας για την πρόληψη και καταστολή μιας πυρκαγιάς σε ευπαθείς περιοχές.

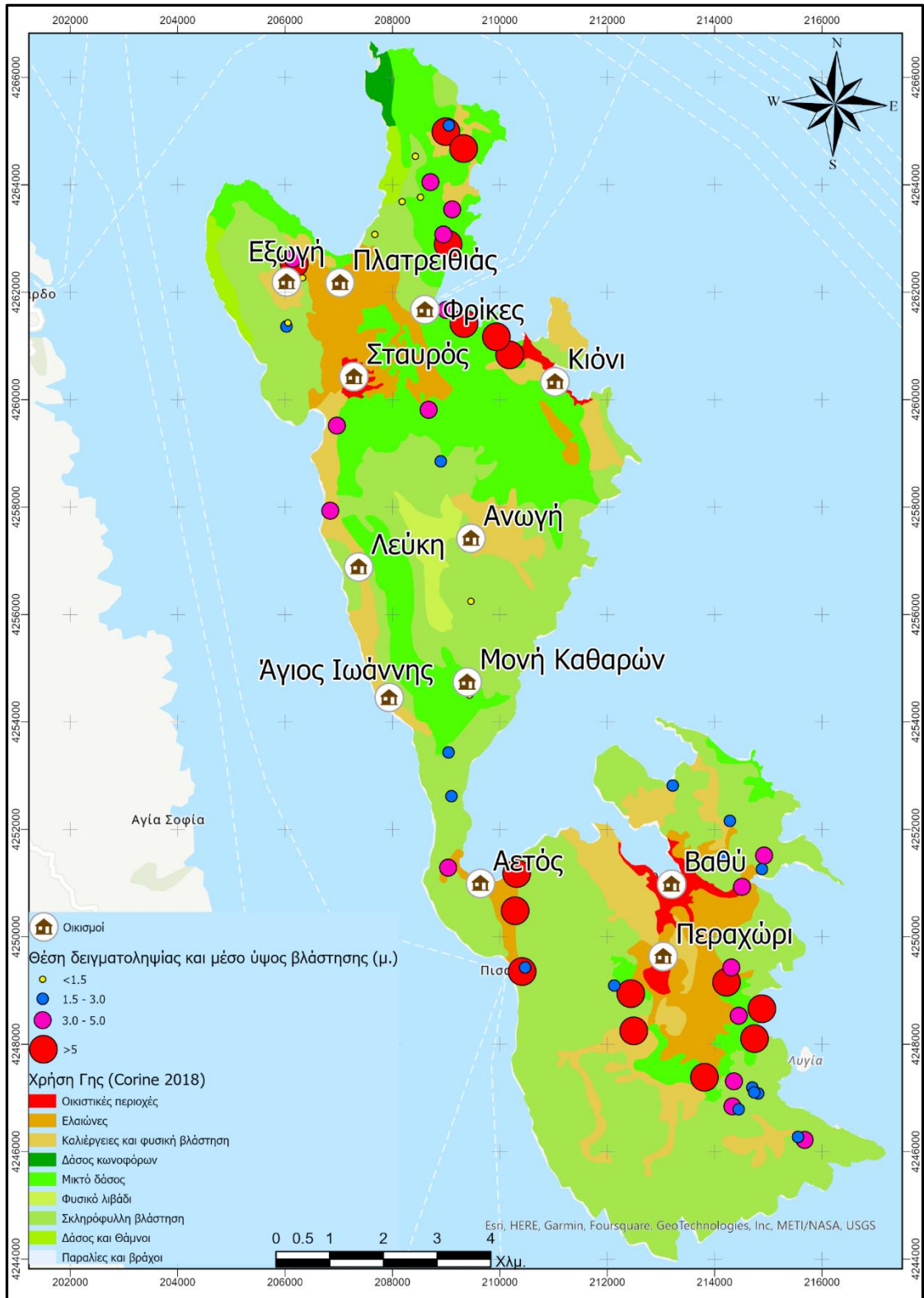
Στην παρούσα εργασία έγινε συνδυαστική χρήση, δορυφορικών δεδομένων από οπτικούς δέκτες, δορυφορικών δεδομένων από ενεργητικούς δέκτες και δεδομένων πεδίου για το νησί της Ιθάκης.

Τα δεδομένα πεδίου, τα οποία αφορούν πραγματικά δεδομένα σύνθεσης και δομής της βλάστησης, άρα και της βιομάζας και καύσιμης ύλης είναι αναντικατάστατα, ανεξάρτητα από το πόσο προηγμένες μέθοδοι και δεδομένα τηλεπισκόπησης θα χρησιμοποιηθούν κατά την υλοποίηση μιας ανάλυσης. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκε εντατική συλλογή δεδομένων πεδίου για το νησί της Ιθάκης, κατά την περίοδο Αυγούστου - Σεπτεμβρίου 2022.

Για το καθορισμό των θέσεων όπου έγινε η καταγραφή της βλάστησης, υιοθετήθηκε η μέθοδος της στρωματοποιημένης τυχαίας δειγματοληψίας. Η στρωμάτωση έγινε στην βάση των χρήσεων γης κατά *Corine Land Cover* του έτους 2018. Όπως αποτυπώνεται στις εικόνες 1 και 2 η κυρίαρχη κάλυψη γης είναι η σκληρόφυλλη πλατύφυλλη βλάστηση, που σε συνδυασμό με τα μικτά δάση που αποτελούν επίσης οικοσυστήματα μακκίας βλάστησης καλύπτουν πάνω από το 70% του νησιού. Συνολικά έγινε επιλογή 60 θέσεων για συλλογή στοιχείων από τις οποίες μόνο οι 57 ήταν προσβάσιμες και οι ακριβείς τους θέσεις εμφανίζονται στην εικόνα 2.



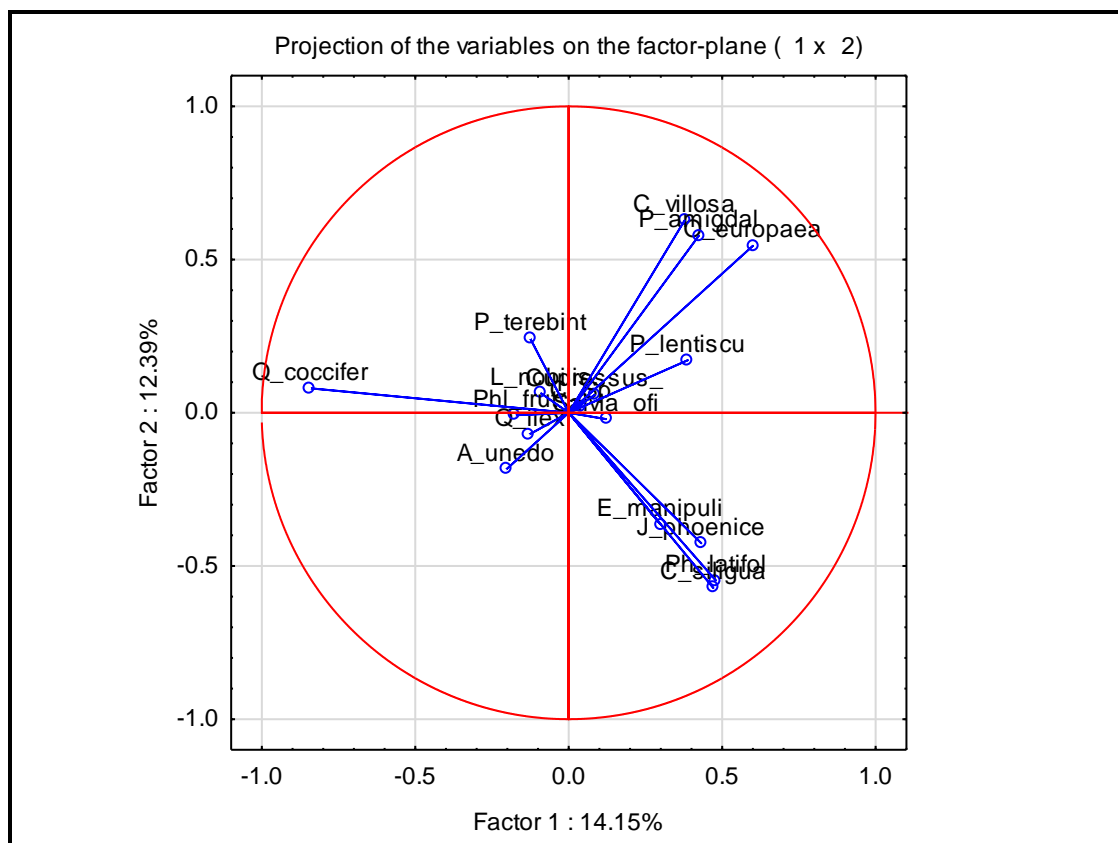
Εικόνα 1. Ποσοστά Χρήσεων γης για το νησί της Ιθάκης (%)



Εικόνα 2. Διασπορά θέσεων δειγματοληψίας συλλογής δεδομένων σύνθεσης και δομής της βλάστησης

Για την δειγματοληψία χρησιμοποιήθηκαν τετράγωνα (*plots*) των 20 X 20 μ. που θεωρούνται επαρκή για την καταγραφή της βλάστησης σε Μεσογειακούς θαμνώνες (Xofis et al. 2021). Τα στοιχεία που καταγράφηκαν ήταν η σύνθεση σε ξυλώδη είδη, η οποία εκτιμήθηκε με οπτική παρατήρηση από δύο ανεξάρτητους παρατηρητές, το ποσοστό συμμετοχής του κάθε είδους στην βλάστηση, το μέσο ύψος του κάθε είδους καθώς και η ύπαρξη γυμνού εδάφους και πώδους βλάστησης.

Καταγράφηκαν συνολικά 18 ξυλώδη είδη με κυρίαρχο είδος να είναι το *Quercus coccifera* ακολουθούμενο από το *Pistacia lentiscus*, *Arbutus unedo* και *Olea europaea*. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζει ο τρόπος που συναθροίζεται η βλάστηση στην περιοχή μέσω μιας ανάλυσης κύριων παραγόντων και αποτυπώνεται στην εικόνα 3.



Εικόνα 3. Αποτελέσματα ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (PCA) συνάθροισης της βλάστησης

Όπως φαίνεται η διασπορά του *Q. coccifera* βρίσκεται σε αντίθετη κατεύθυνση με αυτή των *Calicotome villosa*, *Olea europaea* και *Pirus amygdaliformis*. Το *C. villosa* είναι ένα χαρακτηριστικό είδος υποβαθμισμένων εδαφών όπως και εδαφών που βρίσκονται σε αρχικά στάδια δευτερογενούς διαδοχής. Η παρουσία της ελιάς αλλά και της γκορτσιάς είναι πιθανόν δείκτης παλαιών εγκαταλελειμμένων αγρών που βρίσκονται σε κάποιο στάδιο διαδοχής.

Επομένως οι θέσεις που σήμερα κυριαρχούνται από πουρνάρι σε ποσοστό που ξεπερνά και το 80 % αποτελούν θέσεις που έχουν παραμείνει αδιατάρακτες τόσο από τον άνθρωπο όσο και από φυσικές καταστροφές για πολλά χρόνια. Θα μπορούσε δηλαδή η φυτοκοινότητα με κυριαρχία πουρνარიού να αποτελεί την *climax* φυτοκοινωνία της περιοχής.

Η κάλυψη του εδάφους στις δειγματοληπτικές επιφάνειες κυμάνθηκε από 30 έως 100% με μέση τιμή 78% και τυπική απόκλιση 17,6%. Ο φυσικός βλαστητικός πλούτος του νησιού αναδεικνύεται και μέσα από το ύψος της μακκίας βλάστησης η οποία σε 29 από τις 57 δειγματοληπτικές επιφάνειες ξεπερνάει τα 3μ. Οι ευνοϊκές συνθήκες υγρασίας λόγω του σχετικά υψηλού ύψους βροχής φαίνεται ότι ευνοεί την ανάπτυξη πλούσιων σε βιομάζα σχηματισμών αειφύλλων πλατυφύλλων γεγονός που αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά και την επικινδυνότητα για δασικές πυρκαγιές, κάτι που θα αναλυθεί παρακάτω.

Η εκτίμηση ρίσκου πυρκαγιάς συνδέεται άμεσα με την ορθή αποτύπωση της βιομάζας, μέρος της οποίας αποτελεί την καύσιμη ύλη. Είναι επομένως ιδιαίτερα σημαντικό να αποτυπωθεί με ακρίβεια η διασπορά της καύσιμης ύλης. Το πρώτο βήμα αυτής της διαδικασίας είναι να αποδοθούν σε καθένα από τα 57 δείγματα ένα μοντέλο καύσιμης ύλης που να εκφράζει με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια τα χαρακτηριστικά της βιομάζας. Με βάση τις παρατηρήσεις που έγιναν στο πεδίο, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν και τα δεδομένα που περιγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία για τους τύπους βλάστησης της Μεσογείου καθορίστηκαν τα παρακάτω μοντέλα καύσιμης ύλης για τα 57 δειγματοληπτικές επιφάνειες (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Αντιστοίχιση τύπου βλάστησης με μοντέλο καύσιμης ύλης

Αριθμός Μοντέλου	Περιγραφή βλάστησης
208	Συνηρεφείς θαμνώνες αειφύλλων πλατυφύλλων ύψους μέχρι 3 μ. και κάλυψης πάνω από 60%
209	Συνηρεφείς θαμνώνες αειφύλλων πλατυφύλλων ύψους πάνω από 3 μ. και κάλυψης πάνω από 60%
231	Αραιοί θαμνώνες με κάλυψη κάτω από 60 % και το υπόλοιπο της επιφάνειας καλυμμένο με φρυγανική βλάστηση
221	Πυκνή φρυγανική βλάστηση σε ποσοστό πάνω από 80 % και αραιή μόνο παρουσία θάμνων
121	Αραιή φρυγανική βλάστηση και μέρος της έκτασης καλυπτόμενο από βραχώδεις εκτάσεις
210	Μεσογειακά Πευκοδάση

Τα χαρακτηριστικά των μοντέλων καύσιμης ύλης που καθορίστηκαν για τους τύπους βλάστησης της περιοχής φαίνονται στον πίνακα 2, ενώ στο κεφάλαιο 3.3.1 παρακάτω δίνεται μια λεπτομερή περιγραφή όλων των χαρακτηριστικών που περιγράφουν την καύσιμη ύλη μιας περιοχής.

Πίνακας 2. Φορτίο καύσιμης ύλης για τους τύπους βλάστησης της περιοχής

Αριθμός Μοντέλου	Φορτίο Καύσιμης Ύλης (τόνοι/εκτάριο)				
	1-Ώρας (<0,6 εκ.)	10-Ωρών (0,6-2,5 εκ)	100-Ωρών (2,5-7,6)	Ζωντανή φυλλώδης	Ζωντανή ξυλώδης
208	9,79	6,80	3,58	0,00	7,68
209	17,67	13,29	8,48	0,00	10,58
231	6,87	3,59	1,80	0,00	5,39
221	3,95	0,38	0,01	0,00	3,10
121	1,24	1,24	0,00	1,48	2,47
210	8,72	3,14	3,63	0,07	12,55

Για την χαρτογράφηση των τύπων καύσιμης ύλης (βιομάζας) της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε συνδυασμός εικόνων *Sentinel-2* και *Sentinel 1*, οι οποίες αναλύθηκαν σε περιβάλλον αντικειμενοστραφούς ανάλυσης εικόνας (OBIA), χρησιμοποιώντας το λογισμικό *eCognition* (Trimble, 2014). Δεν κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία χρονοσειράς εικόνων καθώς το τοπίο παρά την πολυπλοκότητά του δεν είναι δυναμικό, αφού απουσιάζουν εκτεταμένες εκτάσεις υγροτοπικών σχηματισμών όπως και εκτεταμένες λιβαδικές εκτάσεις που εμφανίζουν σημαντική δυναμική κατά την διάρκεια του έτους. Οι ημερομηνίες λήψης της εικόνας *Sentinel-2* ήταν η 16/8/2022 (Εικόνα 4) και της *Sentinel 1* η 30/8/2022 (Εικόνα 5).

Η αποστολή *Sentinel-2* αποτελείται από δύο δορυφόρους σε πολική τροχιά που εκτοξεύθηκαν από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (*ESA*) (Drusch et al., 2012), οι οποίοι φέρουν τον αισθητήρα *Multispectral Instrument (MSI)* και παρέχουν δεδομένα σε χωρικές αναλύσεις μεταξύ 10 και 60 μέτρων, καλύπτοντας ένα ευρύ μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από οπτικό έως υπέρυθρο (πίνακας 3) και χρονική ανάλυση πέντε ημερών. Οι εικόνες είχαν προεπεξεργαστεί στο επίπεδο 2A, επομένως είχαν ήδη διορθωθεί γεωμετρικά και ατμοσφαιρικά στην ανάκλαση του κάτω μέρους της ατμόσφαιρας (*BoA*). Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα φασματικά κανάλια με χωρική ανάλυση 10 και 20 m.

Πίνακας 3. Φασματική και Χωρική Αναλυση δεδομένων Sentinel-2.

Φασματικό κανάλι	Περιγραφή	Μήκος κύματος (nm)	Χωρική ανάλυση
Band 1	Coastal aerosol	433–453	60
Band 2	Blue	458–523	10
Band 3	Green	543–578	10
Band 4	Red	650–680	10
Band 5	Red Edge 1	698–713	20
Band 6	Red Edge 2	733–748	20
Band 7	Red Edge 3	773–793	20
Band 8	Near Infrared	785–900	10
Band 8A	Narrow Near Infrared	855–875	20
Band 9	Water vapour	395–955	60
Band 10	Shortwave infrared-Cirrus	1360–1390	60
Band 11	Shortwave infrared 1	1565–1655	20
Band 12	Shortwave infrared 2	2100–2280	20

Η αποστολή *Sentinel-1* αποτελείται από δύο δορυφόρους σε πολική τροχιά που εκτοξεύθηκαν από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (*ESA*). Λειτουργούν μέρα και νύχτα εκτελώντας απεικόνιση του *C-Band* (5,405 GHz) *Synthetic Aperture Radar*, επιτρέποντάς τους να αποκτούν εικόνες ανεξάρτητα από τις καιρικές συνθήκες. Ο *Sentinel 1* δημιουργεί δεδομένα *Synthetic Aperture Radar (SAR)* σε μονή ή διπλή πόλωση με χρόνο επανεπίσκεψης έξι ημερών. Τα δεδομένα *Sentinel-1 Level 1* διανέμονται από το *Copernicus* σε δύο τύπους *Ground Range Detected (GRD)* και *Single Look Complex (SLC)*. Οι εικόνες *Sentinel-1 GRD* αποτελούνται από εστιασμένα δεδομένα *SAR* που έχουν εντοπιστεί και προβληθεί στο επίπεδο του εδάφους χρησιμοποιώντας ένα Ελλειψοειδές αναφοράς. Η χωρική τους ανάλυση είναι 10 μ και πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω επίπεδα προεξεργασίας πριν την χρησιμοποίησή τους.

Calibration που είναι η διαδικασία που μετατρέπει τις τιμές ψηφιακών εικονοστοιχείων σε ραδιομετρικά προσαρμοσμένες τιμές *SAR* οπισθοσκέδασης. Οι πληροφορίες που απαιτούνται για την εφαρμογή της εξίσωσης περιλαμβάνονται στην εικόνα *Sentinel-1 GRD*. Συγκεκριμένα, ένα διάλυμα προσαρμογής που περιλαμβάνεται ως σχολιασμός επιτρέπει την απλή μετατροπή των τιμών της έντασης της εικόνας σε μηδενικές τιμές σίγμα (*Sigma 0*). Η προσαρμογή αντιστρέφει το συντελεστή κλιμάκωσης που εφαρμόζεται κατά τη δημιουργία προϊόντος *Level 1* και εφαρμόζει σταθερή μετατόπιση και ένα κέρδος που εξαρτάται από το εύρος, συμπεριλαμβανομένης της απόλυτης σταθεράς προσαρμογής.

Speckle Filtering (Φιλτράρισμα κηλίδων). Η κηλίδωση, που εμφανίζεται στις εικόνες *SAR* ως κοκκώδης θόρυβος, οφείλεται στην παρεμβολή κυμάτων και αντανάκλαται από πολλούς στοιχειώδεις διασκορπιστές. Το *Speckle Filtering* είναι μια διαδικασία για την αύξηση της

ποιότητας της εικόνας μειώνοντας την κηλίδωση. Όταν μια τέτοια διαδικασία γίνεται σε πρώιμο στάδιο επεξεργασίας των SAR δεδομένων, η κηλίδωση δεν μεταφέρεται σε επόμενα βήματα επεξεργασίας (δηλαδή, διόρθωση εδάφους ή μετατροπή σε dB). Τέλος, έγινε γεωμετρική διόρθωση καθώς και μετατροπή σε dB .

Εκτός από τα φασματικά κανάλια των εικόνων χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω οκτώ δείκτες που υπολογίστηκαν από την εικόνα *Sentinel 2* και αποτυπώνονται στις εικόνες 6-13.

$$\text{Normalised Difference Vegetation Index (NDVI)} = \frac{\text{Band 8} - \text{Band 4}}{\text{Band 8} + \text{Band 4}}$$

$$\text{Green Normalised Difference Vegetation Index (GNDVI)} = \frac{\text{Band 8} - \text{Band 3}}{\text{Band 8} + \text{Band 3}}$$

$$\text{Normalised Difference Moisture Index (NDMI)} = \frac{\text{Band 8} - \text{Band 11}}{\text{Band 8} + \text{Band 11}}$$

$$\text{Normalised Difference Water Index (NDWI)} = \frac{\text{Band 3} - \text{Band 7}}{\text{Band 3} + \text{Band 7}}$$

$$\text{Modified Anthocyanin Reflectance Index (mARI)} = \left(\frac{1}{\text{Band 3}} - \frac{1}{\text{Band 5}} \right) * \text{Band 7}$$

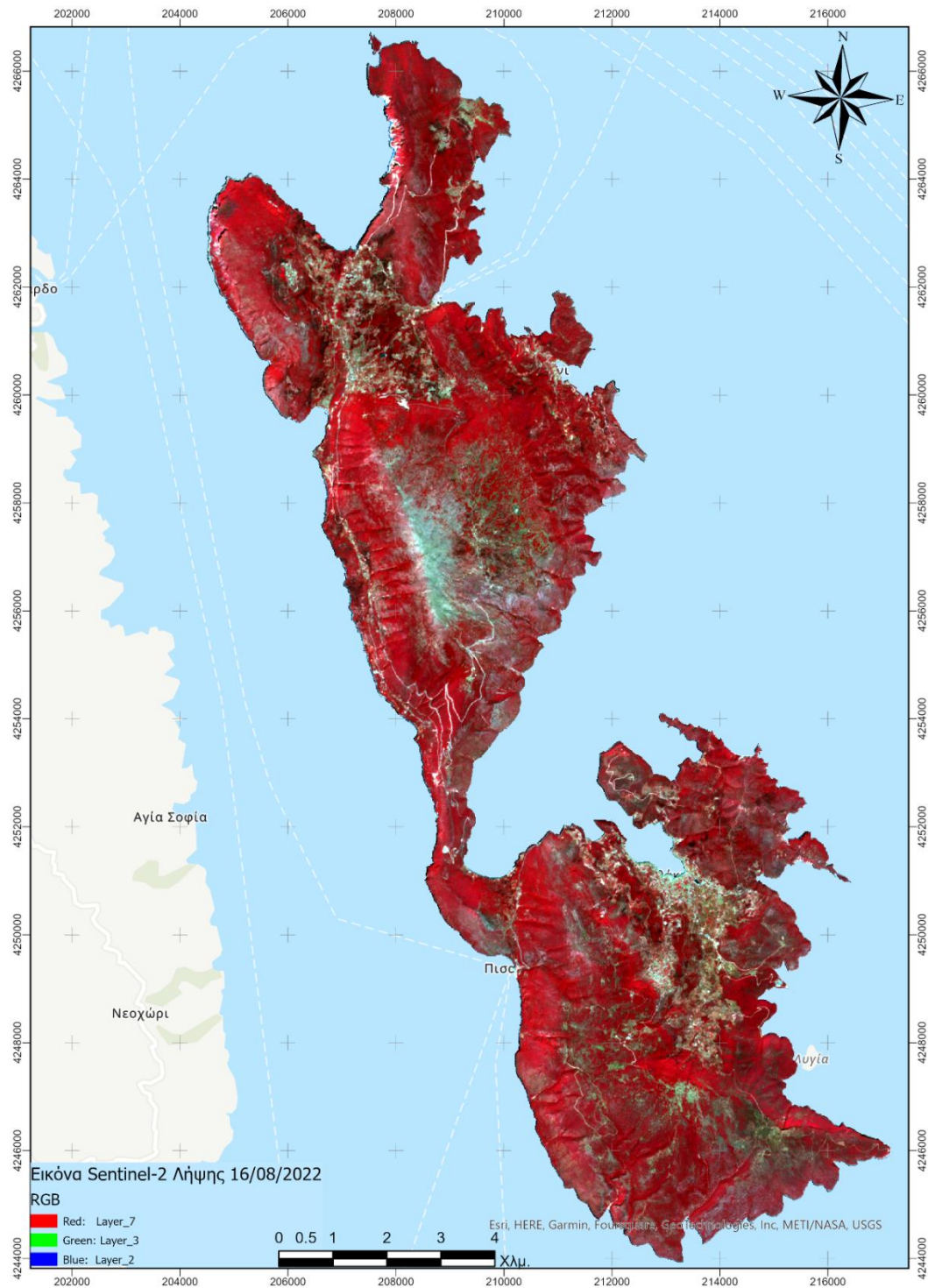
$$\text{Moisture Stress Index (MSI)} = \frac{\text{Band 11}}{\text{Band 8}}$$

$$\text{Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)} = \frac{\text{Band 8} - \text{Band 4}}{(\text{Band 8} + \text{Band 4} + 0.428) * (1 + 0.428)}$$

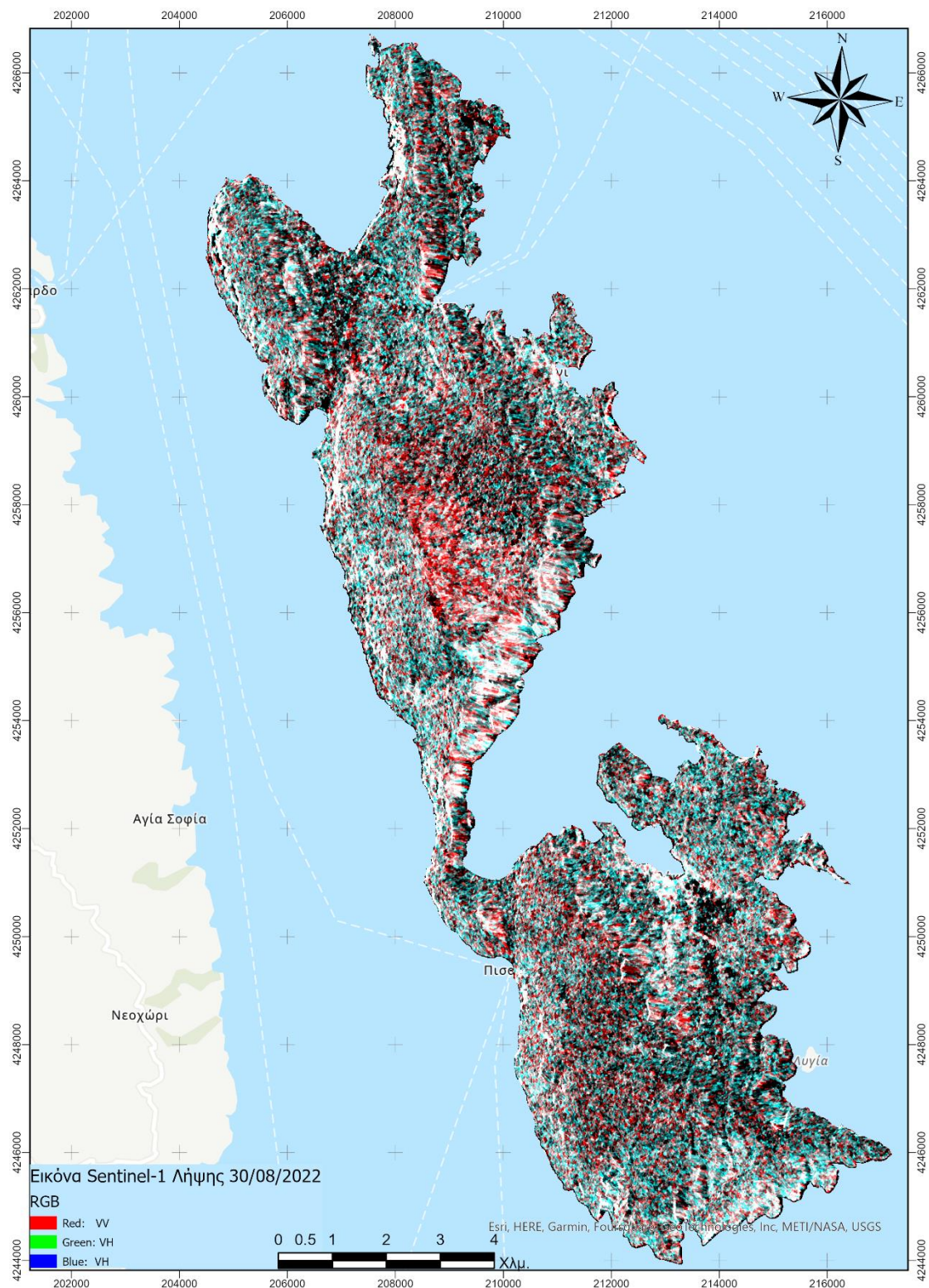
$$\text{Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)} = \frac{\text{Band 4} - \text{Band 2}}{\text{Band 5}}$$

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (*DEM*) ανάλυσης 2μ (το οποίο έγινε υποβάθμιση (*Resampling* στα 10μ). Το έντονο ανάγλυφο της περιοχής μελέτης έχει ως αποτέλεσμα μια ζωνοποίηση στην κατανομή των τύπων βλάστησης και η χρήση *DEM* ήταν απαραίτητη για την επίτευξη της μέγιστης ακρίβειας ταξινόμησης. Η χαρτογράφηση έγινε με τη χρήση του λογισμικού *eCognition v. 10.2*, το οποίο επιτρέπει την ενσωμάτωση στην ίδια ταξινόμηση δεδομένων από διαφορετικές πηγές και διαφορετικές χωρικές αναλύσεις. Η *OBIA*, όπως εφαρμόζεται στο *eCognition*, έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις που βασίζονται σε κυψελοστραφή ταξινόμηση όταν εφαρμόζεται σε δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης. Αντιμετωπίζει αποτελεσματικά την παραλλακτικότητα εντός ενός τύπου βλάστησης και δεδομένου ότι η ταξινόμηση δεν γίνεται στο εικονοστοιχείο αλλά στο αντικείμενο, διάφορα χαρακτηριστικά σχήματος, υψής και περιβάλλοντος μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία ταξινόμησης (Kim et al, 2009;

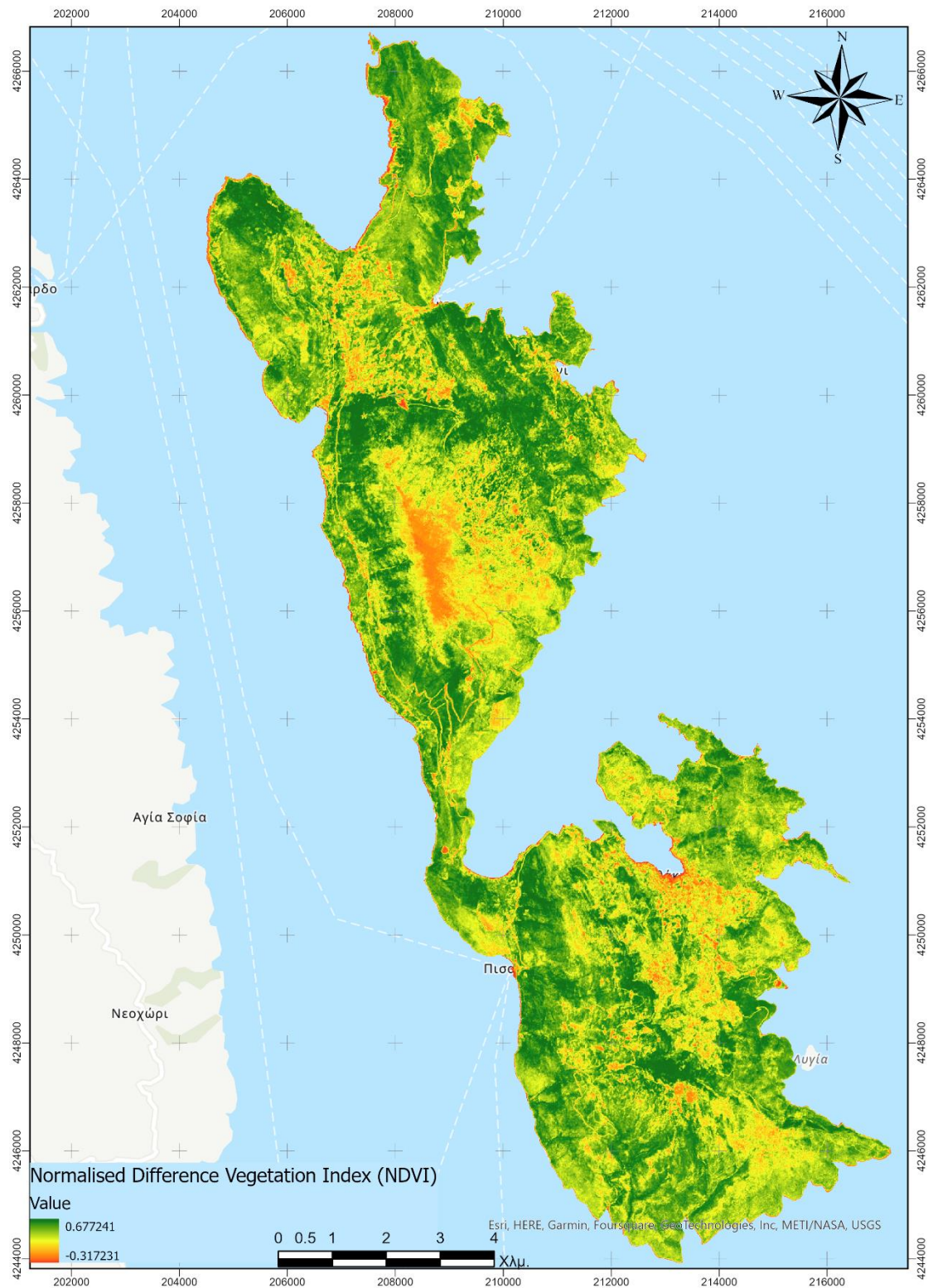
Rittl et al. 2013). Επιπλέον, η *OBIA* αποφεύγει την εικονοστοιχισμένη αναπαράσταση (*salt and pepper*) των κατηγοριών κάλυψης εδάφους που παρατηρείται συχνά σε προσεγγίσεις που βασίζονται σε εικονοστοιχεία, ενώ το τελικό προϊόν ταξινόμησης μπορεί να ενσωματωθεί απευθείας σε ένα *vector-GIS* για περαιτέρω ανάλυση (Bock et al. 2005).



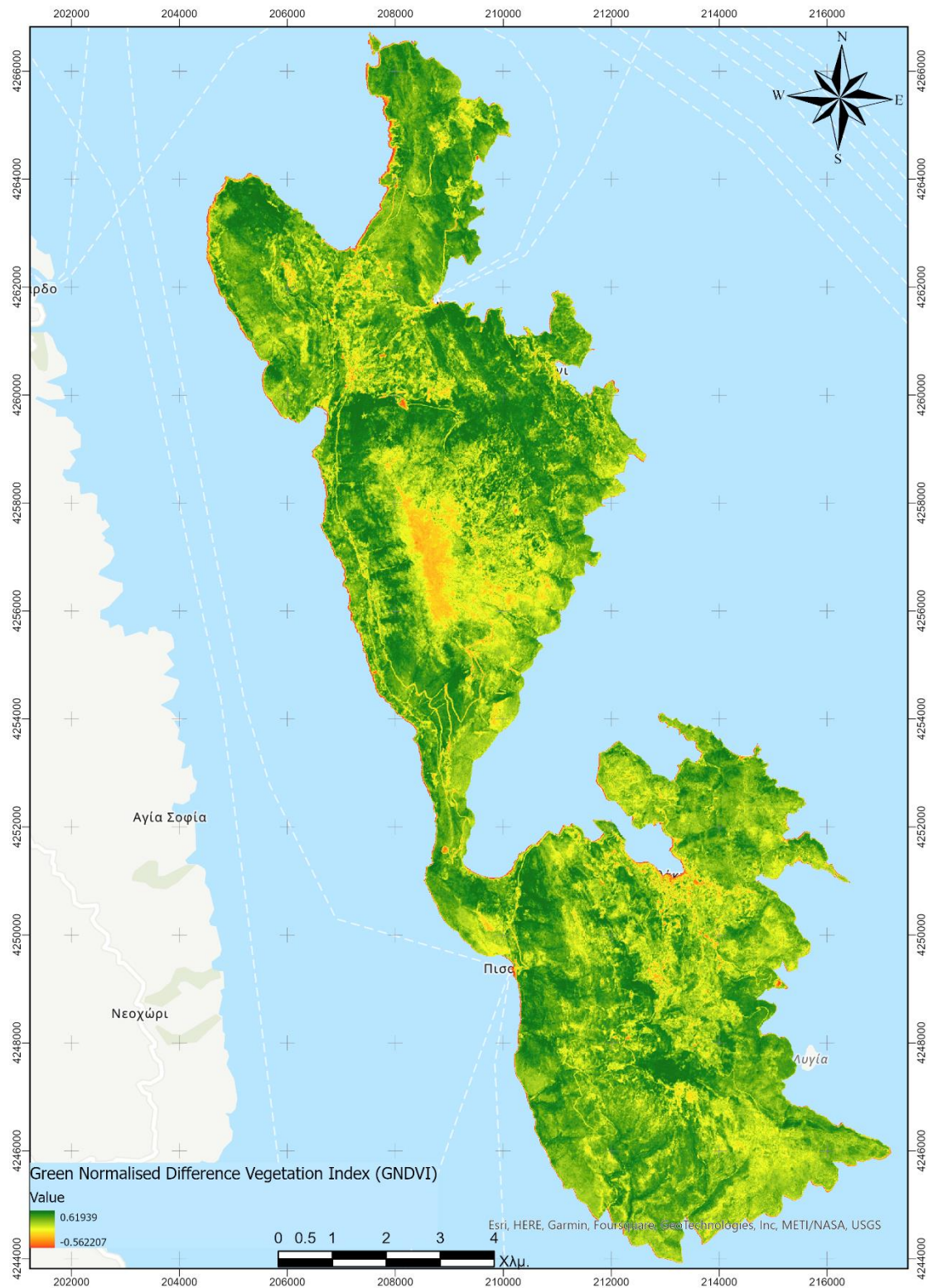
Εικόνα 4. Εικόνα Sentinel-2 λήψης 16/8/2022 σε ψευδοχρωμοσύνθεση: R:NIR, G:RED, B:Green, όπου διακρίνεται (με κόκκινο χρώμα) η υγιής βλάστηση



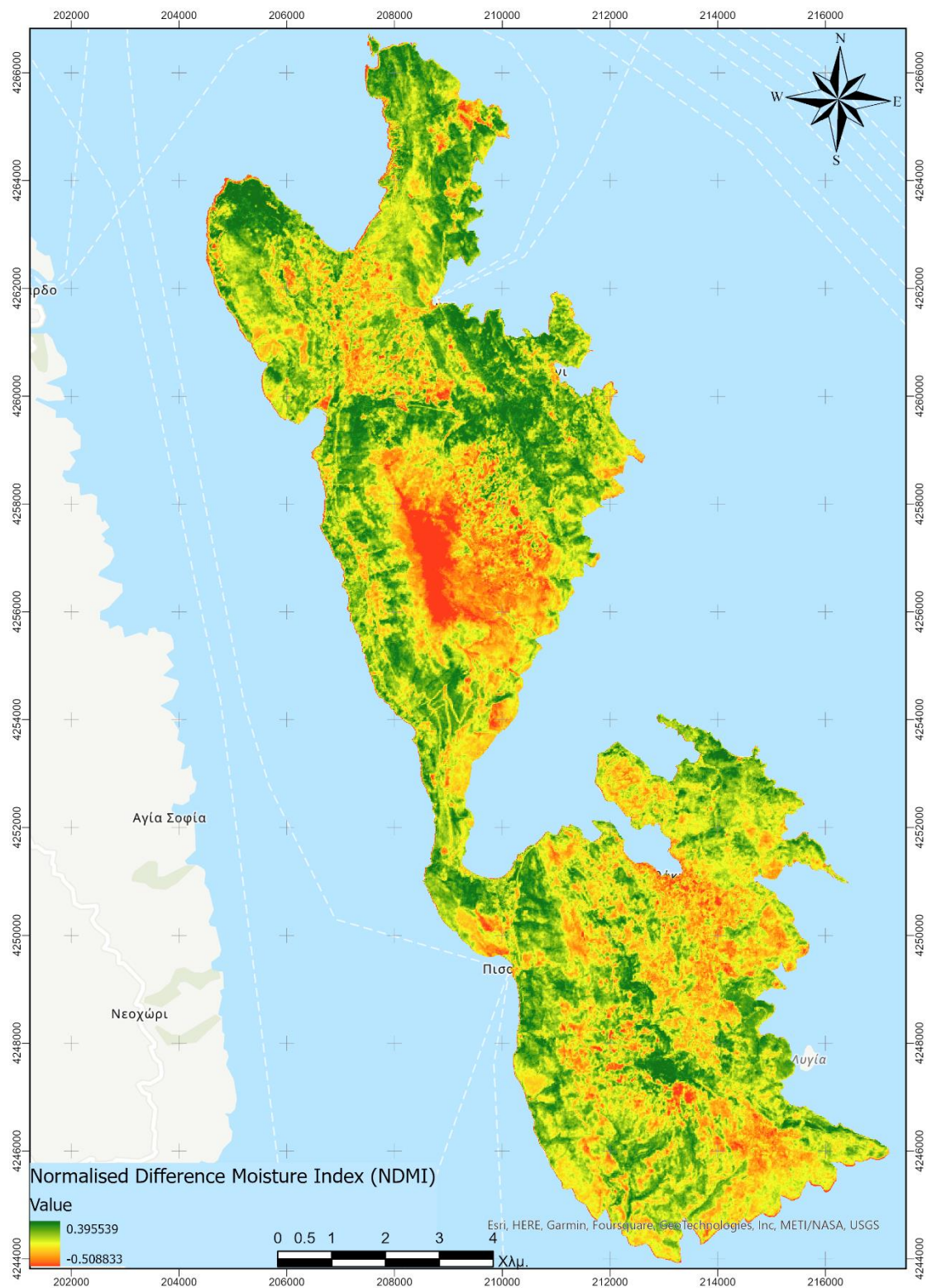
Εικόνα 5. Εικόνα Sentinel-1 λήψης 30/8/2022



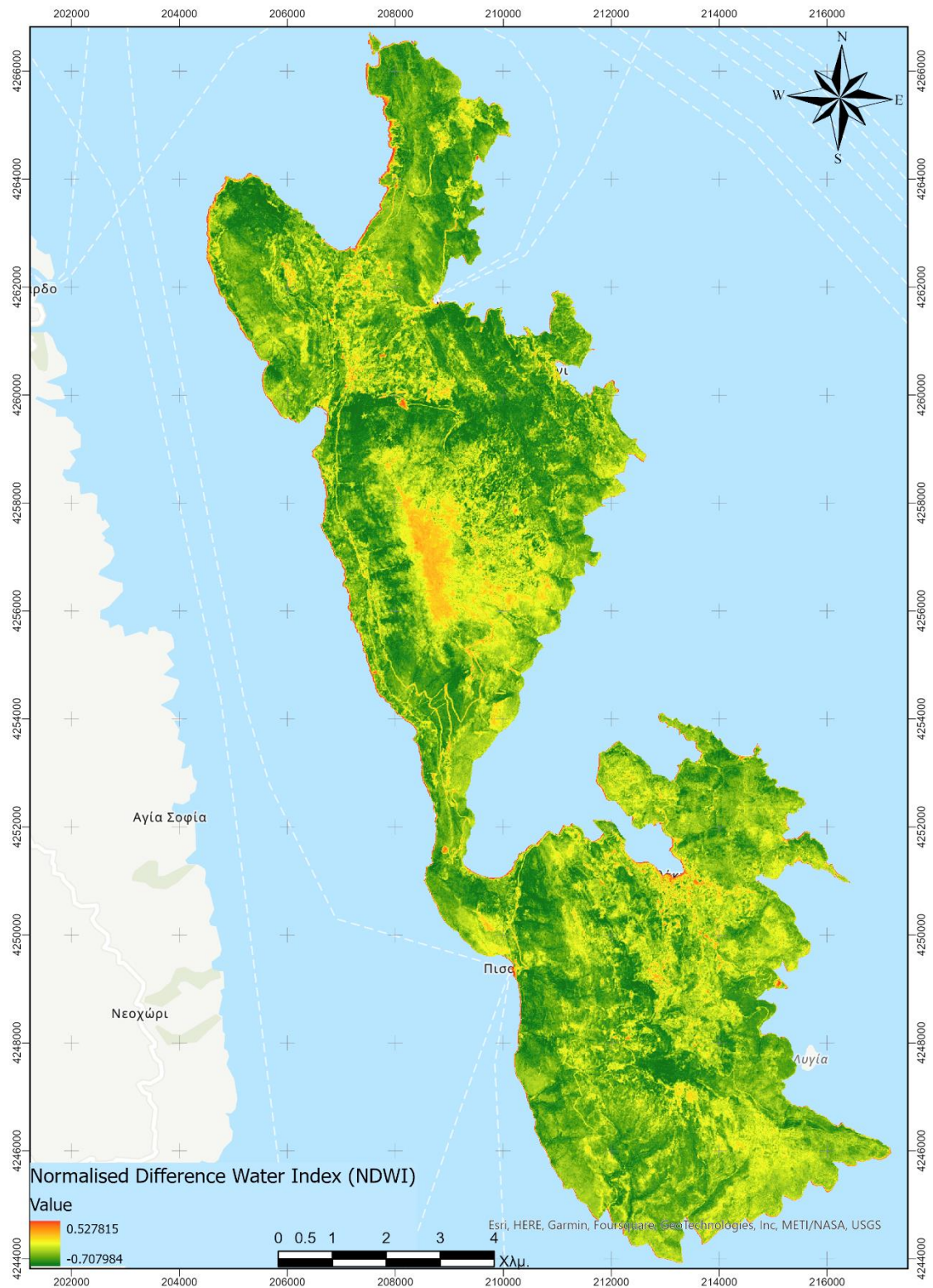
Εικόνα 6. Normalised Difference Vegetation Index 16/8/2022



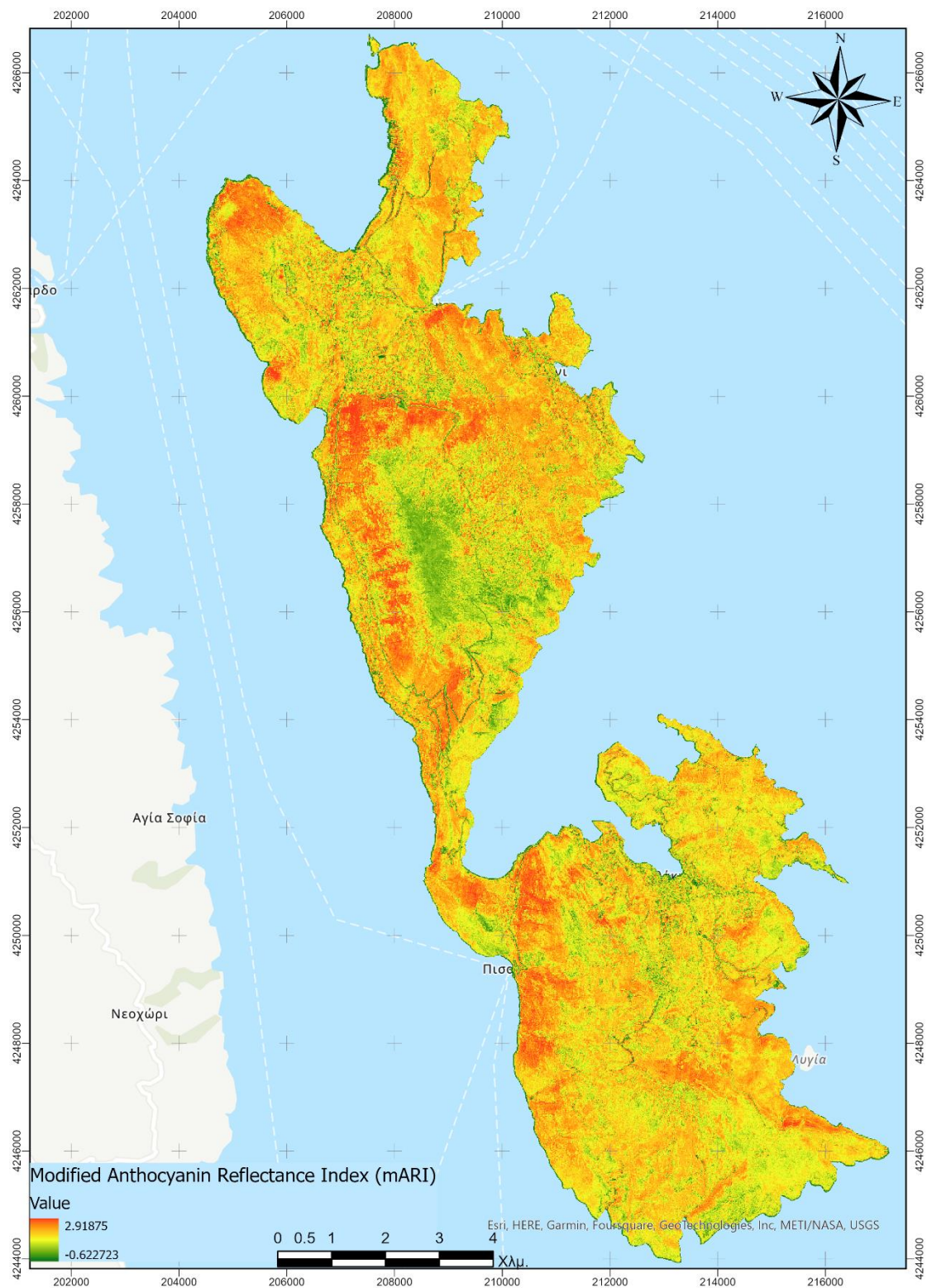
Εικόνα 7. Green Normalised Vegetation Index 16/8/2022



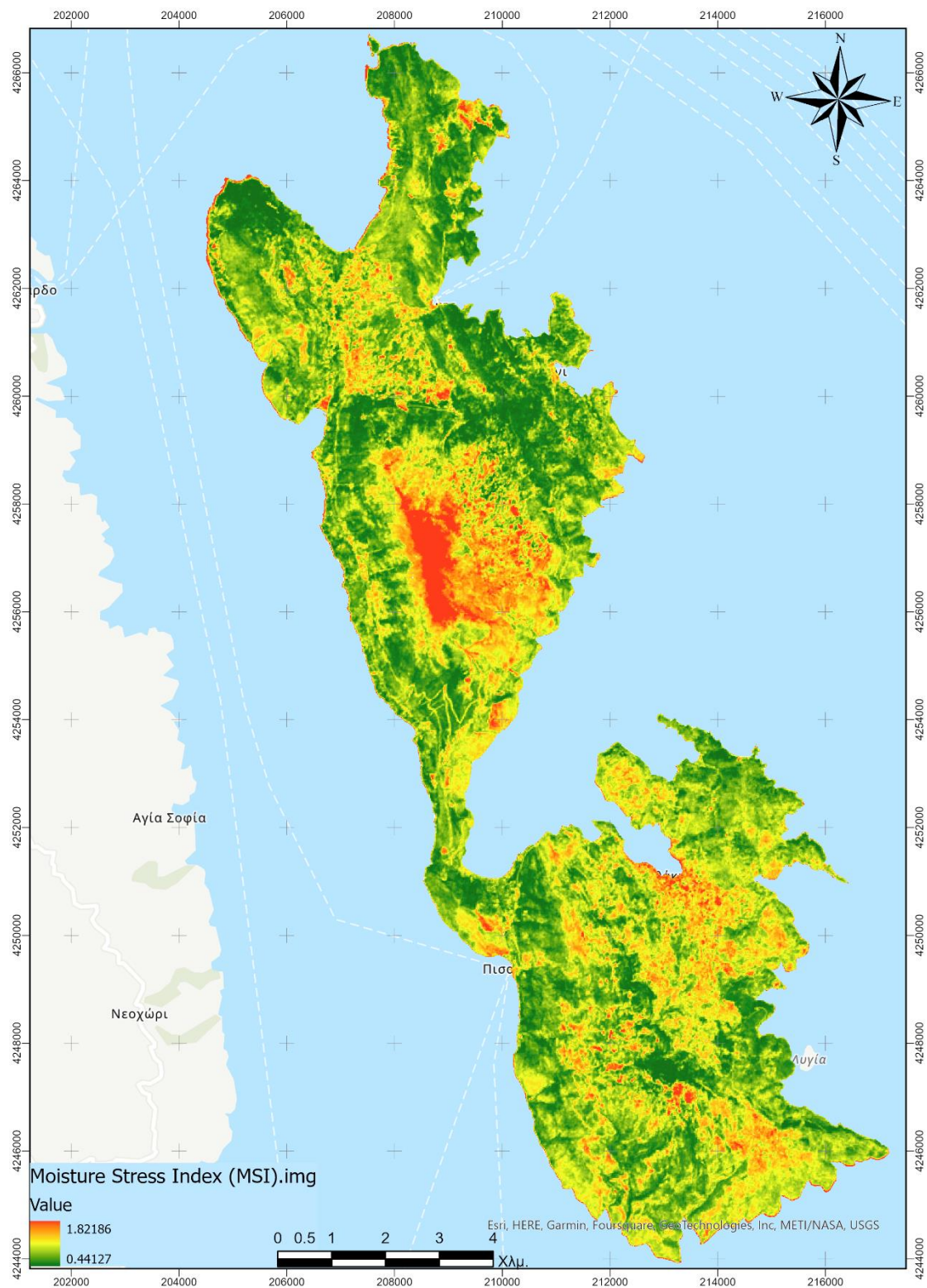
Εικόνα 8. Normalised Difference Moisture Index 16/8/2022



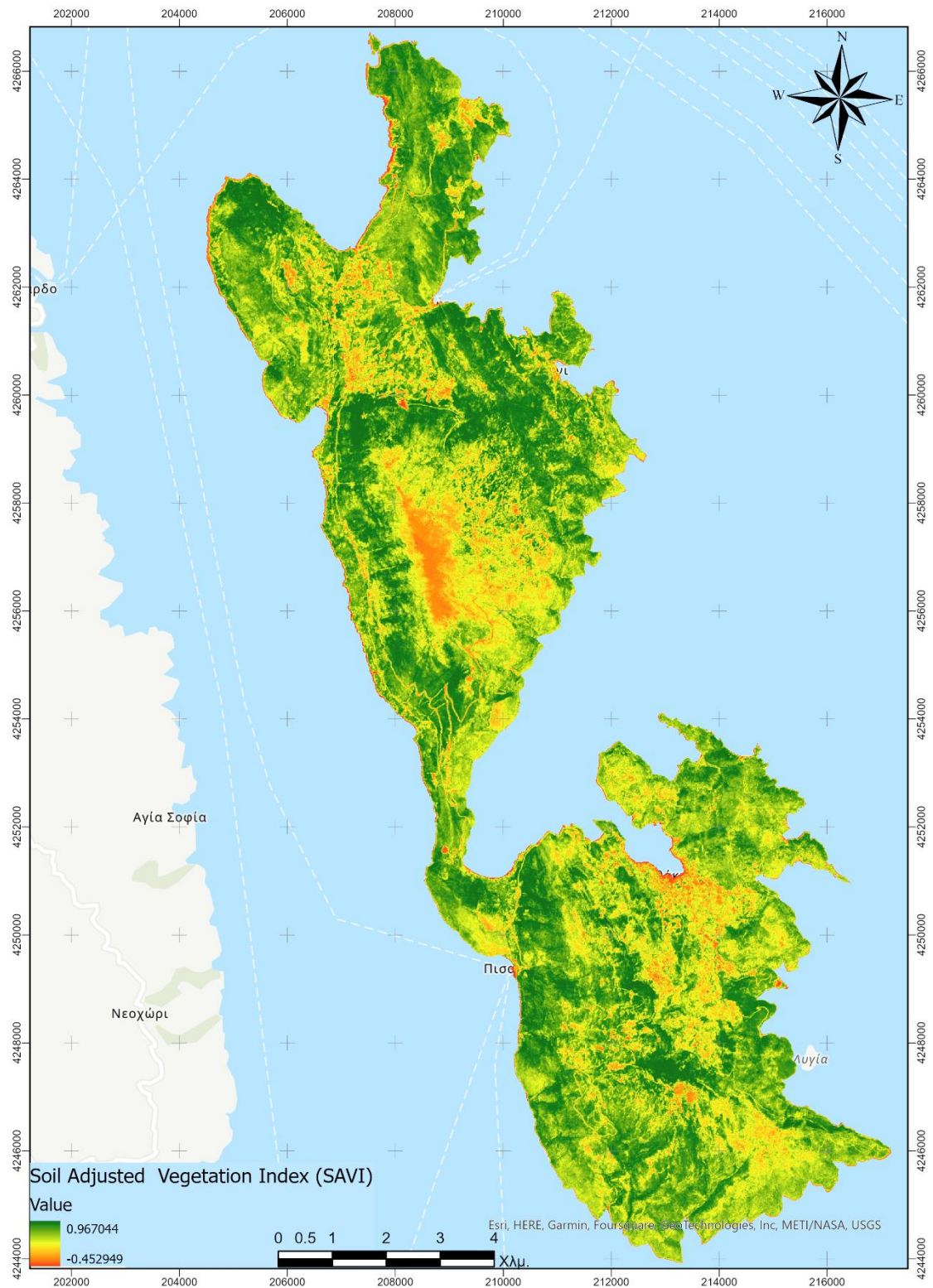
Εικόνα 9. Normalised Difference Water Index 16/8/2022



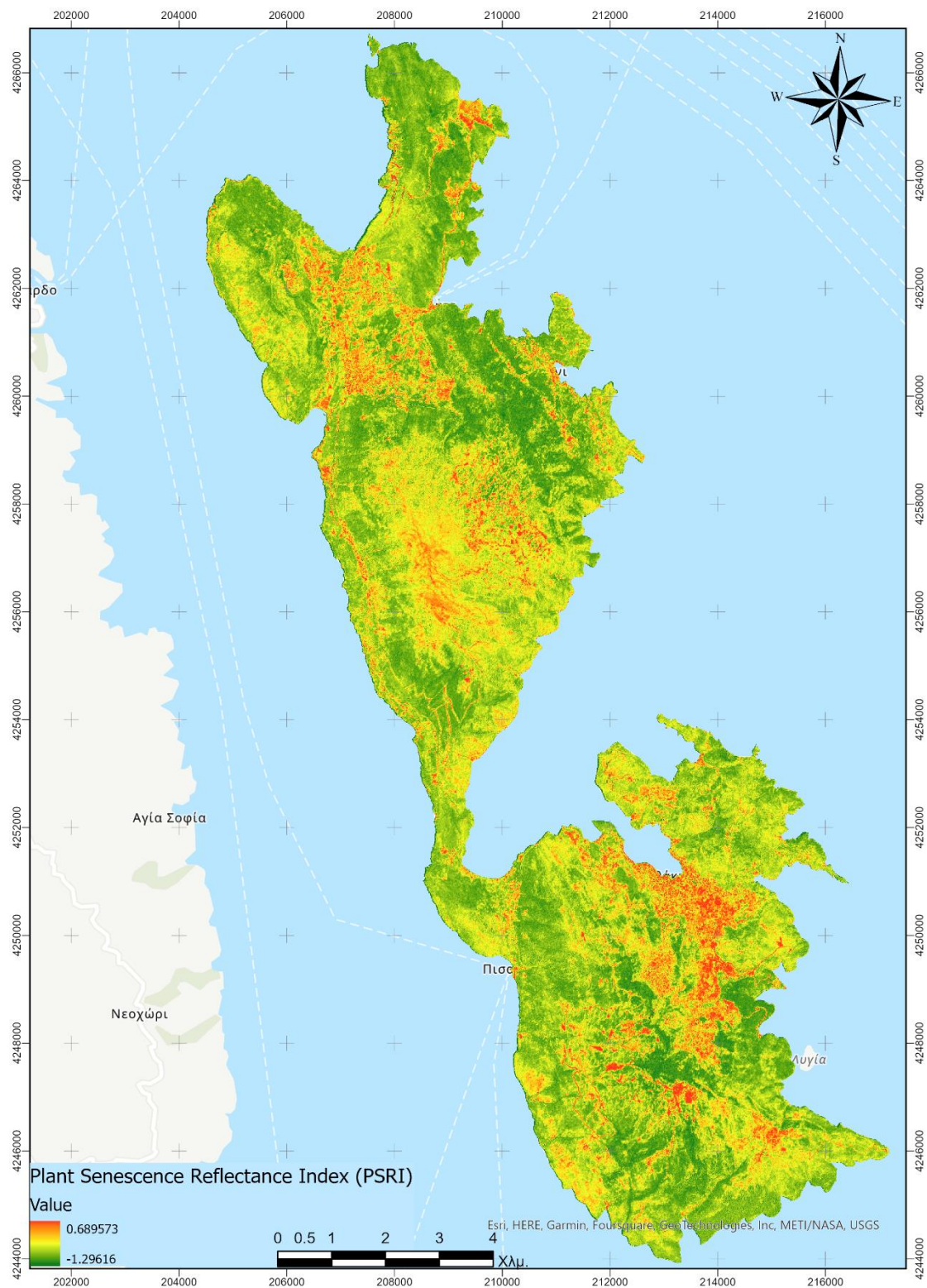
Εικόνα 10. Modified Anthocyanin Reflectance Index 16/8/2022



Εικόνα 11. Moisture Stress Index 16/8/2022



Εικόνα 12. Soil Adjusted Vegetation Index 16/8/2022

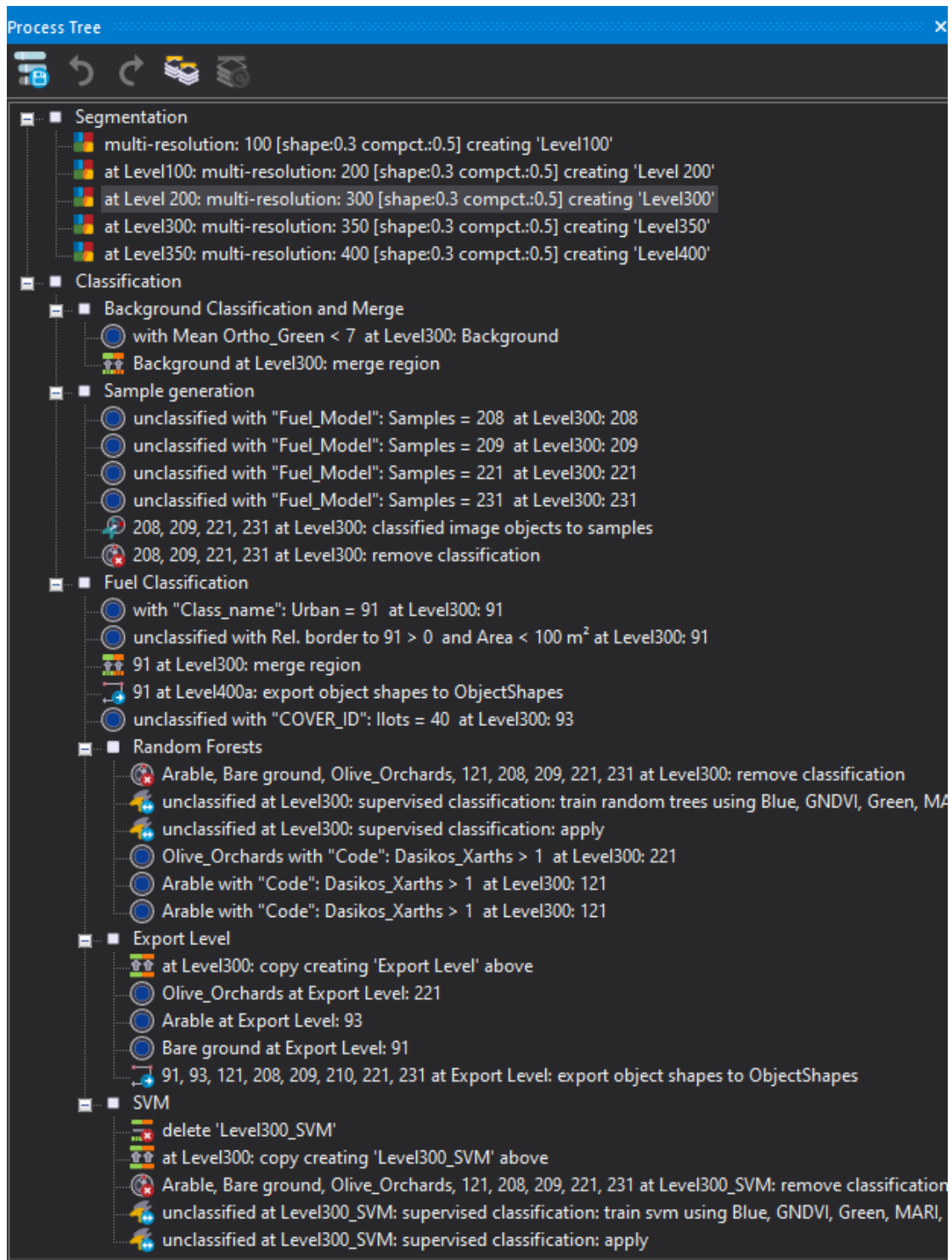


Εικόνα 13. Plant Senescence Reflectance Index 16/8/2022

Η διαδικασία ταξινόμησης υποβοηθήθηκε εκτός από τα δεδομένα πεδίου, που συλλέχθηκαν με τον τρόπο που περιεγράφηκε παραπάνω και από μια αεροφωτογραφία πολύ υψηλής χωρικής ανάλυσης (0,25μ) έτους λήψης 2015, η οποία επέτρεψε την επιλογή επιπλέον δεδομένων εκπαίδευσης και επαλήθευσης της διαδικασίας της ταξινόμησης. Επιλέχθηκε μια τιμή *scale parameter 300*, χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση δοκιμής και λάθους και επιθεωρώντας οπτικά τα αποτελέσματα, για τη δημιουργία ομοιογενών αντικειμένων με βάση τα φασματικά χαρακτηριστικά που περιλαμβάνονται στη διαδικασία τμηματοποίησης. Ο συνολικός αριθμός των αντικειμένων που δημιουργήθηκαν ήταν 28.013 με μέσο μέγεθος 0,34 ha, ελάχιστο 0,01 ha, μέγιστο 48,75 ha και τυπική απόκλιση 0,57 ha. Αυτά τα αντικείμενα αντιπροσωπεύουν ομοιογενείς περιοχές και αποτελούν τη βασική μονάδα ταξινόμησης.

Το πρώτο βήμα της ανάλυσης ήταν ο εντοπισμός των περιοχών που καλύπτονται από αστικές και άλλες δομημένες περιοχές. Αυτό έγινε στην βάση των φασματικών χαρακτηριστικών αλλά υποβοηθήθηκε και από οπτική φωτοερμηνεία. Τα δεδομένα *lots* που χρησιμοποιήθηκαν επιπρόσθετα δυστυχώς δεν βοήθησαν αρκετά γιατί οι αστικές ζώνες σε αυτά έχουν μάλλον υποεκτιμηθεί. Για την αναγνώριση των υπολοίπων καλύψεων γης και στη συγκεκριμένη περίπτωση των μοντέλων καύσιμης ύλης δοκιμάστηκαν οι ταξινομητές *Classification Trees (CART)*, *Support Vector Machines (SVM)* και *Random Forests (RF)*, όλοι ενσωματωμένοι στο *eCognition*, στον προσδιορισμό των επιλεγμένων κατηγοριών. Η αξιολόγηση της απόδοσης κάθε ταξινομητή, έγινε με βάση την αποτελεσματικότητα στην αναπαραγωγή των δεδομένων εκπαίδευσης. Ο αλγόριθμος ταξινόμησης *Random Forests* (Breiman, 2001) βρέθηκε να είναι ο πιο ακριβής και χρησιμοποιήθηκε για την τελική ταξινόμηση. Ο ταξινομητής *RF* είναι μια μη παραμετρική τεχνική μηχανικής μάθησης που αποτελείται από ένα σύνολο δέντρων ταξινόμησης. Κάθε δέντρο είναι χτισμένο με βάση ένα τυχαίο υποσύνολο δεδομένων εκπαίδευσης και ένα τυχαίο υποσύνολο μεταβλητών πρόβλεψης. Οι μεταβλητές που εμφανίζονται πιο συχνά στο σύνολο είναι αυτές με την υψηλότερη διαχωριστική ικανότητα. Ομοίως, κάθε δέντρο προβλέπει τη συμπερίληψη ενός δείγματος εκπαίδευσης σε μια τάξη. Η κατηγορία που προβλέπεται από το τελικό μοντέλο είναι αυτή που προβλέπεται από τον μεγαλύτερο αριθμό μεμονωμένων δέντρων. Η ελάχιστη μονάδα χαρτογράφησης ορίστηκε στα 0,25 εκτάρια και έγιναν διάφορες βελτιώσεις ταξινόμησης προκειμένου να αποφευχθούν μεμονωμένα μικρά πολύγωνα στον τελικό χάρτη ταξινόμησης. Η τελική ακρίβεια ταξινόμησης υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας μια *Error Matrix* σε ένα ανεξάρτητο σύνολο 218 σημείων, που ορίστηκε τυχαία σε όλη την περιοχή μελέτης, όπου ο τύπος κάλυψης εδάφους επαληθεύτηκε στο πεδίο με απλό οπτικό έλεγχο.

Ο αλγόριθμος και οι κανόνες ταξινόμησης που χρησιμοποιήθηκαν στο παραδοτέο εμφανίζονται στην εικόνα 14.



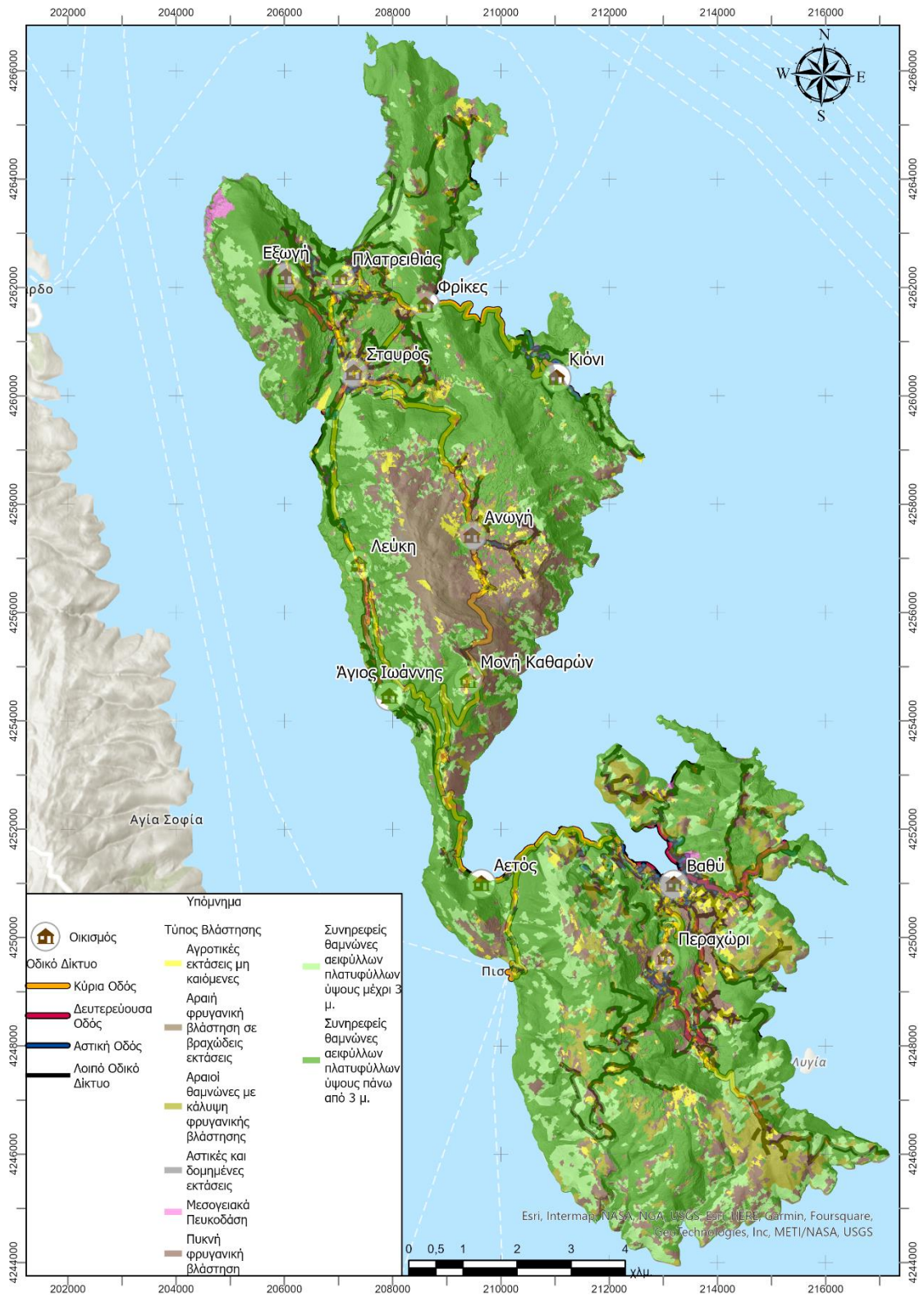
Εικόνα 14. Αλγόριθμος υλοποίησης της ταξινόμησης σε μοντέλα καύσιμης ύλης

Από την διαδικασία της ταξινόμησης προέκυψαν συνολικά οκτώ μοντέλα καύσιμης ύλης (βιομάζας), συμπεριλαμβανομένων των αστικών και γυμνών εκτάσεων καθώς και των αρόσιμων και αρδευόμενων εκτάσεων που δεν έχουν δυναμικό καύσης. Οι εκτάσεις αυτές καλύπτουν ένα μικρό μόνο μέρος της περιοχής περίπου 3.5%. Οι σημαντικότερες αγροτικές εκτάσεις του νησιού καλύπτονται από ελαιώνες, οι οποίοι αν και θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως μη καιόμενες εκτάσεις, εν τούτοις η πρόσφατη εμπειρία έχει αναδείξει ότι οι ελαιώνες δυστυχώς αποτελούν πολύ συχνά τμήμα της καμένης έκτασης, ενώ αποτελούν και διάδρομο μεταφοράς της πυρκαγιάς μεταξύ δασικών εκτάσεων. Για το λόγω αυτό οι πυκνοί ελαιώνες της περιοχής συμπεριλήφθηκαν στο μοντέλο βιομάζας και καύσιμης ύλης 221 που περιγράφεται παραπάνω.

Τα ποσοστά κάλυψης της βλάστησης (βιομάζας) της περιοχής παρουσιάζονται στον πίνακα 4 και το αποτέλεσμα χαρτογράφησης της βλάστησης και καύσιμης ύλης αποτυπώνεται στην εικόνα 15. Η συνδυαστική χρήση των εικόνων *Sentinel 1*, αν και βελτίωσε την ακρίβεια της ταξινόμησης μόνο κατά 3.7%, εν τούτοις θεωρείται ένα σημαντικό ποσοστό βελτίωσης δεδομένης της πολυπλοκότητας του νησιού που προκύπτει από το ανάγλυφό του.

Πίνακας 4. Εκτάσεις και ποσοστά κάλυψης τύπων βλάστησης και καύσιμης ύλης.

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης	Περιγραφή Βλάστησης	Έκταση (Ha)	Ποσοστό κάλυψης (%)
91	Αστικές και δομημένες εκτάσεις	210.04	2.2
93	Αγροτικές εκτάσεις μη καιόμενες	337.38	3.5
121	Αραιή φρυγανική βλάστηση σε βραχώδεις εκτάσεις	352.57	3.7
208	Συνηρεφείς θαμνώνες αιφύλλων πλατυφύλλων ύψους μέχρι 3 μ.	1446.43	15.1
209	Συνηρεφείς θαμνώνες αιφύλλων πλατυφύλλων ύψους πάνω από 3 μ.	5258.20	54.9
210	Μεσογειακά Πευκοδάση	22.94	0.2
221	Πυκνή φρυγανική βλάστηση	1281.53	13.4
231	Αραιοί θαμνώνες με κάλυψη φρυγανικής βλάστησης	676.76	7.1
ΣΥΝΟΛΟ		9585.84	100



Εικόνα 15. Χαρτογραφική αποτύπωση τύπων βλάστησης – βιομάζας στο νησί της Ιθάκης

3. Προσομοίωση δασικών πυρκαγιών και εκτίμηση κινδύνου πυρκαγιάς υπό διαφορετικά σενάρια κλιματικών συνθηκών

Ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία στα χέρια του διαχειριστή δασικών οικοσυστημάτων είναι τα μοντέλα προσομοίωσης που υπάρχουν σήμερα στη διάθεση του και του επιτρέπουν να γνωρίζει την πιθανή συμπεριφορά και εξέλιξη μιας ενδεχομένης πυρκαγιάς κάνοντας βέβαια μια σειρά από υποθέσεις και παραδοχές σε ότι αφορά τις συνθήκες εκδήλωσης μιας πυρκαγιάς. Τα διάφορα συστήματα προσομοίωσης που υπάρχουν σήμερα ενσωματώνουν μια σειρά από μοντέλα που έχουν παρουσιαστεί στη διεθνή βιβλιογραφία και αφορούν της ταχύτητα εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς, την ένταση της, το σχήμα της, την πιθανότητα εναέριας εξάπλωσης της (από καύτρες) καθώς και μια σειρά από άλλες παραμέτρους της συμπεριφοράς μιας δασικής πυρκαγιάς.

Αν και θα πρέπει να τονιστεί ότι τα μοντέλα προσομοίωσης παρουσιάζουν μια στρογγυλοποίηση της πραγματικής κατάστασης και ως τέτοια θα πρέπει να ερμηνεύονται η εφαρμογή τους, ωστόσο, προσφέρει μια σειρά από δεδομένα, είτε με τη μορφή γεωγραφικών δεδομένων, είτε με τη μορφή πινάκων και διαγραμμάτων που είναι εξαιρετικά χρήσιμα στον διαχειριστή τόσο για την αντιμετώπιση μιας κρίσης όσο κυρίως για τη δημιουργία εκ των προτέρων συνθηκών για τον έλεγχο μιας ενδεχόμενης κρίσης. Κάποια από τα σημαντικότερα αποτελέσματα αυτών των μοντέλων αφορούν την ταχύτητα εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς, την έντασή της, την πιθανότητα εναέριας μετάδοσης, το χρονικό περιθώριο μέχρι μια πυρκαγιά να φτάσει σε κάποιες θέσεις με ιδιαίτερη σημασία (κατοικημένες περιοχές, κτίρια, εγκαταστάσεις), την πιθανότητα εκδήλωσης μεγάλης έντασης πυρκαγιάς σε κάποιες θέσεις λόγω των ιδιαιτεροτήτων τους σε ότι αφορά την καύσιμη ύλη και την τοπογραφία, την αποτελεσματικότητα των μέσων κατάσβεσης και άλλα που θα συζητηθούν παρακάτω.

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα που έχει η χρήση μοντέλων προσομοίωσης των δασικών πυρκαγιών είναι η δυνατότητα ανάπτυξης διαφόρων σεναρίων αναφορικά με τις συνθήκες εκδήλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς. Τα σενάρια αυτά, που θα προκύπτουν μέσα από την ιστορική ανάλυση των δασικών πυρκαγιών στην περιοχή μελέτης, μπορεί να αφορούν το πιθανό σημείο έναρξης μιας πυρκαγιάς, τις καιρικές συνθήκες κατά την εκδήλωση μιας πυρκαγιάς την εξέλιξη της πυρκαγιάς με διαφοροποιημένες συνθήκες καύσιμης ύλης, είτε ακόμη και εναλλακτικούς τρόπους καταστολής της.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης πραγματοποιήθηκε ανάλυση με το σύστημα προσομοίωσης *Flammap*, αφού αφορά τον σχεδιασμό της πρόληψης των δασικών πυρκαγιών μέσα από τον εντοπισμό των πλέων επικίνδυνων περιοχών. Ωστόσο περιγράφονται και τα δύο συστήματα που έχουν εφαρμοστεί στην πράξη και τα αποτελέσματά τους κρίνονται ακριβής και αξιόπιστα: το σύστημα **FARSITE** (*Fire Area Simulator*) και το σύστημα **FLAMMAP**.

3.1. FARSITE-Fire Area Simulator

Το σύστημα FARSITE (Finney, 1998) βασίζεται στο μοντέλο συμπεριφοράς της φωτιάς του Rothermel (1972) και είναι ένα δισδιάστατο σύστημα προσομοίωσης το οποίο υπολογίζει τη συμπεριφορά και εξέλιξη μιας πυρκαγιάς τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο κάτω από ανομοιογενείς συνθήκες τόσο σε ότι αφορά τον τύπο και την δομή της καύσιμης ύλης όσο και των τοπογραφικών και καιρικών συνθηκών κατά τη διάρκεια εκδήλωσης μιας πυρκαγιάς. Προσφέρει δηλαδή τη δυνατότητα προσομοίωσης κάτω από συνθήκες που ανταποκρίνονται στην πραγματικές συνθήκες μιας περιοχής, καθώς και τη δυνατότητα παρακολούθησης της εξέλιξης και συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς στο χρόνο, και αυτό είναι το βασικό του πλεονέκτημα σε σχέση με άλλα συστήματα προσομοίωσης. Ένα άλλο επίσης σημαντικό πλεονέκτημα τους συστήματος FARSITE είναι η δυνατότητα προσομοίωσης και του συστήματος καταστολής συμπεριλαμβάνοντας τόσο εναέρια όσο και επίγεια μέσα καθώς και διαφορετικές τακτικές κατάσβεσης.

Το συγκεκριμένο σύστημα προκειμένου να υπολογίσει τόσο την εξέλιξη της πυρκαγιάς όσο και τη συμπεριφορά της χρησιμοποιεί μια σειρά από μοντέλα συμπεριφοράς της φωτιάς που έχουν περιγραφεί στη διεθνή βιβλιογραφία και έχουν επικυρωθεί στην πράξη και αφορούν την ταχύτητα μετάδοσης έρπουσας πυρκαγιάς, την ταχύτητα μετάδοσης πυρκαγιάς κόμης, την πιθανότητα εναέριας μετάδοσης της πυρκαγιάς καθώς και άλλα που δεν κρίνεται σκόπιμο λόγω των πολύπλοκων τεχνικών τους χαρακτηριστικών να περιγράφουν στα πλαίσια της παρούσας. Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την χρήση του συγκεκριμένου συστήματος είναι:

- η χρονική εξέλιξη μιας πυρκαγιάς σε μορφή *vector* και με την χρονική ανάλυση που επιλέγει ο χρήστης
- Η ταχύτητα μετάδοσης της πυρκαγιάς σε μορφή *raster* για κάθε θέση στην οποία φτάνει η πυρκαγιά και με την χωρική ανάλυση που επιλέγει ο χρήστης,
- Την ένταση του μετώπου πυρκαγιάς σε όλες τις θέσεις σε μορφή *raster*
- Το ύψος της φλόγας σε όλες τις θέσεις σε μορφή *raster*

- Τον τύπο της πυρκαγιάς σε μορφή *raster*
- Το χρόνο άφιξης της φωτιάς σε όλες τις θέσεις σε μορφή *raster*
- Τα αποτελέσματα των προσπαθειών κατάσβεσης και την ανάπτυξη διαφορετικών σεναρίων σε ότι αφορά τόσο το σύνολο των μέσων που χρησιμοποιούνται αλλά και την τακτική αντιμετώπισης

Η μέγιστη χωρική ανάλυση των αποτελεσμάτων που παράγονται σε μορφή *raster* καθορίζεται από την αντίστοιχη ανάλυση των χωρικών δεδομένων που εισάγονται στο σύστημα και τα οποία θα συζητηθούν παρακάτω.

Εκτός όμως από τα γεωγραφικά δεδομένα παράγονται και μια σειρά πινάκων και γραφημάτων που αφορούν το σύνολο της καμένης έκτασης σε κάθε χρονική στιγμή το σύνολο των ανεξάρτητων εστιών κατά την εξέλιξη της πυρκαγιάς, την περίμετρο της σε κάθε χρονική στιγμή κ.ά.

Γίνεται επομένως εύκολα αντιληπτό ότι το σύστημα *FARSITE* είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στην οργάνωση της αντιπυρικής προστασίας μιας περιοχής για δυο κυρίως λόγους. Πρώτον για την εκ των προτέρων γνώση της πιθανής εξέλιξης και συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς σε σχέση τόσο με το πιθανό σημείο έναρξης αλλά και με τις πιθανές επικρατούσες καιρικές συνθήκες κατά την εκδήλωσή της, όπως θα προκύψουν από την ιστορική ανάλυση των σχετικών δεδομένων αλλά και από τις προβλεπόμενες καιρικές συνθήκες για την περίοδο προσομοίωσης. Επίσης είναι ιδιαίτερα χρήσιμο και για την αντιμετώπιση κρίσεων σε πραγματικό χρόνο αφού μπορεί να προσφέρει στοιχεία πολύτιμα για τη λήψη αποφάσεων που αφορούν π.χ. τον τρόπο και τα μέσα καταστολής, την πιθανή εκκένωση κατοικημένων περιοχών, την προστασία κάποιων χώρων με ιδιαίτερη σημασία, την εξασφάλιση ασφαλών σημείων διαφυγής κ.ά.

3.2. FLAMMAP

Το σύστημα προσομοίωσης *Flammap* (Stratton, 2004; Finney, 2006) σε αντίθεση με το προηγούμενο είναι ένα μονοδιάστατο μοντέλο που υπολογίζει την συμπεριφορά της φωτιάς στο χώρο και όχι στον χρόνο θεωρώντας ότι το σύνολο της έκτασης θα καεί σε μια ενδεχόμενη πυρκαγιά. Οι υπολογισμοί γίνονται για κάθε σημείο (*pixel*) της περιοχής ξεχωριστά και ανεξάρτητα από τη συμπεριφορά της φωτιάς στα γειτονικά σε αυτό σημεία. Τα γεωγραφικά δεδομένα που χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό της συμπεριφοράς της φωτιάς είναι τα ίδια με αυτά του συστήματος *Farsite*, ενώ τα καιρικά δεδομένα διατηρούνται σταθερά. Επιπλέον απαιτούνται δεδομένα που αφορούν την υγρασία της καύσιμης ύλης, όμοια με αυτά του *Farsite*, τα οποία μπορεί να είναι επίσης σταθερά ή να προσαρμόζονται

(μόνο η υγρασία της νεκρής καύσιμης ύλης) με βάση κάποιες προκαθορισμένες καιρικές συνθήκες,

Τα σημαντικότερα αποτελέσματα της προσομοίωσης με την χρήση του συγκεκριμένου συστήματος είναι:

- Η ταχύτητα μετάδοσης της πυρκαγιάς σε μορφή *raster* για κάθε θέση της περιοχής,
- Η ένταση της φωτιάς για κάθε θέση της περιοχής σε μορφή *raster*
- Το ύψος της φλόγας σε κάθε θέση της περιοχής σε μορφή *raster*
- Η εκλυόμενη ενέργεια σε κάθε θέση της περιοχής σε μορφή *raster*
- Τον τύπο της πυρκαγιάς σε μορφή *raster*

Από την σύγκριση των παραπάνω μοντέλων προκύπτει ο αλληλοσυμπληρωματικός τους ρόλος, Έτσι ενώ το σύστημα *Farsite* παρέχει γεωγραφικά και μη δεδομένα για την πιθανή εξέλιξη και συμπεριφορά της φωτιάς στο χώρο και στο χρόνο, υπό μεταβαλλόμενες στο χρόνο καιρικές συνθήκες, και είναι χρήσιμο για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, το σύστημα *Flammap* παρέχει γεωγραφικά δεδομένα για την πιθανή συμπεριφορά της φωτιάς σε όλες τις θέσεις της περιοχής, για σταθερές κλιματικές συνθήκες, μη λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες που επικρατούν κατά την στιγμή που μια πυρκαγιά φτάνει σε κάποιο σημείο της έκτασης, Έτσι το σύστημα *Farsite* μπορεί σε κάποιες θέσεις να υπολογίσει χαμηλής έντασης πυρκαγιά, που μπορεί να οφείλεται στην χαμηλή ένταση του ανέμου κατά την στιγμή άφιξης της πυρκαγιάς ενώ σε κάποιες άλλες θέσεις να υπολογίσει υψηλότερης έντασης και ταχύτητας πυρκαγιά η οποία να οφείλεται στις μεγάλης έντασης καιρικές συνθήκες τη συγκεκριμένη στιγμή, ενώ μπορεί η πραγματική δυναμική της καύσιμης ύλης υπό παρόμοιες συνθήκες να είναι αντίστροφη.

Τα αποτελέσματα επομένως της προσομοίωσης με το σύστημα *Flammap* είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για την αναγνώριση θέσεων με ιδιαίτερα υψηλή ευφλεκτότητα, για τη σύγκριση της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς πριν και μετά από παρεμβάσεις διαχείρισης της καύσιμης ύλης, καθώς και γενικότερα για την ιεράρχηση προτεραιοτήτων σε ότι αφορά τις μελλοντικές παρεμβάσεις που θα οδηγήσουν σε συνθήκες ελέγχου των δασικών πυρκαγιών στην περιοχή μελέτης (Stratton, 2004). Για το λόγο αυτό στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε μόνο η προσομοίωση με το σύστημα *Flammap* καθώς επιτρέπει αφενός την εκτίμηση ρίσκου πυρκαγιάς για κάθε σημείο της περιοχής μελέτης, αφετέρου τον εντοπισμό θέσεων υψηλότερου ρίσκου και επομένως ανάγκης άμεσης παρέμβασης και λήψης μέτρων.

3.3. Συλλογή και δημιουργία Γεωγραφικών δεδομένων

Προκειμένου να εφαρμοστούν τα μοντέλα προσομοίωσης και για να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή τόσο χωρική όσο και χρονική εκτίμηση της εξέλιξης μιας πυρκαγιάς απαιτούνται μια σειρά από γεωγραφικά δεδομένα που συνθέτουν το πεδίο εκδήλωσης μια πυρκαγιάς (*Firescape*). Οι βασικότεροι παράμετροι που συνθέτουν το πεδίο εκδήλωσης μιας πυρκαγιάς και είναι αυτοί που επηρεάζουν την συμπεριφορά και εξέλιξή της, είναι η σύνθεση και η δομή της καύσιμης ύλης και η τοπογραφία της περιοχής μελέτης.

Εκτός όμως από αυτά τα γεωγραφικά δεδομένα υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς, οι οποίοι δεν αποτυπώνονται απαραίτητα σε γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, και αφορούν τις καιρικές συνθήκες εκδήλωσης μιας πυρκαγιάς όπως και τις συνθήκες υγρασίας της καύσιμης ύλης, καθώς αυτή επηρεάζεται από την εποχή εκδήλωσης μιας πυρκαγιάς.

Για κάθε περιοχή μελέτης θα πρέπει να αναζητηθούν ή να δημιουργηθούν τα παρακάτω γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών σε μορφή *raster* τα οποία είναι απαραίτητα και για τα δυο συστήματα προσομοίωσης που περιεγράφηκαν παραπάνω. Τα γεωγραφικά αυτά δεδομένα θα πρέπει να καλύπτουν ακριβώς την ίδια έκταση, να έχουν ίδιο σύστημα συντεταγμένων και να έχουν την ίδια χωρική ανάλυση,

- Ψηφιακό μοντέλο καύσιμης ύλης,
- Ψηφιακό μοντέλο υψομέτρων,
- Ψηφιακό μοντέλο κλίσεων,
- Ψηφιακό μοντέλο εκθέσεων,
- Ψηφιακό μοντέλο πυκνότητας ανωρόφου,
- Ψηφιακό μοντέλο πυκνότητας κόμης,
- Ψηφιακό μοντέλο ύψους ανωρόφου,
- Ψηφιακό μοντέλο ύψους έναρξης κόμης,

3.3.1. Ψηφιακό Μοντέλο καύσιμης ύλης,

Το μοντέλο καύσιμης ύλης, που αποτελούν ίσως και την σημαντικότερη παράμετρο στην διαδικασία της προσομοίωσης, χαρτογραφήθηκαν για την περιοχή του νησιού της Ιθάκης, με τον τρόπο που περιεγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Το κάθε *pixel* έχει μια τιμή που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο τύπο καύσιμης ύλης, ανάλογα με τις φυσικοχημικές ιδιότητες του και τη δομή της βλάστησης και της οργανικής βιομάζας που υπάρχει στη συγκεκριμένη θέση.

Τα στοιχεία που συνθέτουν και περιγράφουν έναν τύπο καύσιμης ύλης είναι τα παρακάτω,

- Το συνολικό φορτίο σε λεπτή, μεσαία και αδρή νεκρή βιομάζα καθώς και το συνολικό φορτίο σε λεπτή ζωντανή βιομάζα (<0,6cm) διαχωρισμένη σε φυλλώδη και ξυλώδη, Το φορτίο σε νεκρό υλικό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην εξέλιξη μιας πυρκαγιάς λόγω της υψηλής του ευφλεκτότητας και του μεγάλου ποσού ενέργειας που εκλύεται κατά την καύση του. Καθώς η ευφλεκτότητα της νεκρής καύσιμης ύλης εξαρτάται από το μέγεθος των συστατικών της, έχει επικρατήσει, για την εκτίμηση της συμπεριφοράς της φωτιάς, ο παρακάτω διαχωρισμός ανάλογα με την διάμετρο του υλικού:

- Λεπτό υλικό: διάμετρο 0-0,6cm
- Μεσαίο υλικό: διάμετρο 0,6-2,5cm
- Αδρό υλικό: διάμετρο 2,5-7,6 cm

Σε ότι αφορά τη ζωντανή βιομάζα αρκεί ο υπολογισμός του συνολικού φορτίου λεπτού υλικού (<0,6cm) διαχωρισμένου σε ξυλώδη και φυλλώδη, αφού αυτή η κατηγορία μεγέθους ζωντανής βιομάζας έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στη διαμόρφωση της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς.

- Εάν **ο τύπος καύσιμης ύλης** είναι δυναμικός ή στατικός. Ως στατικός θεωρείται ένας τύπος καύσιμης ύλης όπου η σχέση νεκρής και ζωντανής βιομάζας είναι σταθερή στη διάρκεια μιας περιόδου, ενώ ως δυναμικά θεωρούνται τα μοντέλα εκείνα στα οποία συνήθως συμμετέχει ποώδης βλάστηση σε μεγάλο βαθμό και η σχέση νεκρής και οργανικής βιομάζας δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της αντιτυρικής περιόδου,
- **Ο λόγος επιφάνειας/όγκου (cm^{-1})** για τη λεπτή νεκρή βιομάζα καθώς και για τη λεπτή ζωντανή βιομάζα διαχωρισμένη σε ξυλώδη και φυλλώδη, Η συγκεκριμένη σχέση είναι ένας σημαντικός δείκτης τόσο του ρυθμού καύσης όσο και της ευφλεκτότητας της καύσιμης ύλης, λόγω της επίδρασής της στη μεταφορά θερμότητας. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η σχέση τόσο γρηγορότερη είναι η μεταφορά της θερμότητας στο εσωτερικό της καύσιμης ύλης, άρα και ο ρυθμός καύσης του και συνεπώς η ένταση και η ταχύτητα εξάπλωσης της φωτιάς. Επίσης η σχέση αυτή καθορίζει και το ρυθμό αλλαγής της υγρασίας στην καύσιμη ύλη με αύξηση του ρυθμού όσο η σχέση αυτή μεγαλώνει.
- **Το συνολικό ύψος της επιφανειακής καύσιμης ύλης (cm)**. Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό δεν θα πρέπει να συγχέεται με το ύψος της συστάδας καθώς περιγράφει το ύψος της επιφανειακής καύσιμης ύλης το οποίο κατά κανόνα συντηρεί

και μεταδίδει την πυρκαγιά. Άλλωστε, για τον υπολογισμό της μετάδοσης μιας πυρκαγιάς κόμης χρησιμοποιούνται αλλά δεδομένα που περιγράφονται παρακάτω.

- **Η υγρασία της νεκρής καύσιμης ύλης** πέρα από την οποία δεν μπορεί να συντηρηθεί μια πυρκαγιά. Η παράμετρος αυτή αν και μπορεί να διαφέρει για κάποιους τύπους καύσιμης ύλης συνήθως κυμαίνεται από 15 έως 30%. Η διεθνής βιβλιογραφία προσφέρει αρκετά στοιχεία ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί η παράμετρος αυτή για διάφορους τύπους καύσιμης ύλης.
- Τέλος στην περιγραφή κάθε τύπου καύσιμης ύλης περιλαμβάνεται και **το συνολικό ποσό ενέργειας** που περιέχεται σε αυτή (kJ/kg), Η συγκεκριμένη παράμετρος διαφέρει ελάχιστα μεταξύ διαφορετικών τύπων βλάστησης, γι' αυτό και από πολλούς θεωρείται ως σταθερά. Για τους τύπους βλάστησης της Ελλάδος έχει υπολογιστεί γύρω στα 19000-20000 kJ/kg .

Θα πρέπει εδώ να τονιστεί ότι όλες οι παραπάνω παράμετροι που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της καύσιμης ύλης και για τη δημιουργία ψηφιακών μοντέλων καύσιμης ύλης δεν είναι οι μοναδικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς, Αντίθετα μια σειρά από παράγοντες όπως η συμμετοχή μετάλλων (πλην πυριτίου) στην καύσιμη ύλη, το συνολικό ποσοστό φωσφόρου και ασβεστίου καθώς και άλλοι παράγοντες που σχετίζονται με τις φυσικοχημικές ιδιότητες της καύσιμης ύλης έχουν αποδειχθεί ότι επηρεάζουν και την ευφλεκτότητα και το ρυθμό καύσης. Ωστόσο οι παράμετροι που περιγράφονται παραπάνω έχουν αποδειχθεί στη διεθνή βιβλιογραφία ως αρκετοί για την περιγραφή και τη διαφοροποίηση των διαφόρων τύπων καύσιμης ύλης.

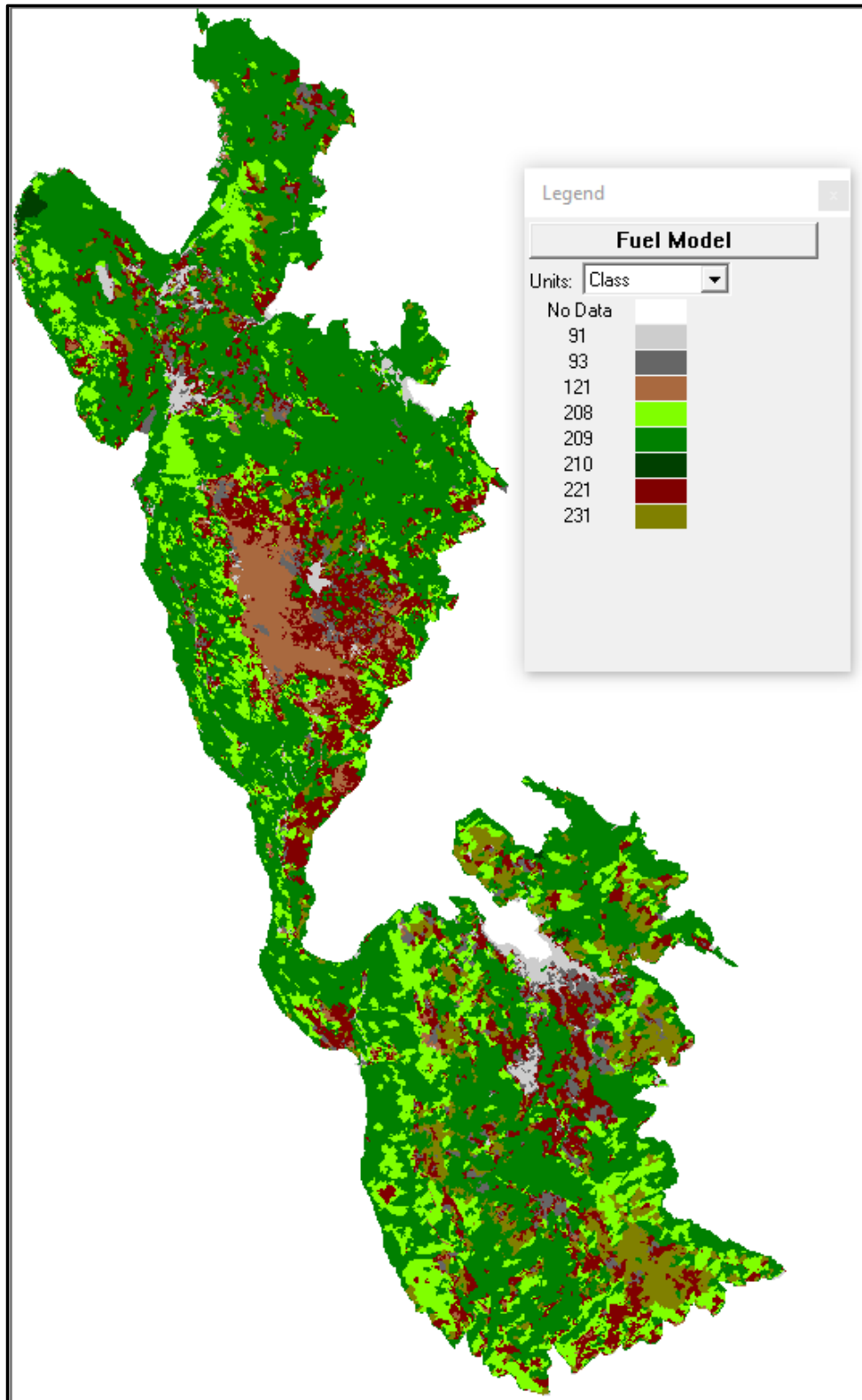
Τα μοντέλα καύσιμης ύλης που χρησιμοποιήθηκαν περιγράφονται παραπάνω και στην εικόνα 16 αποτυπώνεται ο τρόπος με τον οποίο εισάχθηκαν στο μοντέλο προσομοίωσης *Flammap*.

3.3.2. Τοπογραφικές συνθήκες της περιοχής μελέτης

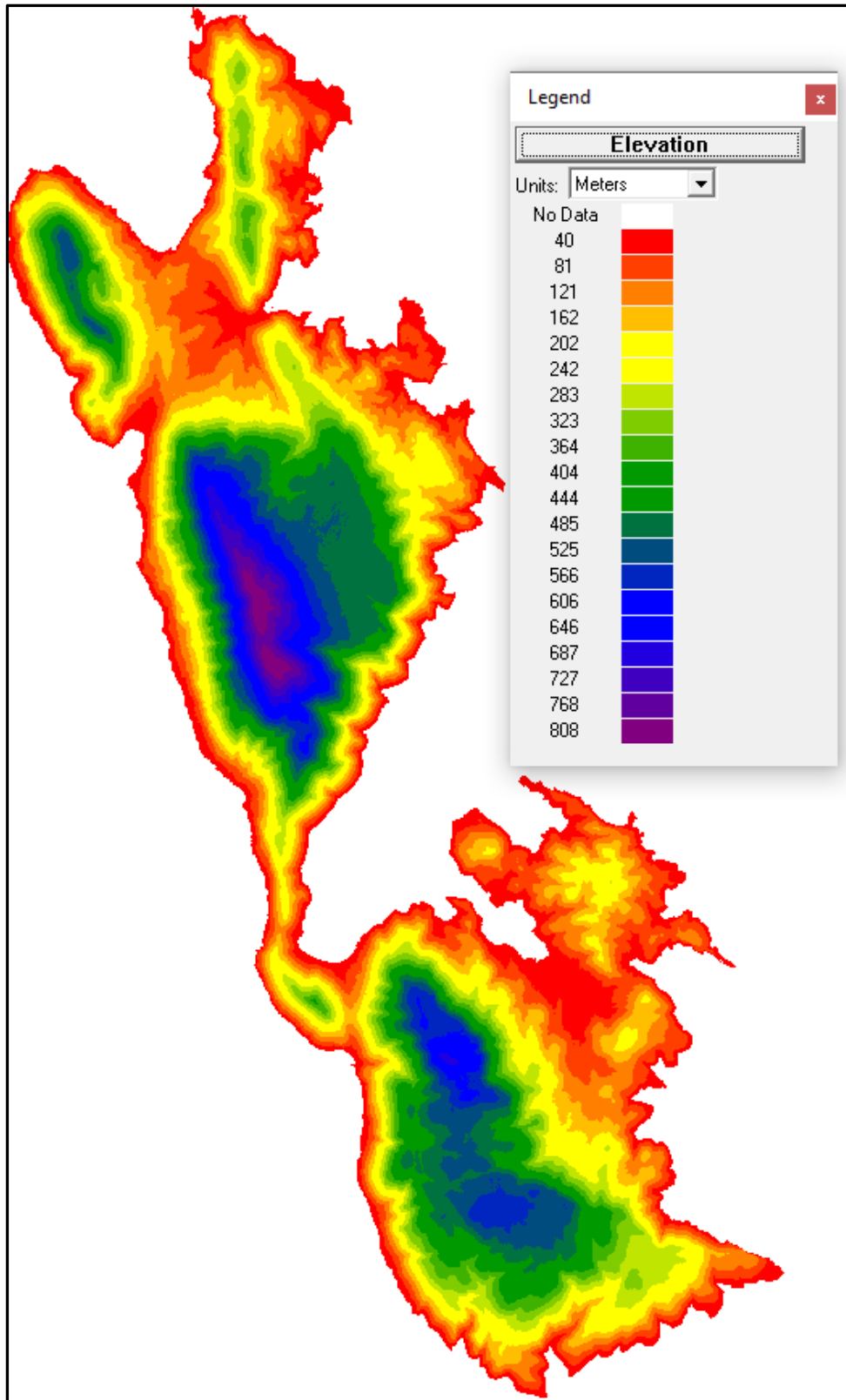
Η τοπογραφία μιας περιοχής παίζει καθοριστικό ρόλο τόσο στην εξέλιξη μιας πυρκαγιάς όσο και στην συμπεριφορά της και αυτό γιατί επηρεάζει τόσο την ταχύτητα μετάδοσης της θερμότητας στην προπορευόμενη βιομάζα, άρα και την ταχύτητα εξάπλωσης, όσο και τις συνθήκες υγρασίας της καύσιμης ύλης. Οι γενικότερες τάσεις είναι να μειώνεται η ταχύτητα εξάπλωσης όσο αυξάνει το υψόμετρο, λόγω αύξησης της υγρασίας στην καύσιμη ύλη, να αυξάνει η ταχύτητα μετάδοσης με την αύξηση της κλίσης και όσο η φωτιά κινείται προς τα ανάντη και να αυξάνεται η ταχύτητα μετάδοσης σε νότιες εκθέσεις όπου επικρατούν γενικότερα ξηρότερες συνθήκες.

Οι τοπογραφικές συνθήκες της περιοχής περιγράφονται μέσα από το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, το ψηφιακό μοντέλο κλίσεων και το ψηφιακό μοντέλο εκθέσεων. Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (*DEM*) που χρησιμοποιήθηκε έχει ανάλυση 2μ το οποίο υποβαθμίστηκε στα 10μ προκειμένου να εναρμονίζεται με την ανάλυση του ψηφιακού μοντέλου καύσιμης ύλης που προέκυψε από εικόνες *Sentinel-1,2* ανάλυσης 10μ. Οι εικόνες 17-19 αποτυπώνουν τα βασικά τοπογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής όπως εισήχθησαν στο λογισμικό προσομοίωσης.

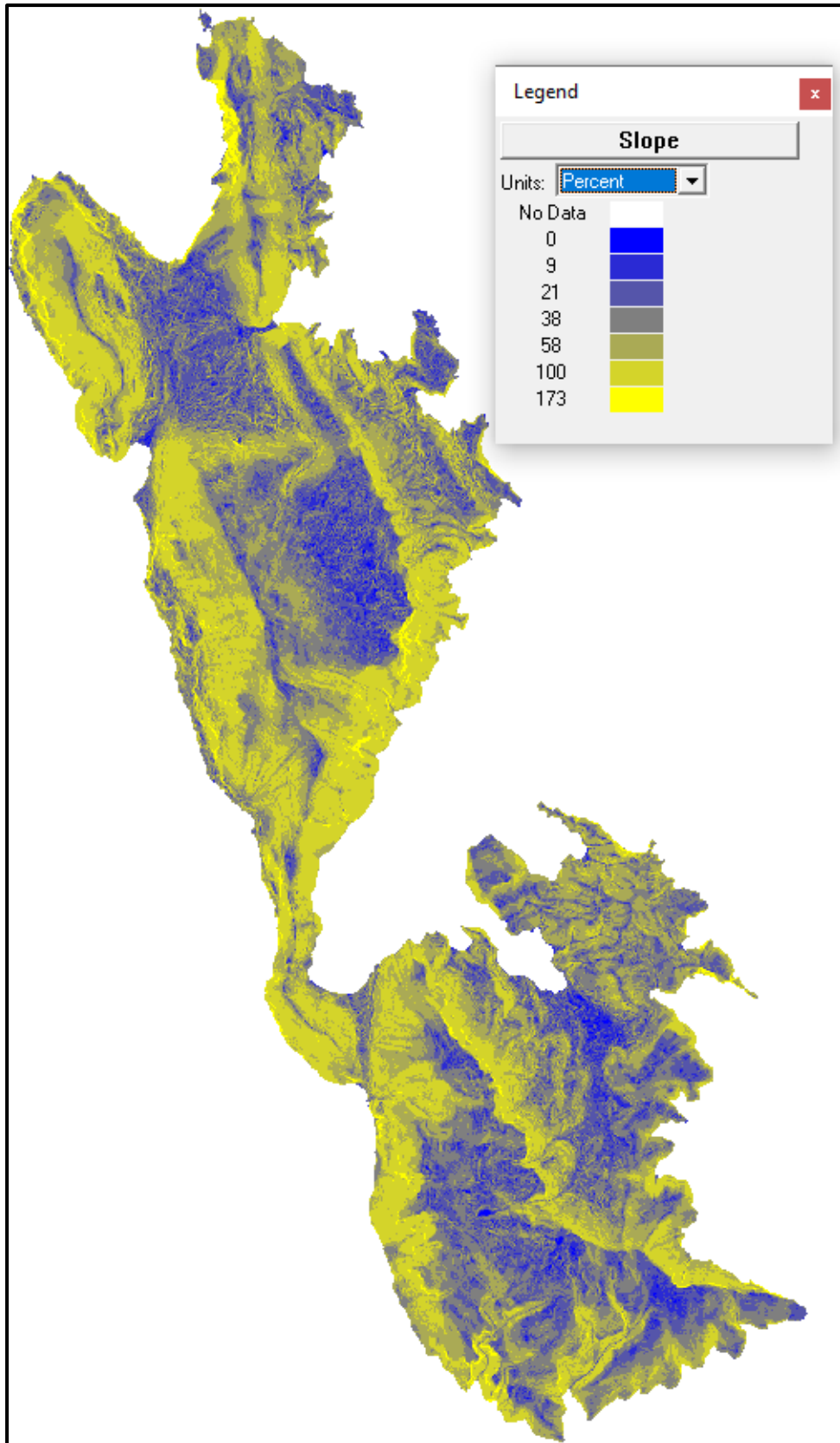




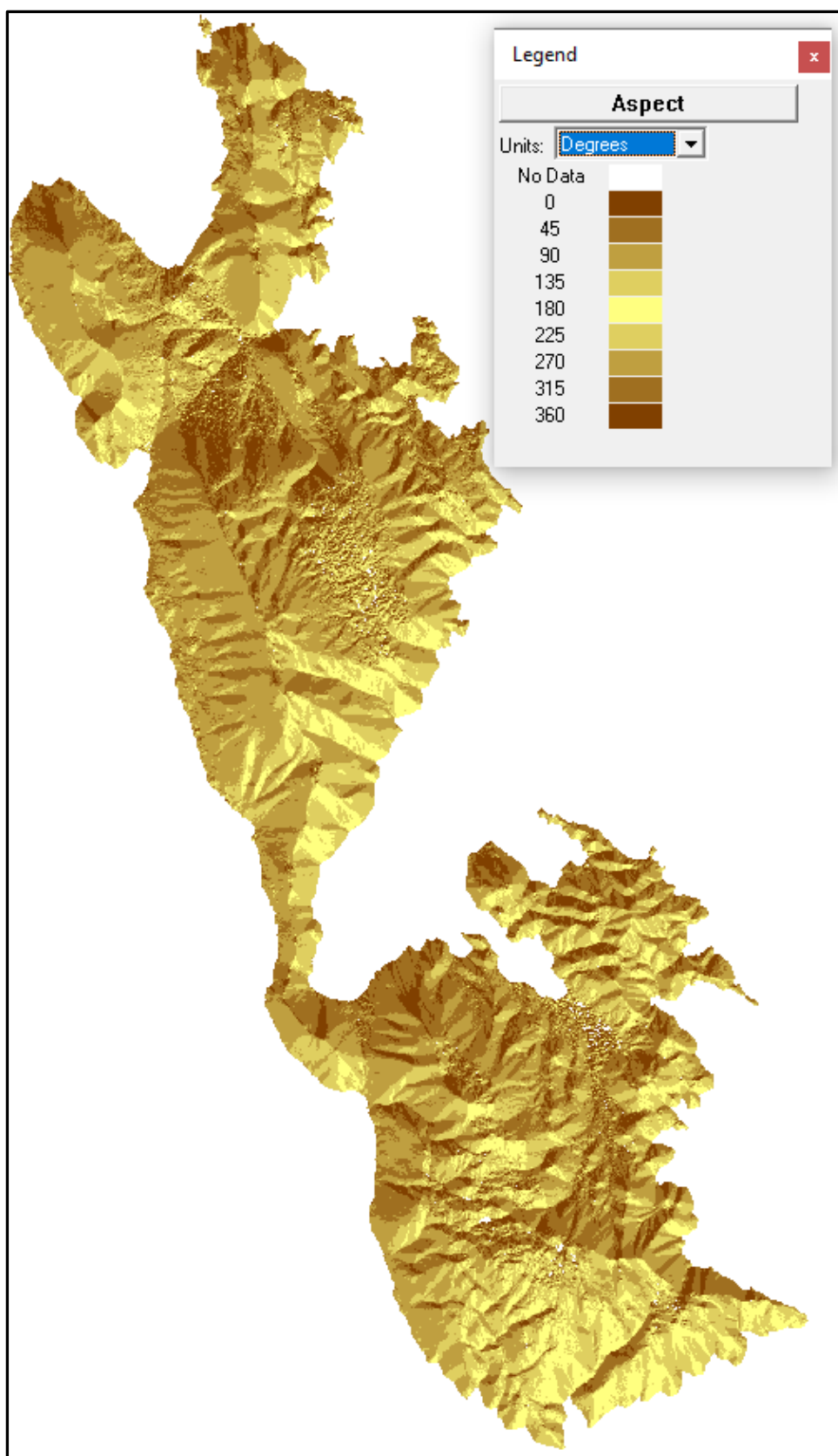
Εικόνα 16. Μοντέλα καύσιμης ύλης Ν. Ιθάκης



Εικόνα 17. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους Ν. Ιθάκης



Εικόνα 18. Ψηφιακό μοντέλο κλίσεων Ν. Ιθάκης Ν. Ιθάκης

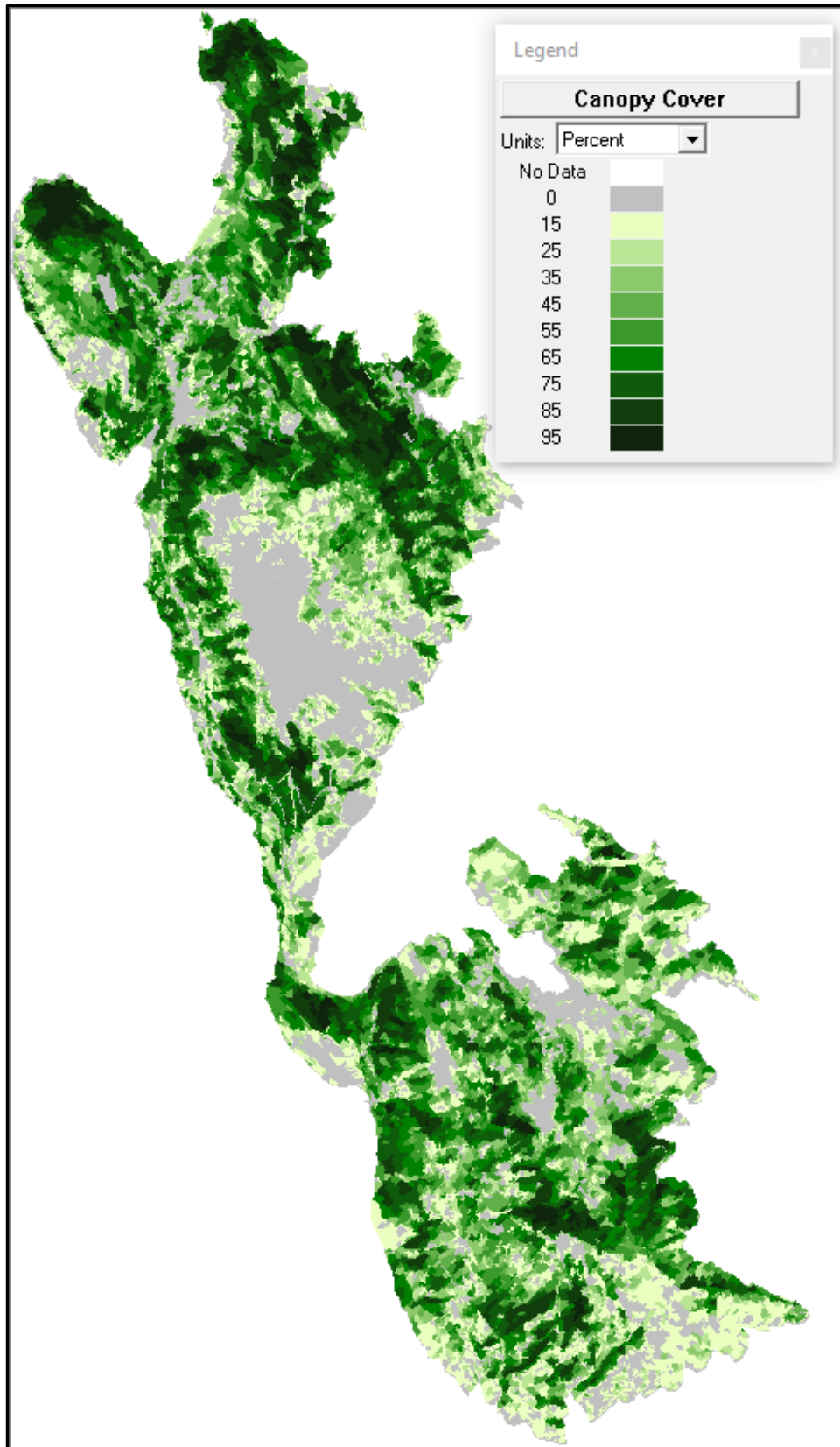


Εικόνα 19. Ψηφιακό μοντέλο εκθέσεων Ν. Ιθάκης

3.3.3. Ψηφιακό μοντέλο πυκνότητας ανωρόφου.

Η πυκνότητα του ανωρόφου είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην εκτίμηση της εξέλιξης και συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς. Ενώ η επιφανειακή καύσιμη ύλη που περιγράφηκε παραπάνω αποτελεί υπό κανονικές συνθήκες τον κύριο φορέα της πυρκαγιάς, η πυκνότητα της κόμης καθορίζει τις συνθήκες υγρασίας της επιφανειακής καύσιμης ύλης. Έτσι μια πιο ανοιχτή συγκόμωση, ακόμη και αν όλα τα υπόλοιπα δεδομένα της καύσιμης ύλης είναι ίδια θα οδηγήσει σε πυρκαγιές με μεγαλύτερη ταχύτητα εξάπλωσης και με μεγαλύτερη ένταση λόγω μειωμένης υγρασίας στην επιφανειακή καύσιμη ύλη. Η περιοχή μελέτης καλύπτεται από μακκία βλάστηση η οποία δεν χαρακτηρίζεται από την τυπική ορόφωση των υψηλών δασών. Ωστόσο η πυκνότητα της βλάστησης εξακολουθεί να αποτελεί μια θεμελιώδη παράμετρο στην διαδικασία της προσομοίωσης. Αν και θα μπορούσε αυτή να εκτιμηθεί με την χρήση των δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτύπωση της καύσιμης ύλης εν τούτοις χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα *Tree Cover Density* της βάσης δεδομένων *Copernicus*, τα οποία αποδόθηκαν ως μέση τιμή σε κάθε ένα από τα 28.013 πολύγωνα που δημιουργήθηκαν με την διαδικασία της κατάτμησης στο λογισμικό eCognition (Εικόνα 20).





Εικόνα 20. Ψηφιακό μοντέλο πυκνότητας ανωρόφου Ν. Ιθάκης

3.4. Προσομοίωση συμπεριφοράς δασικής πυρκαγιάς και εκτίμηση των βασικών παραμέτρων συμπεριφοράς.

Σκοπός της μελέτης είναι η εκτίμηση του κινδύνου πυρκαγιάς στην περιοχή και των παραμέτρων συμπεριφοράς της υπό διαφορετικές συνθήκες καύσης. Για το λόγο αυτό διαμορφώθηκαν έξι συνολικά σενάρια καύσης που αφορούν την επικρατούσα ένταση και διεύθυνση του ανέμου αλλά και της συνθήκης υγρασίας καύσιμης ύλης.

Τα έξι αυτά σενάρια είναι:

i. (15–315–Wet): Ταχύτητα ανέμου: 15 km/hr (περ. 3 Beaufort), Διεύθυνση ανέμου: 315°, Υγρασία καύσιμης ύλης ανά κλάση νεκρών καυσίμων μιας (1) ώρας, δέκα (10) και εκατό (100) ωρών 6%, 7% και 8% και 60% και 90% για ξυλώδη και ποώδη ζωντανά καύσιμα. Το σενάριο αυτό περιγράφει τις κατά κανόνα επικρατούσες συνθήκες στο νησί της Ιθάκης, με σχετικά ήπιους ανέμους ΒΔ κατεύθυνσης και με αρκετή υγρασία στην καύσιμη ύλη που αντανακλά το μεγάλο σχετικά ύψος βροχής. Θα μπορούσε να περιγράψει ως το *Business As Usual (BAU)* σενάριο.

ii. (15–315–Dry): Ταχύτητα ανέμου: 15 km/hr (περ. 3 Beaufort), Διεύθυνση ανέμου: 315°, Υγρασία καύσιμης ύλης ανά κλάση νεκρών καυσίμων μιας (1) ώρας, δέκα (10) και εκατό (100) ωρών 3%, 4% και 5% και 30% και 60% για ξυλώδη και ποώδη ζωντανά καύσιμα. Το σενάριο αυτό περιγράφει τις κατά κανόνα επικρατούσες συνθήκες στο νησί από πλευράς έντασης και κατεύθυνσης ανέμου, ωστόσο η υγρασία της καύσιμης ύλης είναι μειωμένη ως συνέπεια μιας παρατεταμένης ξηρής και θερμής καλοκαιρινής περιόδου, όπως αυτή που βίωσε η χώρα το 2007, το 2022 και το 2023. Οι μεγαλύτερες πυρκαγιές που εκδηλώθηκαν στην περιοχή της Ελλάδος σημειώθηκαν το καλοκαίρι του 2007 και αυτό του 2023. Το τελευταίο ήταν το καλοκαίρι που εμφανίστηκαν οι θερμότερες ημέρες που καταγράφηκαν ποτέ, με τρεις συνεχόμενους καύσωνες από τον Ιούνιο έως τον Αύγουστο και με ανέμους που ευνόησαν την εξάπλωση και την ένταση των πυρκαγιών. Αυτές οι ακραίες καιρικές συνθήκες είναι πιο πιθανό να εμφανιστούν πιο συχνά στο μέλλον παρά να είναι μια εξαιρετικά σπάνια περίπτωση (Tolika et al. 2009; Founda & Ginnakopoulos, 2009). Αυτή η λογική ενέπνευσε και τα τέσσερα επόμενα σενάρια που αφορούν ταχύτητες ανέμου πολύ σφοδρότερες οι οποίες προφανώς και εμφανίζονται κατά περιόδους στην περιοχή και η πιθανότητα εμφάνισης με παρατεταμένη παραμονή δεν μπορεί να αποκλειστεί στο μέλλον. Άλλωστε οι συνθήκες καύσης της πυρκαγιάς στον Έβρο το καλοκαίρι του 2023 δεν επιτρέπει τον αποκλεισμό κανενός σεναρίου πιθανών καιρικών συνθήκων.

iii. (36–315–Wet): Ταχύτητα ανέμου: 36 km/hr (περ. 5 Beaufort), Διεύθυνση ανέμου: 315°, Υγρασία καύσιμης ύλης ανά κλάση νεκρών καυσίμων μιας (1) ώρας, δέκα (10) και εκατό (100) ωρών 6%, 7% και 8% και 60% και 90% για ξυλώδη και ποώδη ζωντανά καύσιμα. Το σενάριο αυτό περιγράφει υψηλή ένταση ανέμου και κανονικές συνθήκες θέρους χωρίς παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο.

iv. (36–315–Dry): Ταχύτητα ανέμου: 36 km/hr (περ. 5 Beaufort), Διεύθυνση ανέμου: 315°, Υγρασία καύσιμης ύλης ανά κλάση νεκρών καυσίμων μιας (1) ώρας, δέκα (10) και εκατό (100) ωρών 3%, 4% και 5% και 30% και 60% για ξυλώδη και ποώδη ζωντανά καύσιμα. Το σενάριο αυτό περιγράφει υψηλή ένταση ανέμου και συνθήκες θέρους με παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο.

v. (54–315–Wet): Ταχύτητα ανέμου: 54 km/hr (περ. 7 Beaufort), Διεύθυνση ανέμου: 315°, Υγρασία καύσιμης ύλης ανά κλάση νεκρών καυσίμων μιας (1) ώρας, δέκα (10) και εκατό (100) ωρών 6%, 7% και 8% και 60% και 90% για ξυλώδη και ποώδη ζωντανά καύσιμα. Το σενάριο αυτό περιγράφει εξαιρετικά υψηλή ένταση ανέμου και κανονικές συνθήκες θέρους χωρίς παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο.

vi. (54–315–Dry): Ταχύτητα ανέμου: 54 km/hr (περ. 7 Beaufort), Διεύθυνση ανέμου: 315°, Υγρασία καύσιμης ύλης ανά κλάση νεκρών καυσίμων μιας (1) ώρας, δέκα (10) και εκατό (100) ωρών 3%, 4% και 5% και 30% και 60% για ξυλώδη και ποώδη ζωντανά καύσιμα. Το σενάριο αυτό περιγράφει εξαιρετικά υψηλή ένταση ανέμου και συνθήκες θέρους με παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο.

Η προσομοίωση συμπεριφοράς πυρκαγιάς με χρήση *flammap* δημιουργεί έναν αριθμό διαφορετικών παραμέτρων συμπεριφοράς πυρκαγιάς, συμπεριλαμβανομένης της έντασης του μετώπου πυρκαγιάς (*Fireline Intensity*) (συχνά ονομάζεται ένταση του *Byram*), της ταχύτητας του μετώπου (*Rate of Spread*), του μήκους της φλόγας (*Flame length*) κ.λπ. Η ένταση της γραμμής πυρκαγιάς περιγράφει την απελευθέρωση θερμότητας ανά μέτρο του μετώπου πυρκαγιάς και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση (Chandler, 1983) που είναι μια προσαρμογή της αρχικής εξίσωσης που αναπτύχθηκε από τον Byram (1959):

$$I = 0.007 H * W * R$$

Όπου:

I=Ένταση Μετώπου Πυρκαγιάς σε Kw/m
H=Θερμική απόδοση σε cal/g
W=Ποσότητα καύσιμης ύλης σε τόνους/ha
R=Ταχύτητα εξάπλωσης σε m/min

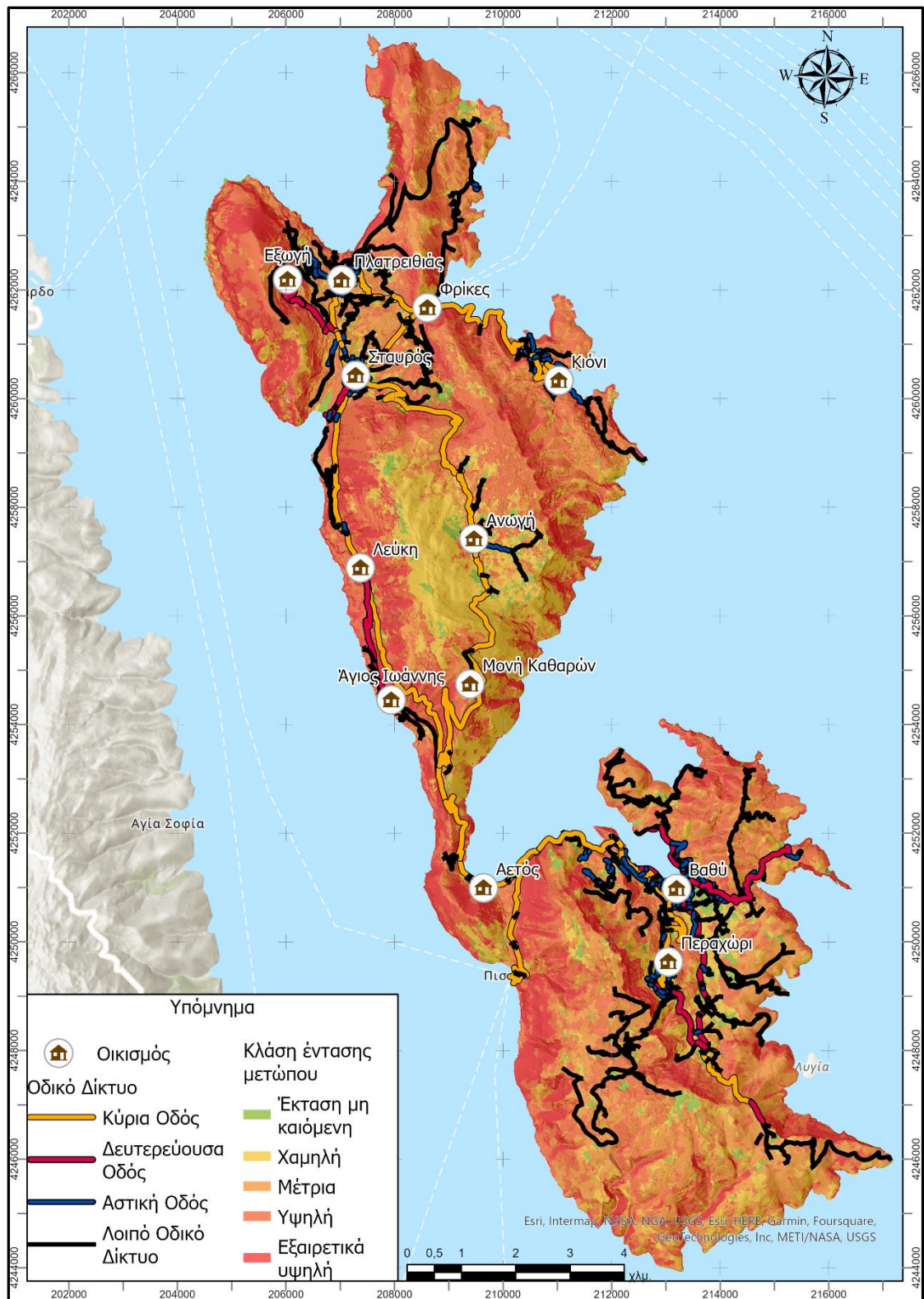
Όπως αναμενόταν η επίδραση των διαφορετικών σεναρίων στις παραμέτρους συμπεριφοράς της δασικής πυρκαγιάς είναι ιδιαίτερα σημαντική. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί και οπτικά από τον έλεγχο των εικόνων 21-26, που αποτυπώνουν την ένταση του μετώπου πυρκαγιάς σε τέσσερις κλάσεις έντασης κάτω από τα έξι διαφορετικά σενάρια αλλά και από τα στοιχεία του πίνακα 5. Τα στοιχεία του πίνακα αναδεικνύουν την τεράστια σημασία της υγρασίας της καύσιμης ύλης στην συμπεριφορά της φωτιάς. Στα δύο σενάρια που βασίζονται στις τυπικές συνθήκες έντασης και κατεύθυνσης ανέμου (Σενάρια i και ii), στις τυπικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης το 51% περίπου της έκτασης αναμένεται να προσβληθεί από πυρκαγιά υψηλής και εξαιρετικά υψηλής έντασης. Αντίθετα μετά από παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο, όπως αυτή του έτους 2023, το ποσοστό αυτό εκτοξεύεται στο 68% περίπου. Αν δε, η παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο συνδυαστεί με υψηλή ή εξαιρετικά υψηλή ένταση ανέμου τότε το ποσοστό του νησιού που αναμένεται να προσβληθεί από υψηλής και πολύ υψηλής έντασης πυρκαγιά εκτοξεύεται στο 81 και 86% αντίστοιχα.

Παρόμοια είναι η εικόνα και σε ότι αφορά την ταχύτητα εξάπλωσης πυρκαγιάς που αποτυπώνεται στις εικόνες 27-32.

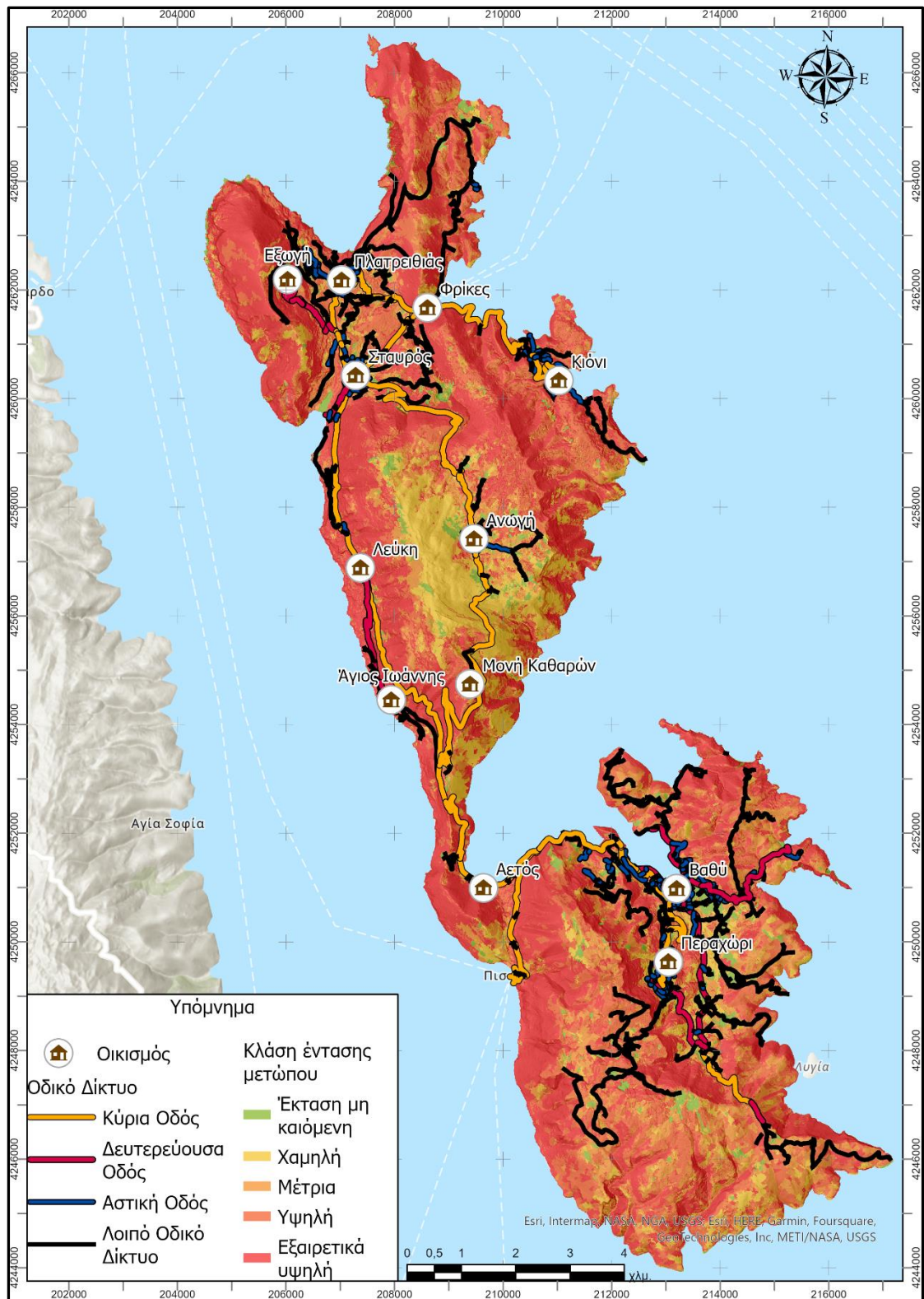
Πίνακας 5. Έκταση ανά κλάση έντασης μετώπου πυρκαγιάς για κάθε ένα από τα έξι σενάρια.

Σενάριο	Κλάση έντασης	Ένταση (kW/m)	Έκταση (ha)	Έκταση (%)
i: 15-315-Wet	Μη καιόμενη	0	559.99	5.8
	Χαμηλή	0-500	1469.87	15.3
	Μέτρια	500-3000	2616.41	27.3
	Υψηλή	3000-7000	3207.8	33.5
	Εξαιρετικά υψηλή	>7000	1735.57	18.1
ii: 15-315-Dry	Μη καιόμενη	0	559.99	5.8
	Χαμηλή	0-500	1004.23	10.5
	Μέτρια	500-3000	1546.32	16.1
	Υψηλή	3000-7000	2416.8	25.2
	Εξαιρετικά υψηλή	>7000	4062.3	42.4
iii: 36-315-Wet	Μη καιόμενη	0	559.99	5.8
	Χαμηλή	0-500	829.87	8.7
	Μέτρια	500-3000	1177.17	12.3
	Υψηλή	3000-7000	1986.18	20.7
	Εξαιρετικά υψηλή	>7000	5036.43	52.5
iv: 36-315-Dry	Μη καιόμενη	0	559.99	5.8
	Χαμηλή	0-500	133.25	1.4
	Μέτρια	500-3000	1191.42	12.4
	Υψηλή	3000-7000	908.08	9.5
	Εξαιρετικά υψηλή	>7000	6796.9	70.9
v: 54-315-Wet	Μη καιόμενη	0	559.99	5.8
	Χαμηλή	0-500	149.83	1.6

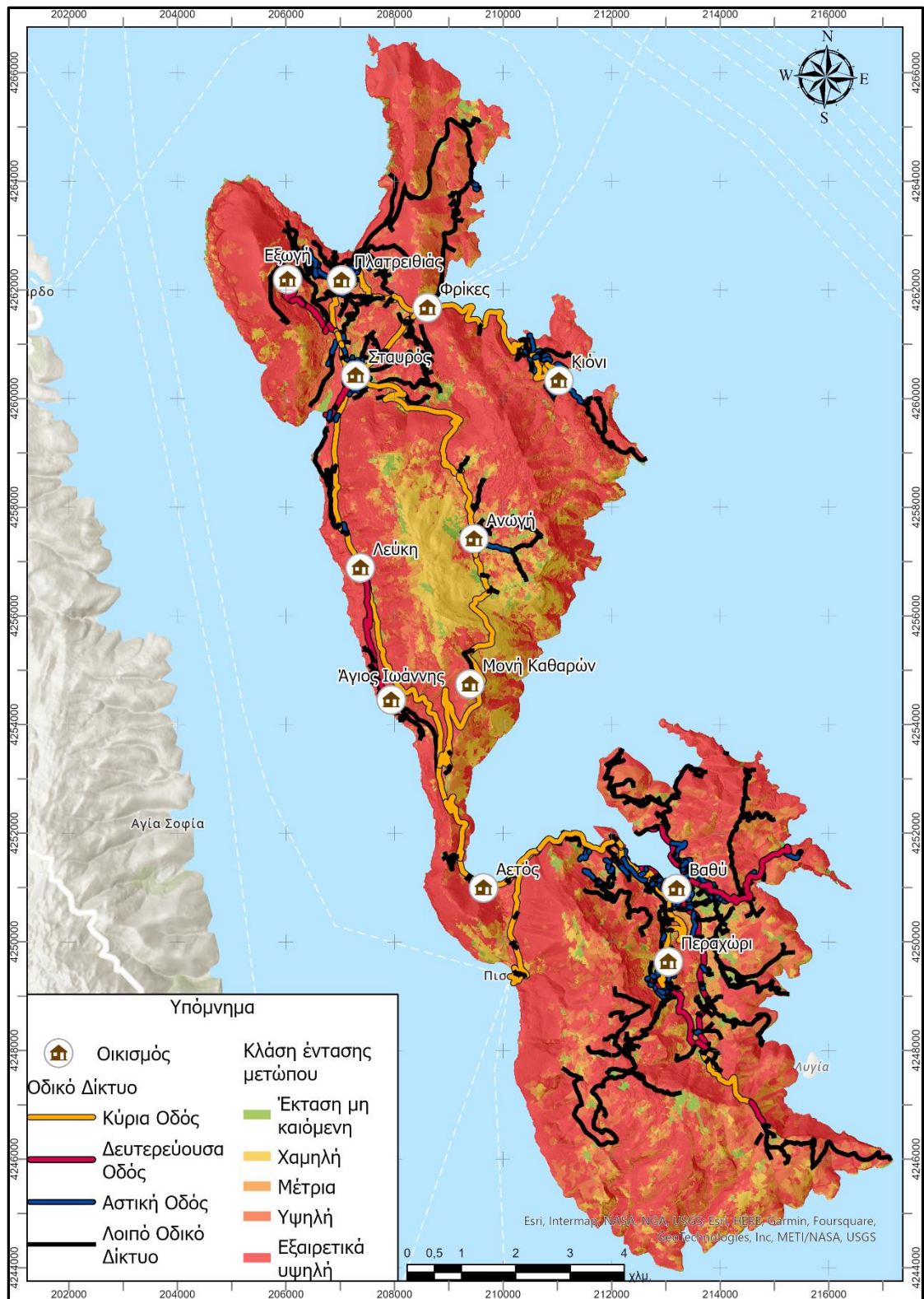
	Μέτρια	500-3000	1160.58	12.1
	Υψηλή	3000-7000	1059.44	11.0
	Εξαιρετικά υψηλή	>7000	6659.8	69.4
vi: 54-315-Dry	Μη καιόμενη	0	559.99	5.8
	Χαμηλή	0-500	21.51	0.2
	Μέτρια	500-3000	829.48	8.6
	Υψηλή	3000-7000	534.89	5.6
	Εξαιρετικά υψηλή	>7000	7643.77	79.7



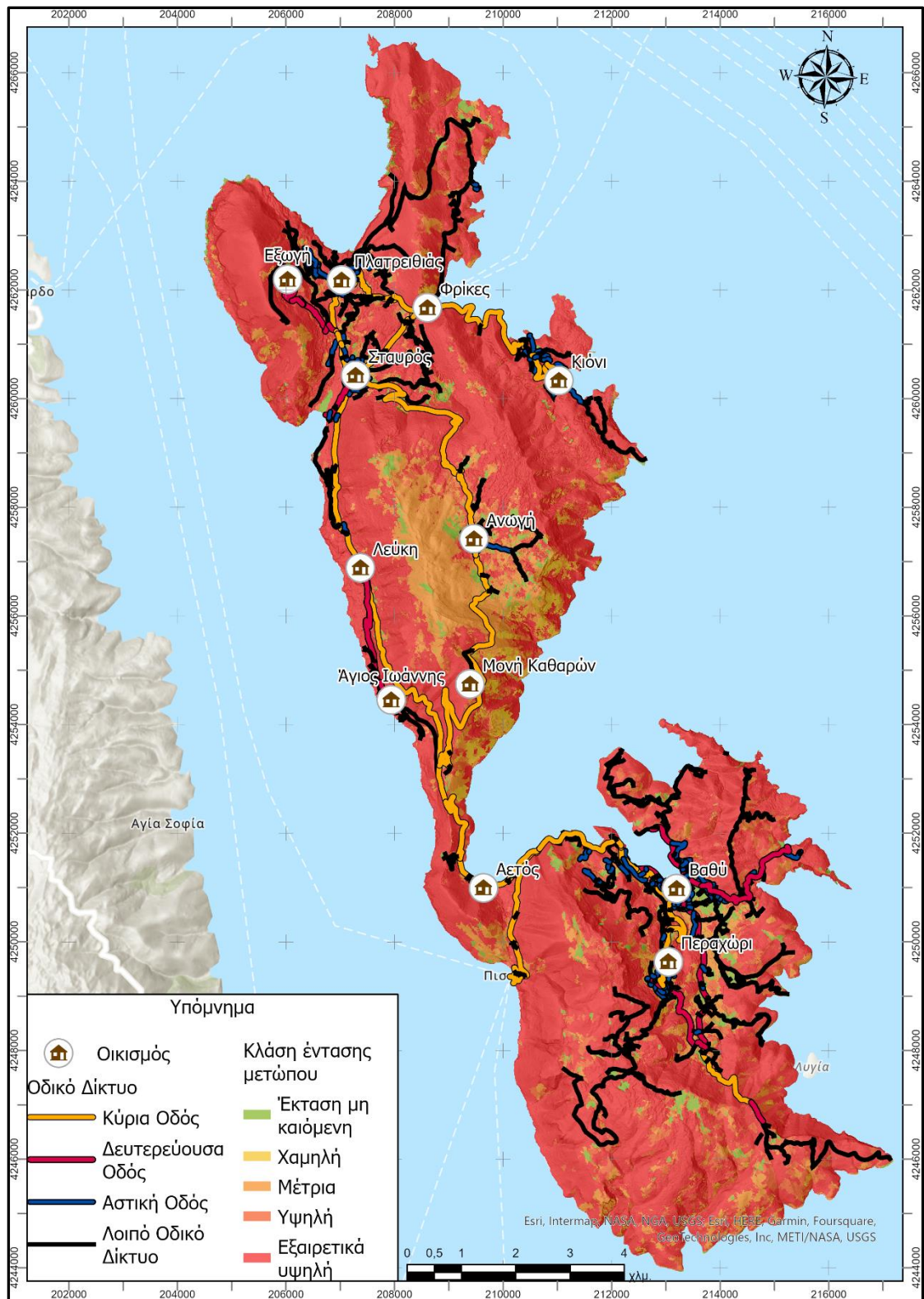
Εικόνα 21. Χάρτης Έντασης Μετώπου υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθηκών ανέμου (3 Bft) και υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο i)



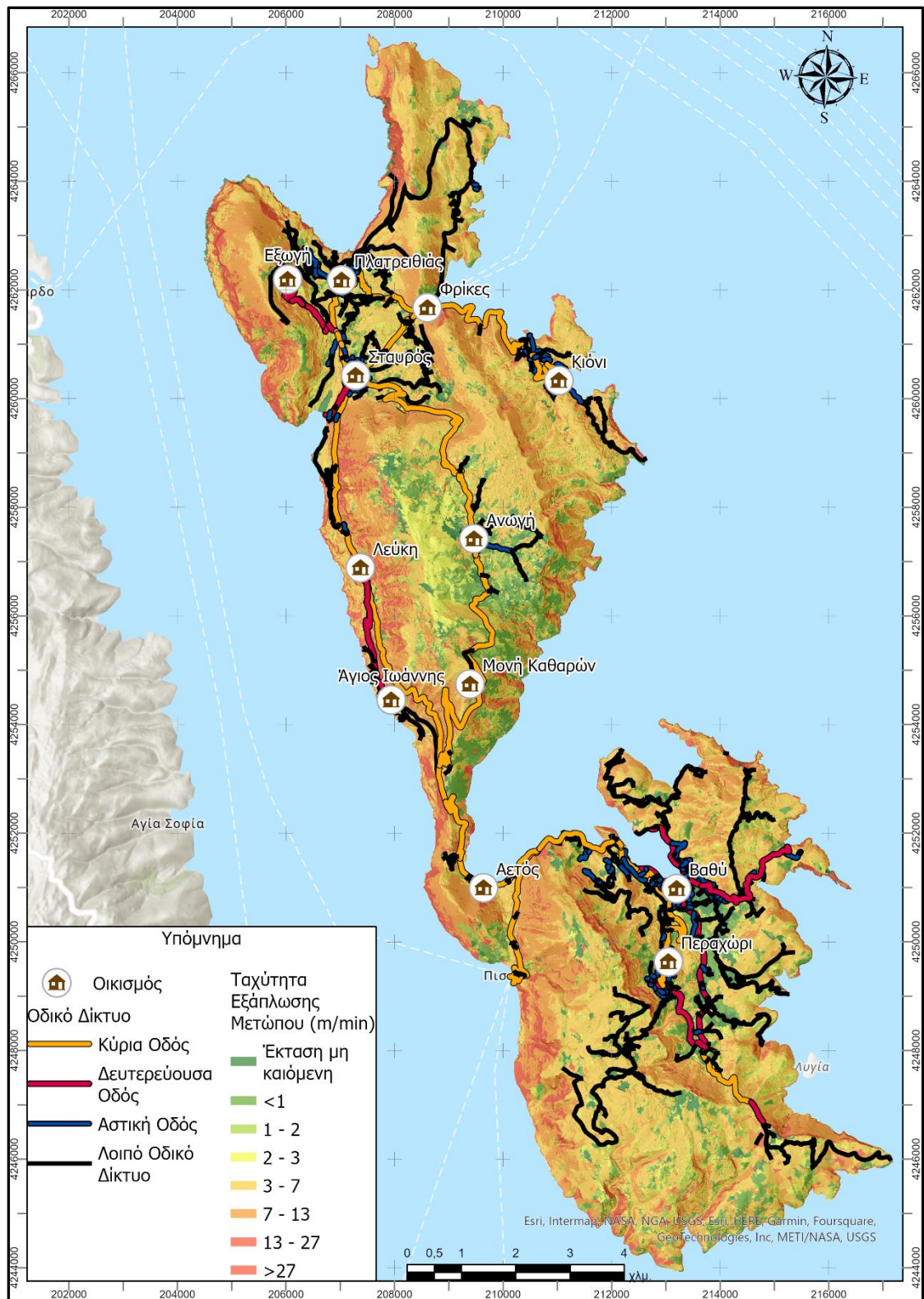
Εικόνα 22. Χάρτης Έντασης Μετώπου υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθηκών ανέμου (3 Bft) και παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης (Σενάριο ii)



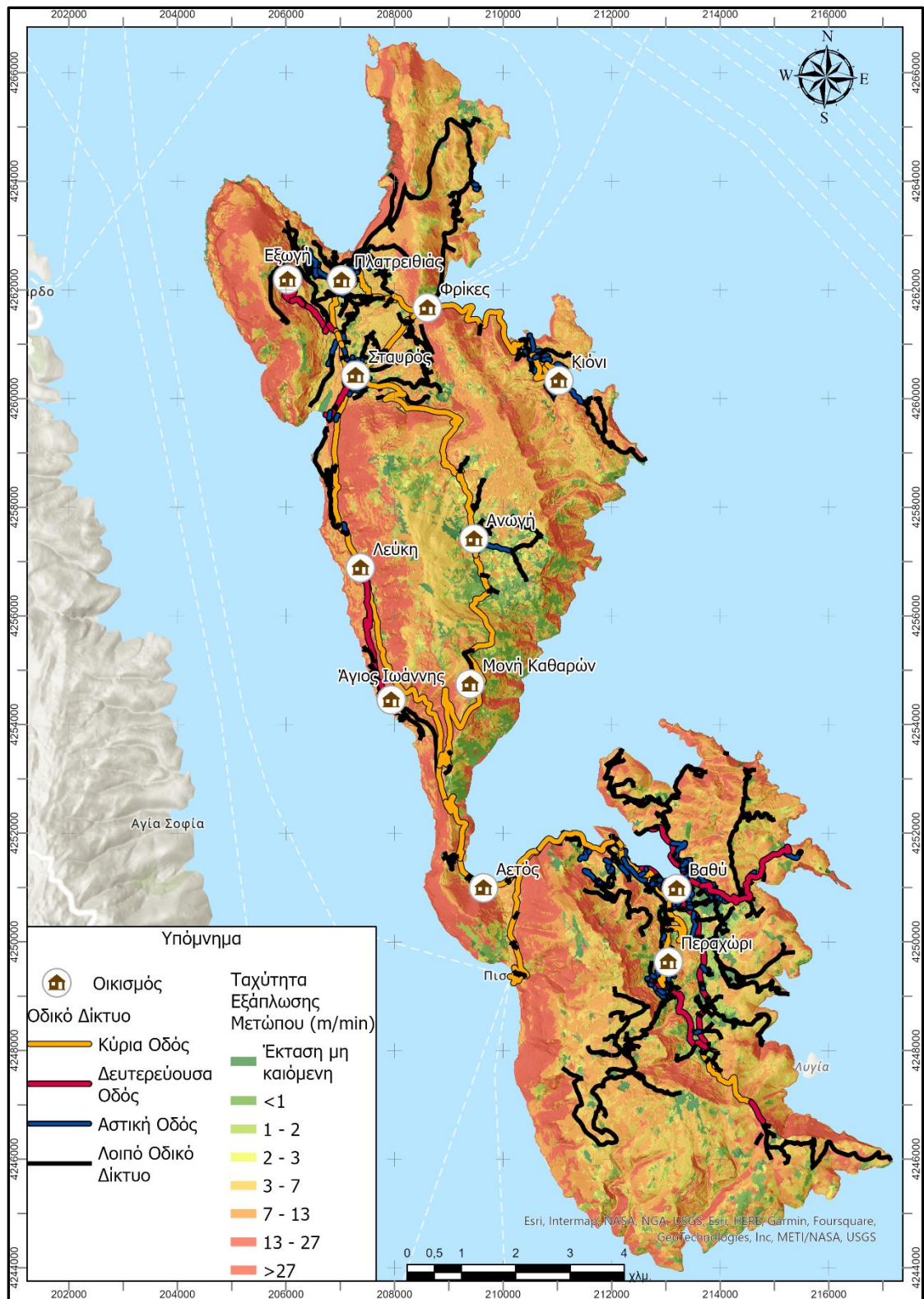
Εικόνα 23. Χάρτης Έντασης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο iii)



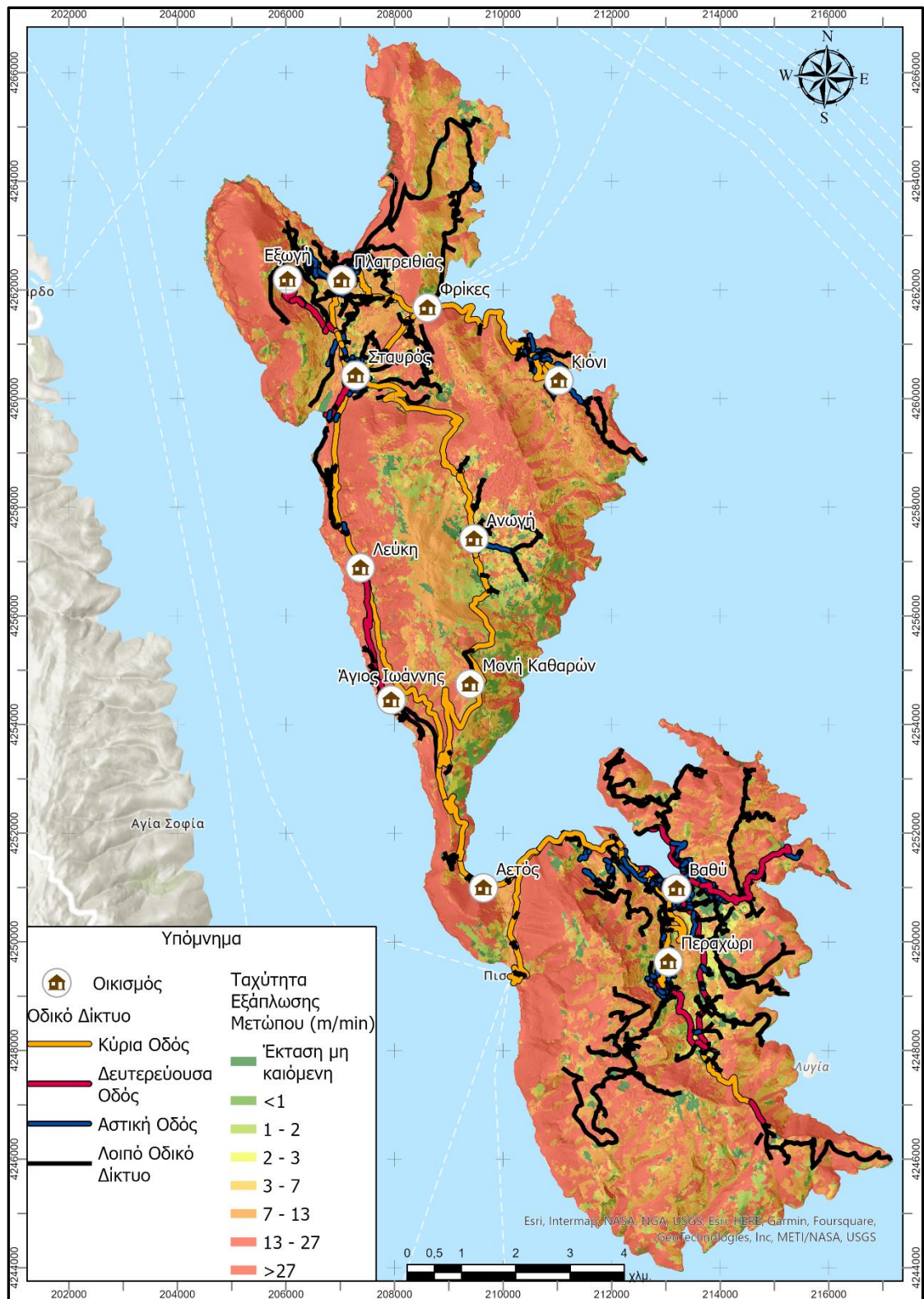
Εικόνα 24. Χάρτης Έντασης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης (Σενάριο iv)



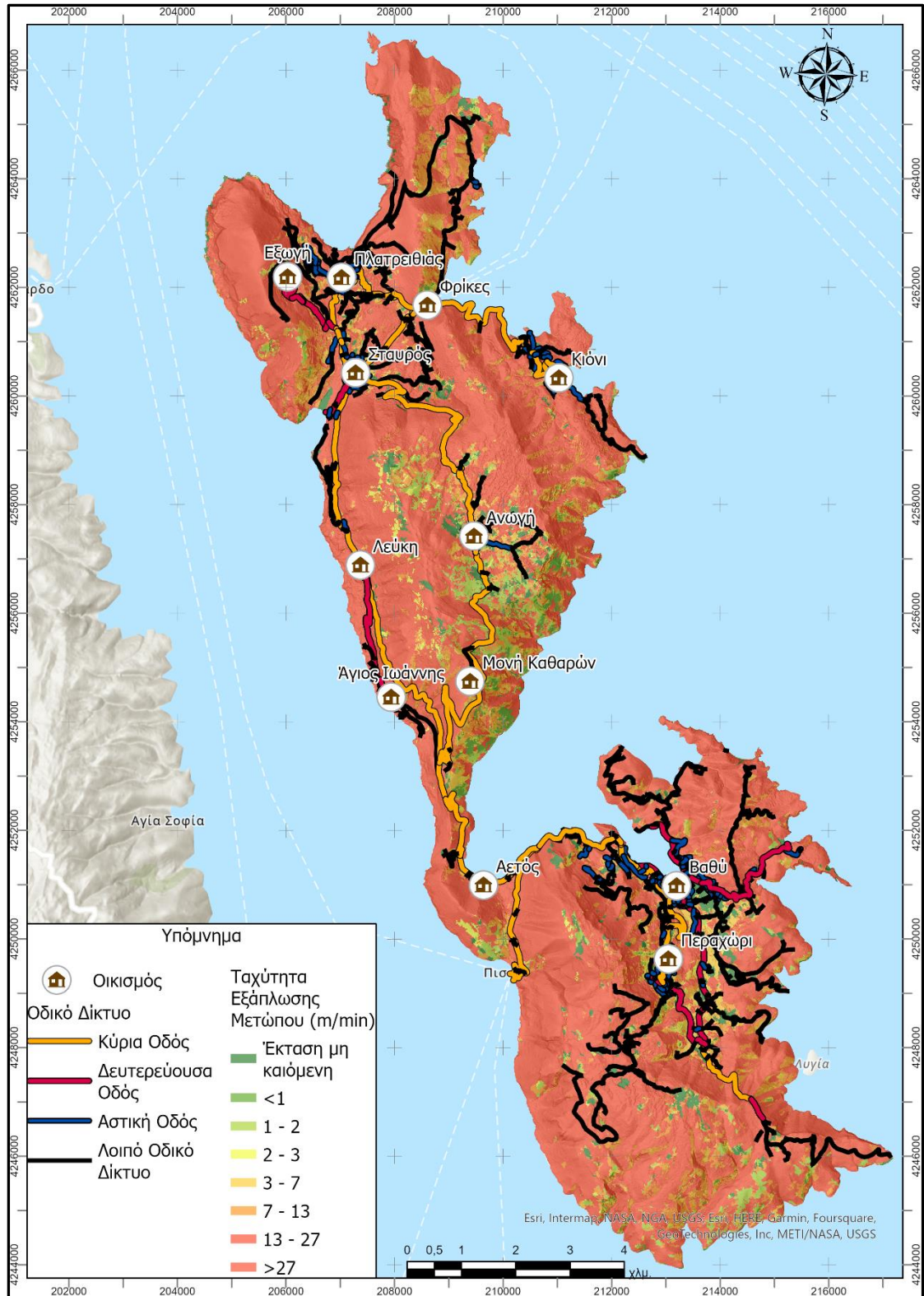
Εικόνα 27. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθήκων ανέμου (3 Bft) και υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο i)



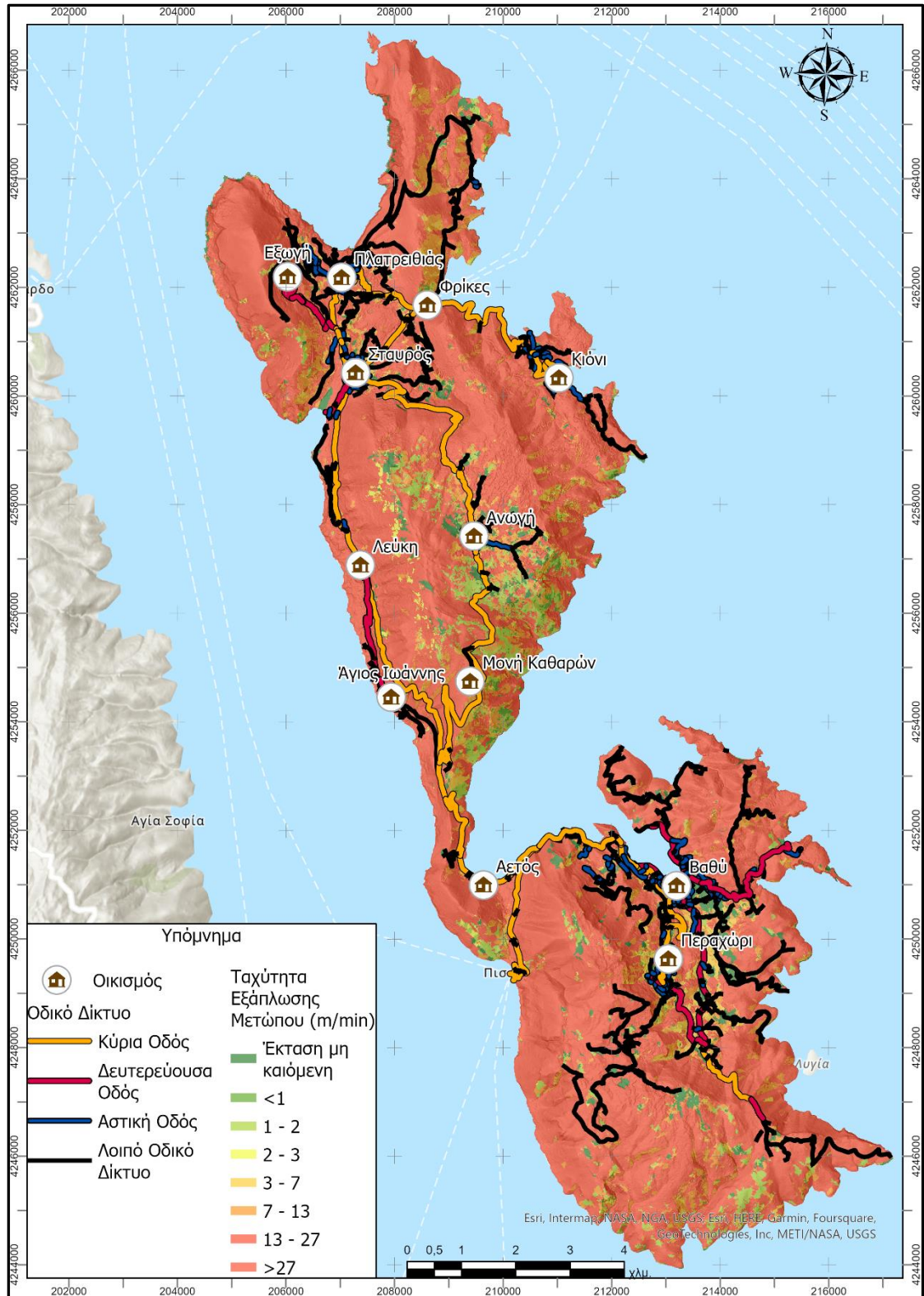
Εικόνα 28. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης Μετώπου υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθηκών ανέμου (3 Bft) και παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης (Σενάριο ii)



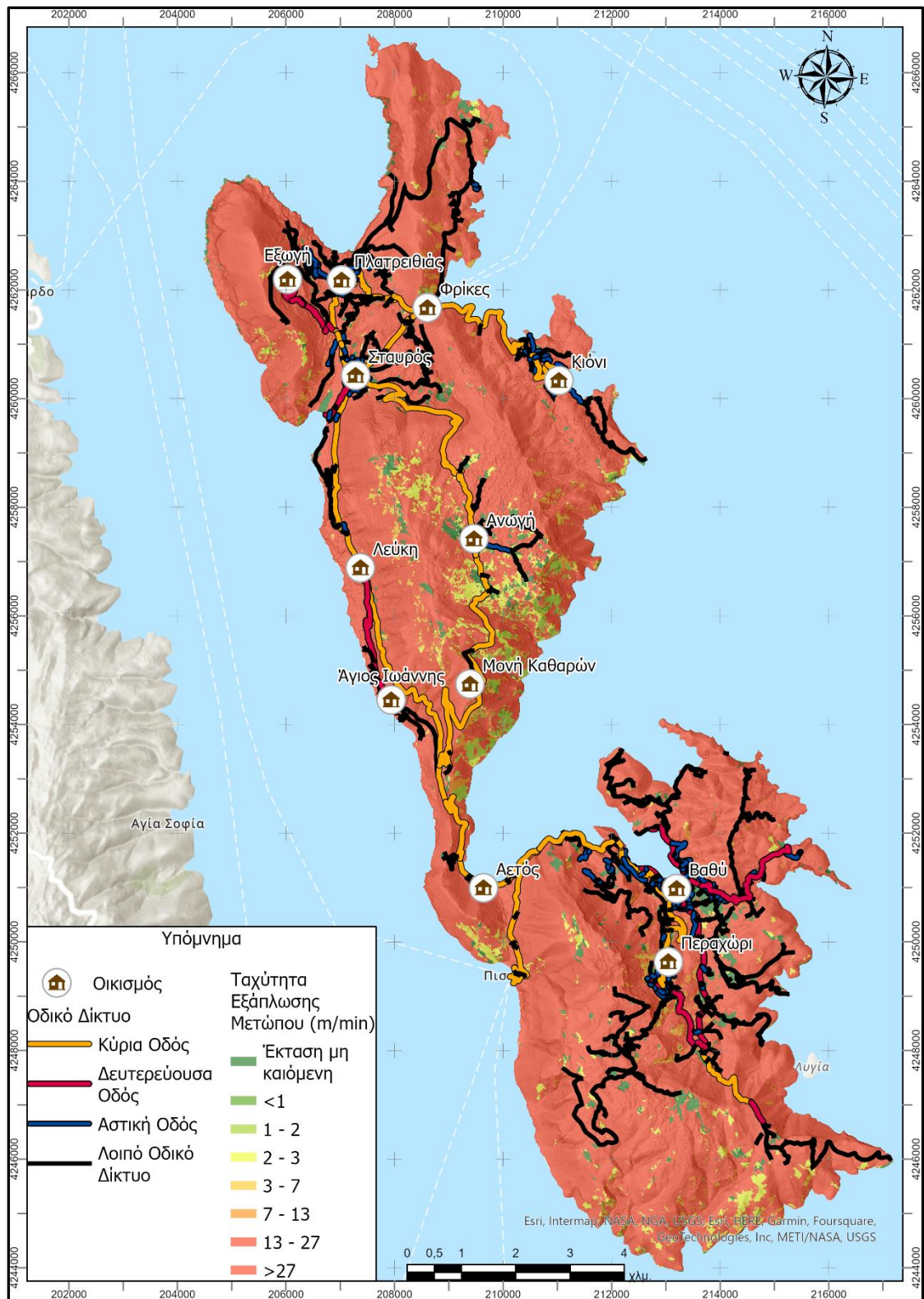
Εικόνα 29. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο iii)



Εικόνα 30. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλη (Σενάριο iv)



Εικόνα 31. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης Μετώπου υπό συνθήκες εξαιρετικά ισχυρού ανέμου (7 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο ν).



Εικόνα 32. Χάρτης Ταχύτητας Εξάπλωσης Μετώπου υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (7 Bft) παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλη (Σενάριο vi)

3.5. Εκτίμηση Κινδύνου Πυρκαγιάς

Ο κίνδυνος πυρκαγιάς σχετίζεται με την πιθανότητα ένα συμβάν πυρκαγιάς να μετατραπεί σε πυρκαγιά υψηλής σφοδρότητας και ως εκ τούτου σε μια πυρκαγιά με υψηλή πιθανότητα απώλειας αξιών, υποδομών αλλά και ανθρωπίνων ζωών (Suc, 1984). Πυρκαγιές που συχνά αποκαλούνται μεγαπυρκαγιές. Η εκ των προτέρων γνώση των θέσεων που εμφανίζουν υψηλή πιθανότητα για μια υψηλής σφοδρότητας πυρκαγιά επιτρέπει αφ' ενός την στοχευμένη διαχείριση των θέσεων αυτών σε ότι αφορά τη διαθεσιμότητα καύσιμης ύλης και αφ' ετέρου την αυξημένη ετοιμότητα για γρήγορο εντοπισμό και γρήγορη πρώτη προσβολή από τις επίγειες πυροσβεστικές δυνάμεις (Tolika et al., 2009). Μια γρήγορη πρώτη προσβολή μπορεί να έχει ζωτικό αντίκτυπο στη μείωση του κινδύνου εξάπλωσης της πυρκαγιάς.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης η εκτίμηση κινδύνου πυρκαγιάς βασίστηκε στην φόρμουλα που παρουσιάστηκε από τους Xofis et al. (2020a,b) για τον υπολογισμό του δείκτη κινδύνου πυρκαγιάς (*Fire Danger Index; FDI*) και απεικονίζεται παρακάτω.

$$FDI = 0.5 * FI + 0.2 * ROS + 0.2 * HI + 0.1 * PH$$

Η συγκεκριμένη φόρμουλα ενσωματώνει τέσσερις πολύ σημαντικούς παράγοντες που περιγράφουν όχι μόνο την συμπεριφορά της πυρκαγιάς αλλά επίσης την πιθανότητα έναρξης της. Έτσι η εκτίμηση της έντασης μετώπου πυρκαγιάς προσαρμόστηκε σε κλίμακα 0 έως 1 και αποτελεί τον παράγοντα FI της παραπάνω φόρμουλας. Η προσαρμογή έγινε με διαίρεση των τιμών της έντασης μετώπου πυρκαγιάς με την τιμή 33.000 που αποτελεί την υψηλότερη ουσιαστικά τιμή που εμφανίζεται στο σενάριο *business as usual* (Σενάριο i). Σε όλα τα άλλα σενάρια η συγκεκριμένη διαίρεση οδηγεί σε τιμές και πάνω από 1 οι οποίες προσαρμόστηκαν στην τιμή 1. Με τον ίδιο τρόπο διαιρώντας με την τιμή 33 έγινε επανακλιμάκωση των τιμών της ταχύτητας εξάπλωσης μετώπου ώστε να αποτελέσει τον παράγοντα ROS της παραπάνω φόρμουλας. Η ταχύτητα εξάπλωσης του μετώπου (ROS) είναι επίσης ένα σημαντικό στοιχείο της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, καθώς καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον χρόνο που απαιτείται για να μετατραπεί μια πηγή ανάφλεξης σε μια μεγάλη και δύσκολη στην καταστολή της πυρκαγιά. Μια προκαταρκτική ανάλυση σε δύο περιοχές μελέτης έδειξε ότι η ένταση του μετώπου και ο ρυθμός εξάπλωσης συσχετίζονται σημαντικά και θετικά σε βαθμό περίπου 60%. Ωστόσο, διάφοροι τύποι καύσιμης ύλης, όπως λιβάδια και φρύγανα, έχουν χαμηλή ποσότητα εκλυόμενης ενέργειας, λόγω κυρίως του χαμηλού φορτίου καυσίμου, αλλά μια πολύ υψηλή ταχύτητα εξάπλωσης. Σε ένα σύνθετο μωσαϊκό τοπίου, όπως αυτό στην περιοχή μελέτης και στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, αυτοί οι τύποι κάλυψης του

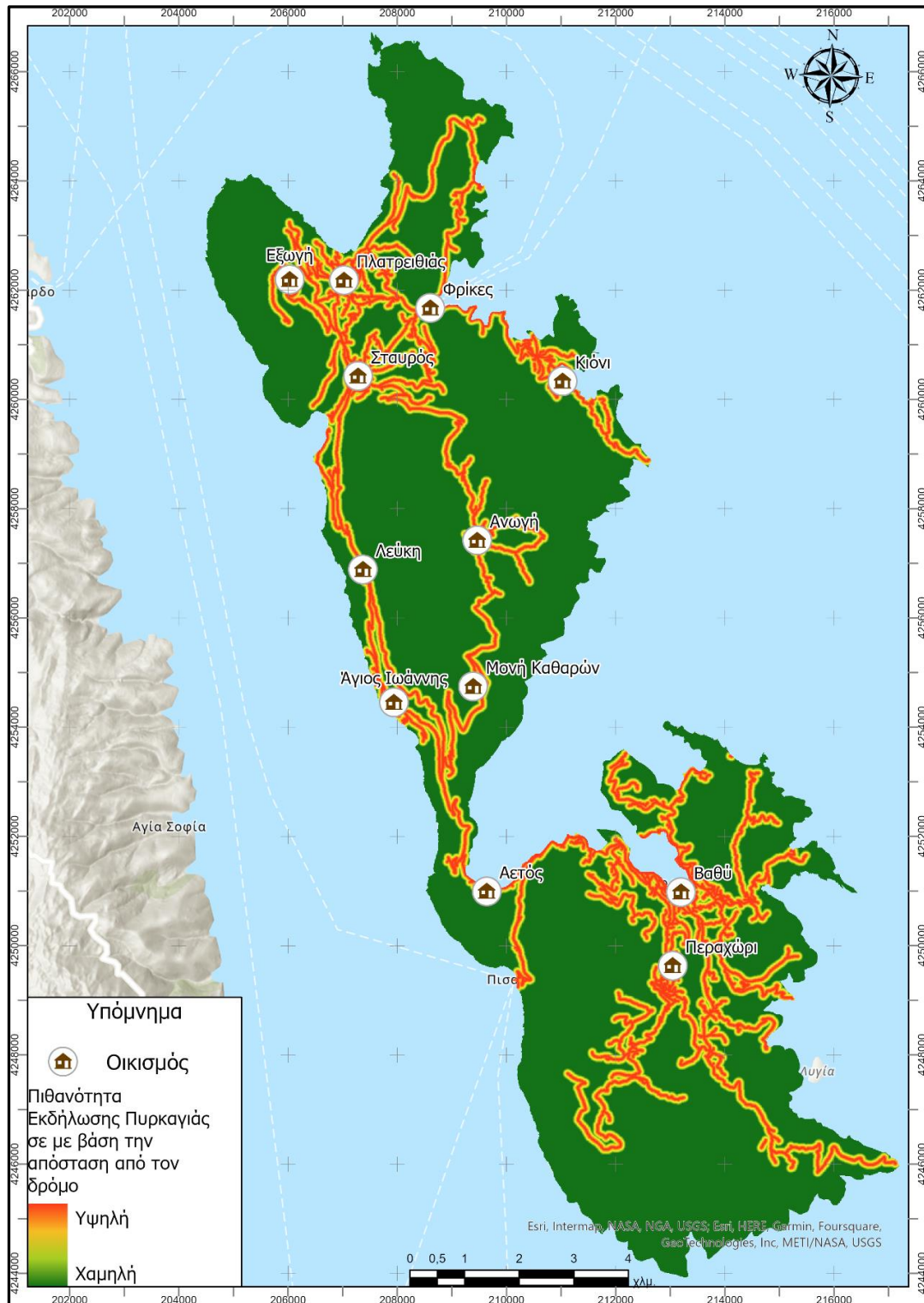
εδάφους συνοδεύονται από υψηλό κίνδυνο πυρκαγιάς λόγω της αυξημένης πιθανότητας μια πυρκαγιά να εξαπλωθεί γρήγορα σε μια κοντινή περιοχή με υψηλό φορτίο καύσιμης ύλης και υψηλή πιθανότητα πυρκαγιάς υψηλής έντασης. Δεδομένου ότι σκοπός της εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς δεν είναι μόνο ο εντοπισμός των πιο ευάλωτων περιοχών για υψηλής έντασης δασική πυρκαγιά αλλά και η αύξηση του επιπέδου οργάνωσης των δυνάμεων καταστολής, η ταχύτητα εξάπλωσης περιλαμβάνεται ως ξεχωριστό στοιχείο στον τύπο υπολογισμού του FDI, με σχετικά χαμηλό βάρος, παρά το γεγονός ότι αποτελεί συνιστώσα της εξίσωσης έντασης μετώπου πυρκαγιάς, που περιεγράφηκε παραπάνω και κατά μία έννοια περιλαμβάνεται ήδη στον τύπο υπολογισμού του FDI.

Ο δείκτης FDI ενσωματώνει δύο ακόμη σημαντικές παραμέτρους που σχετίζονται με την πιθανότητα έναρξης μιας πυρκαγιάς, τον δείκτη ανθρωπογενούς επίδρασης (HI) και τον δείκτη πυρικού ιστορικού (PH).

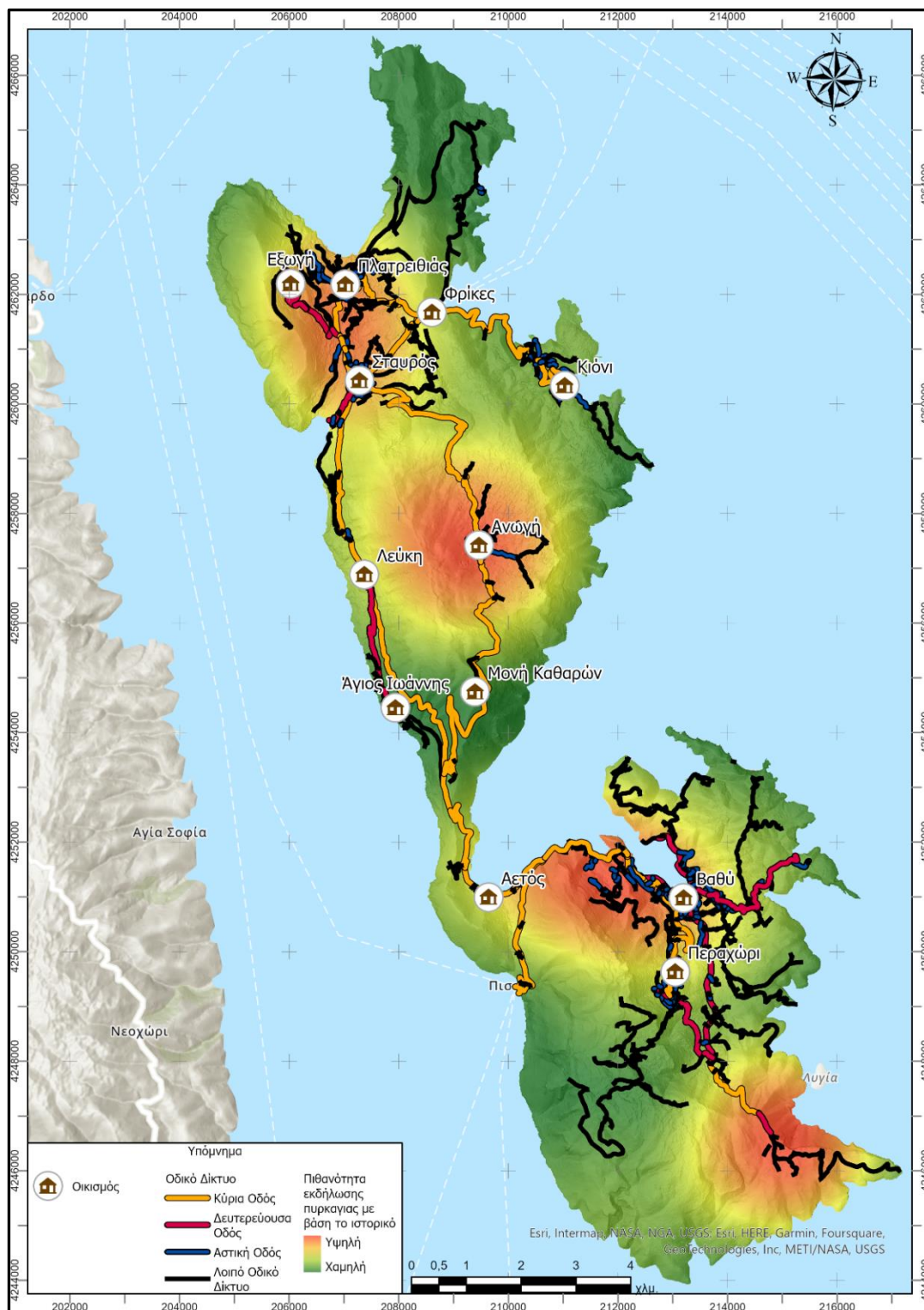
Ως δείκτης ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, υιοθετήθηκε η απόσταση από τους δρόμους, με τιμές που κυμαίνονται από 0, για περιοχές σε απόσταση 100 μέτρων ή περισσότερο από δρόμους, έως 1 για περιοχές που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με αυτούς. Η απόσταση από τους δρόμους έχει αναφερθεί ότι σχετίζεται θετικά με τη συχνότητα ανάφλεξης.

Το πυρικό ιστορικό δεν έχει άμεση σχέση με τον κίνδυνο πυρκαγιάς, ειδικά αν λάβει κανείς υπόψη ότι μια παλαιότερη πυρκαγιά μπορεί να μειώσει το φορτίο καύσιμης ύλης και ως εκ τούτου την ένταση μιας πυρκαγιάς. Ωστόσο, παρέχει μια ένδειξη του χωρικού προτύπου των πυρκαγιών μιας περιοχής που μπορεί να υποδεικνύει τάσεις που σχετίζονται με συγκεκριμένες χρήσεις γης και περιοχές. Για παράδειγμα, στην περιοχή της ανατολικής Μεσογείου όπου η κτηνοτροφία ελεύθερης βοσκής εξακολουθεί να ασκείται στις ορεινές και ημιορεινές περιοχές, είναι πολύ συνηθισμένο να ανάβουν εσκεμμένες πυρκαγιές από βοσκούς για τη βελτίωση της βόσκησης. Αυτή η τάση έχει ως αποτέλεσμα μια ομαδοποίηση προηγούμενων επεισοδίων πυρκαγιάς που υποδηλώνει τον υψηλότερο κίνδυνο πυρκαγιάς σε τέτοιες περιοχές. Αν και αυτές οι πυρκαγιές σπάνια γίνονται υψηλής έντασης, επειδή συμβαίνουν κυρίως το φθινόπωρο και σε περιοχές με χαμηλό φορτίο καυσίμου, η πιθανότητα να εξαπλωθούν σε κοντινά πιο εύφλεκτα οικοσυστήματα είναι υπαρκτή. Ο δείκτης πυρικού ιστορικού (PH) υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα για συμβάντα πυρκαγιών της περιόδου 2000-2022. Εφαρμόστηκε μια συνάρτηση *Kernel Density Function* για τη μετατροπή των σημειακών δεδομένων ύπαρξης πυρκαγιάς σε ένα αρχείο ψηφιδωτό με τιμές που κυμαίνονται από 0 για περιοχές μακριά από προηγούμενα συμβάντα έως 1 για περιοχές σε άμεση γειτνίαση με προηγούμενες πυρκαγιές.

Ο δείκτης ανθρώπινης επίδρασης (HI) απεικονίζεται στην εικόνα 33 και ο δείκτης πυρικού ιστορικού στην εικόνα 34. Οι δύο αυτοί δείκτες παραμένουν σταθεροί ανεξάρτητα από το σενάριο για το οποίο υπολογίζεται ο δείκτης κινδύνου πυρκαγιάς.



Εικόνα 33. Δείκτης ανθρώπινης επίδρασης (HI) που αποτυπώνει την πιθανότητα έναρξης πυρκαγιάς από κάποια ανθρώπινη δραστηριότητα.



Εικόνα 34. Δείκτης Πυρικού Ιστορικού (PH) που αποτυπώνει την πιθανότητα έναρξης πυρκαγιάς με βάση το προηγούμενο ιστορικό.

Ο δείκτης κινδύνου πυρκαγιάς εκτιμήθηκε και για τα 6 διαφορετικά σενάρια καιρικών συνθηκών και υγρασίας καύσιμης ύλης. Οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από 0 έως 1 και ταξινομήθηκαν σε τέσσερις κατηγορίες κινδύνου πυρκαγιάς όπως προτείνεται από του Xofis et al. 2020.

Συγκεκριμένα:

- $FDI < 0,1$: Πολύ χαμηλός
- $0,1 < FDI < 0,35$: Χαμηλός
- $0,35 < FDI < 0,7$ Υψηλός
- $FDI > 0,7$ Εξαιρετικά υψηλός

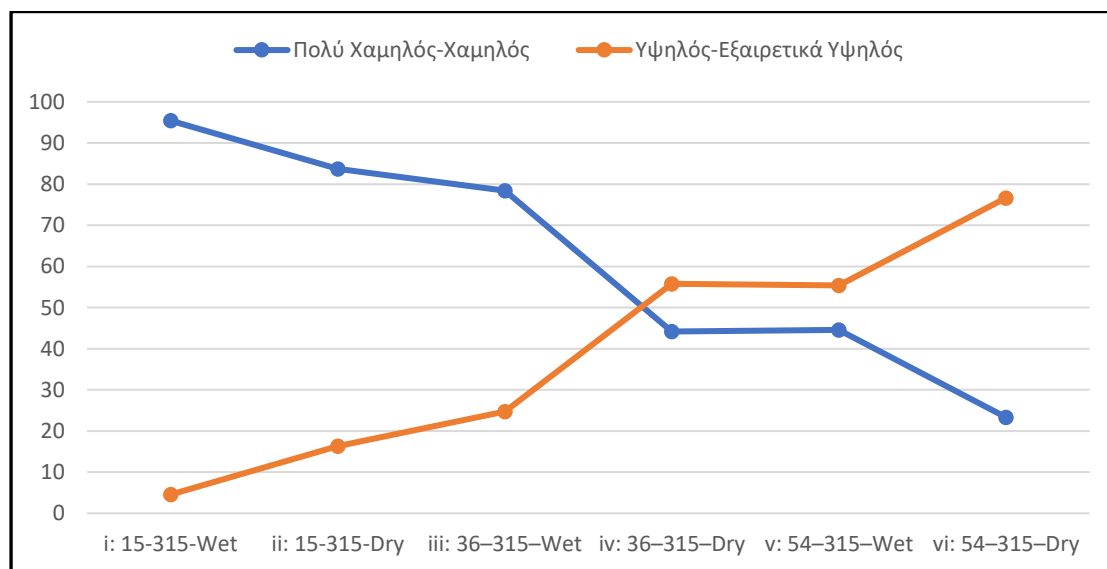
Πίνακας 6. Έκταση ανά κλάση κατηγορίας κινδύνου πυρκαγιάς για κάθε ένα από τα έξι σενάρια.

Σενάριο	Κλάση έντασης	Έκταση (ha)	Έκταση (%)
i: 15-315-Wet	Πολύ Χαμηλός	3215,57	33,5
	Χαμηλός	5936,17	61,9
	Υψηλός	409,21	4,3
	Εξαιρετικά υψηλός	28,69	0,3
ii: 15-315-Dry	Πολύ Χαμηλός	1934,22	20,2
	Χαμηλός	6091,11	63,5
	Υψηλός	1425,83	14,9
	Εξαιρετικά υψηλός	138,48	1,4
iii: 36-315-Wet	Πολύ Χαμηλός	1478,31	15,4
	Χαμηλός	6040,12	63,0
	Υψηλός	1920,19	20,0
	Εξαιρετικά υψηλός	451,02	4,7
iv: 36-315-Dry	Πολύ Χαμηλός	1087,84	11,3
	Χαμηλός	3148,24	32,8
	Υψηλός	4418,03	46,1
	Εξαιρετικά υψηλός	935,53	9,8
v: 54-315-Wet	Πολύ Χαμηλός	1056,13	11,0
	Χαμηλός	3220,00	33,6
	Υψηλός	4558,04	47,5
	Εξαιρετικά υψηλός	755,47	7,9
vi: 54-315-Dry	Πολύ Χαμηλός	886,68	9,2
	Χαμηλός	1351,05	14,1
	Υψηλός	3652,78	38,1
	Εξαιρετικά υψηλός	3699,13	38,6

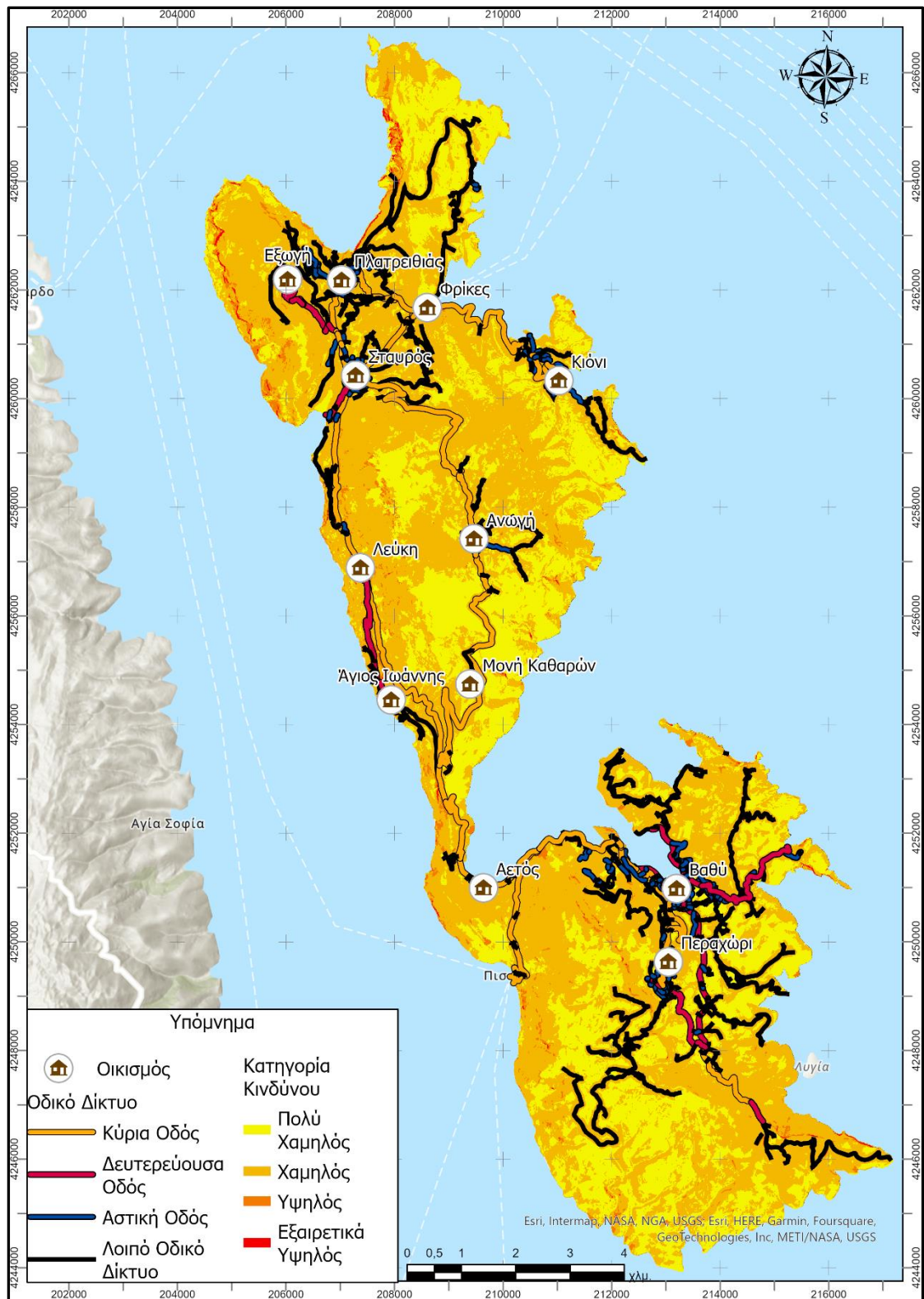
Ο οπτικός έλεγχος της διακύμανσης των τιμών του δείκτη ανάλογα με το σενάριο στις εικόνες 36-41 αναδεικνύει την σημαντική διαφοροποίηση ως προς την επικινδυνότητα για υψηλής έντασης πυρκαγιά που προκαλούν οι διαφορετικές συνθήκες εκδήλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς αλλά και οι καιρικές συνθήκες που προηγήθηκαν αυτής. Έτσι ενώ στο τυπικό

σενάριο κυριαρχεί στο νησί της Ιθάκης ο χαμηλός και πολύ χαμηλός κίνδυνος, όσο οι συνθήκες έντασης ανέμου γίνονται ευνοϊκότερες για την πυρκαγιά και η υγρασία της καύσιμης ύλης γίνεται χαμηλότερη τότε κυριαρχεί ο υψηλός και πολύ υψηλός κίνδυνος πυρκαγιάς.

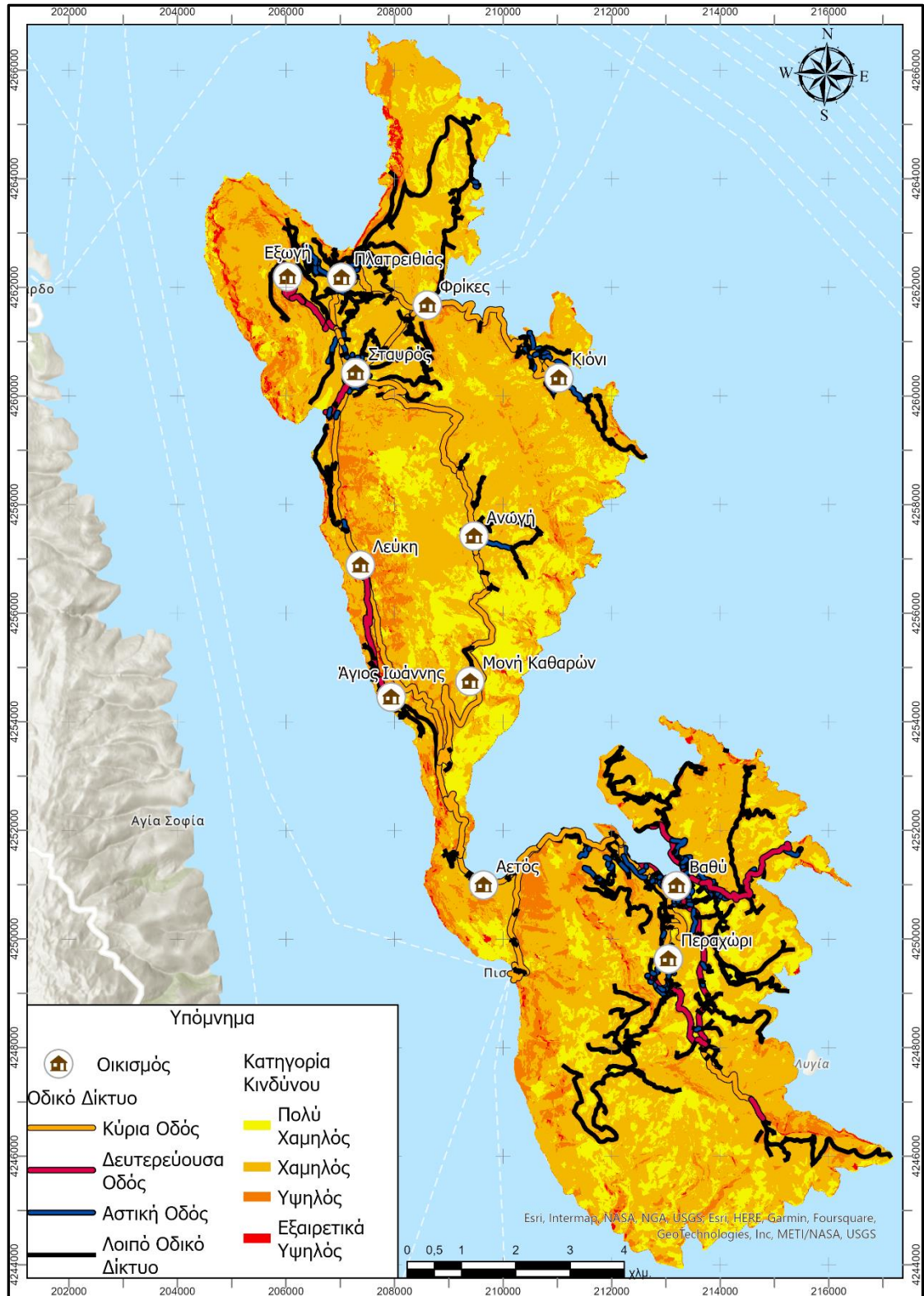
Χαρακτηριστικά είναι τα στοιχεία που παρατίθενται στον πίνακα 6 με τις εκτάσεις που υπάγονται σε κάθε κατηγορία κινδύνου ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο. Ακόμη πιο εύγλωττα είναι τα στοιχεία που αποτυπώνονται στην εικόνα 35 όπου οι κατηγορίες κινδύνου έχουν ομαδοποιηθεί. Είναι σαφές από το διάγραμμα της εικόνας 35 ότι η ένταση ανέμου από μόνη της δεν αρκεί για να καταστήσει το μεγαλύτερο μέρος του νησιού σε μια κατάσταση υψηλού ή εξαιρετικά υψηλού κινδύνου. Ο συνδυασμός όμως υψηλής έντασης ανέμων μετά από μια μακρά ξηροθερμική περίοδο που έχει μειώσει δραματικά την υγρασία της καύσιμης ύλης μπορεί να οδηγήσει σε συνθήκες σφοδρότητας ιδιαίτερα υψηλές και αντίξοες.



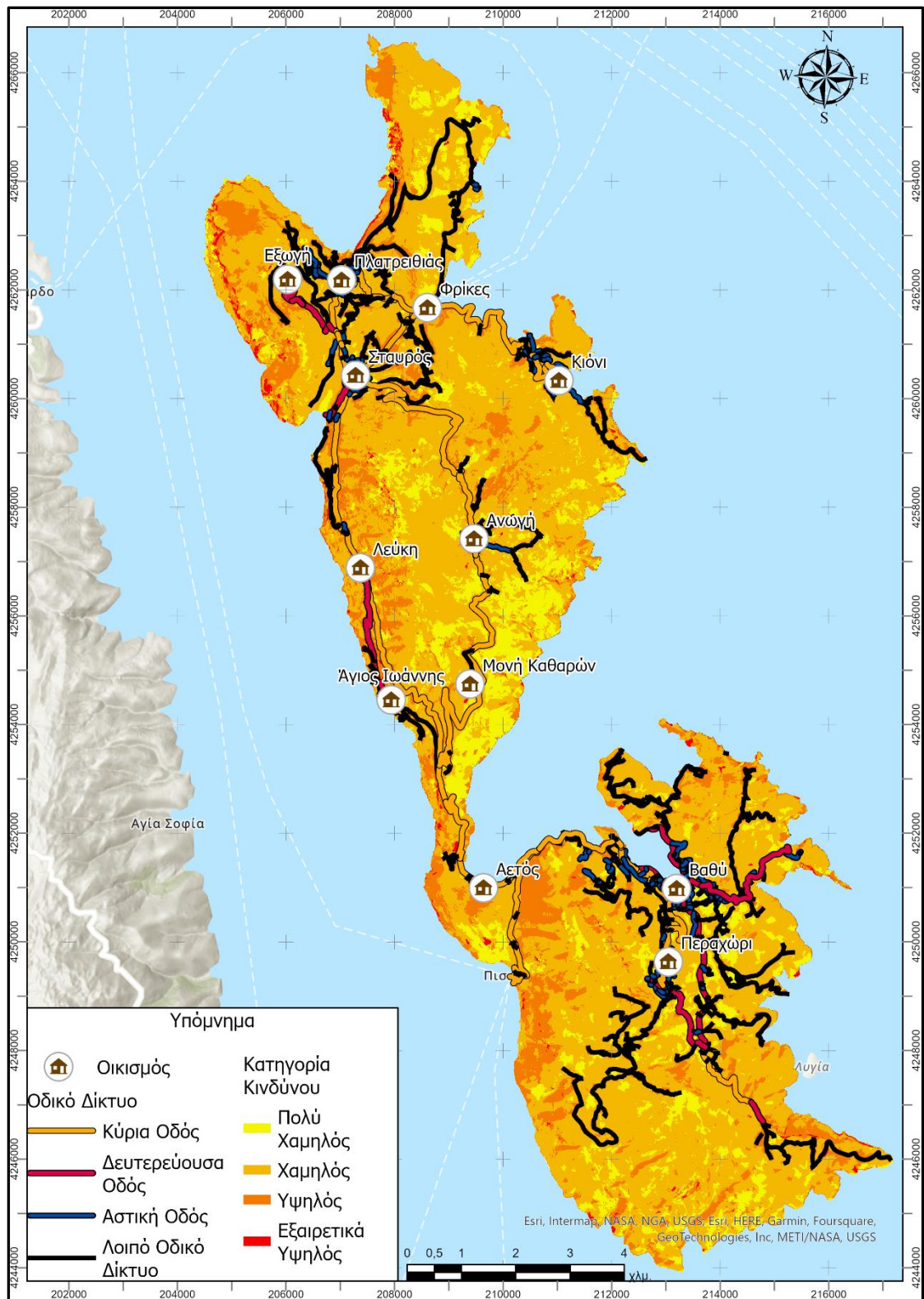
Εικόνα 35. Διακύμανση των ποσοστών της έκτασης του νησιού στις δυο βασικές κατηγορίες κινδύνου για κάθε ένα από τα σενάρια.



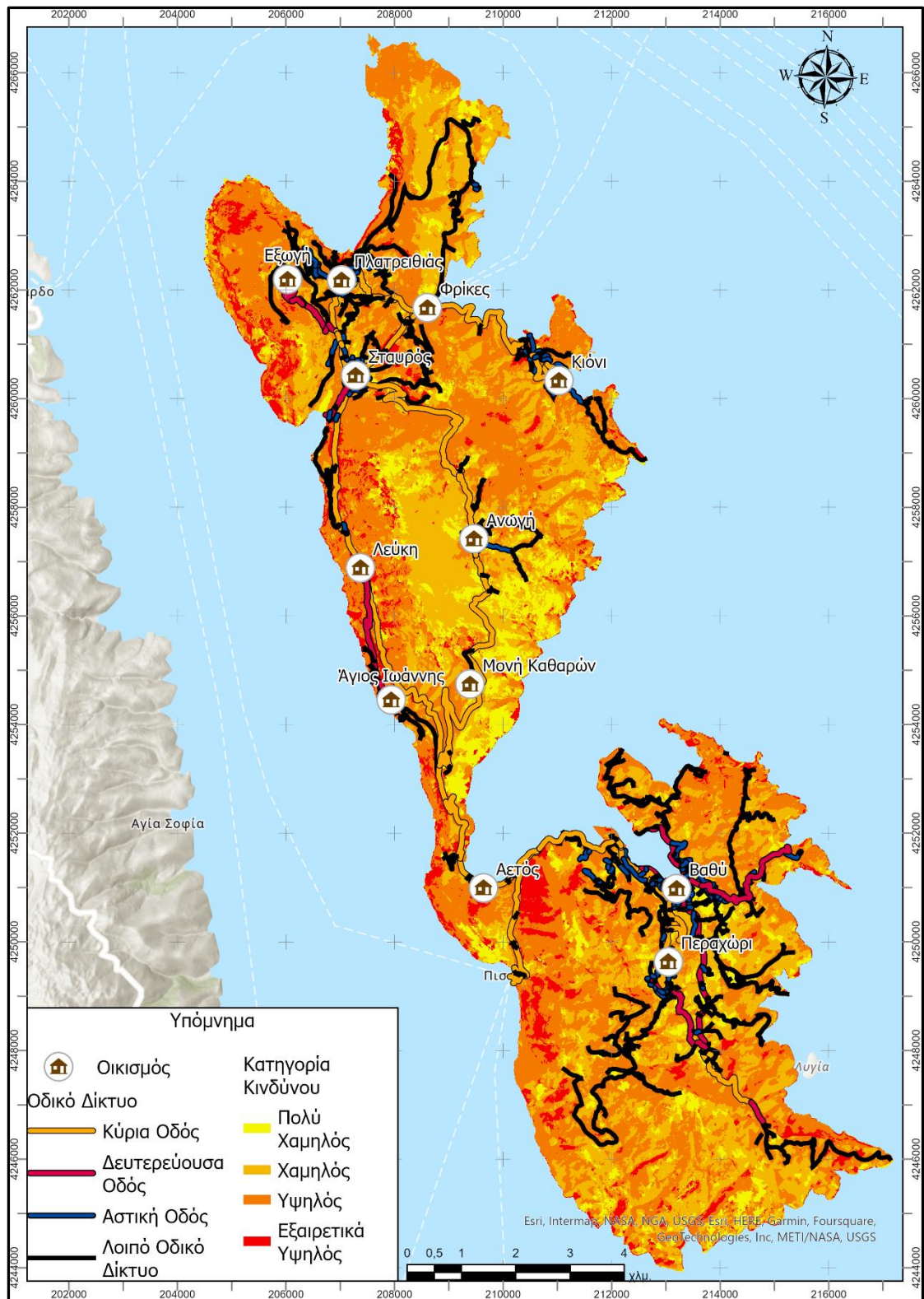
Εικόνα 36. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθηκών ανέμου (3 Bft) και υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο i)



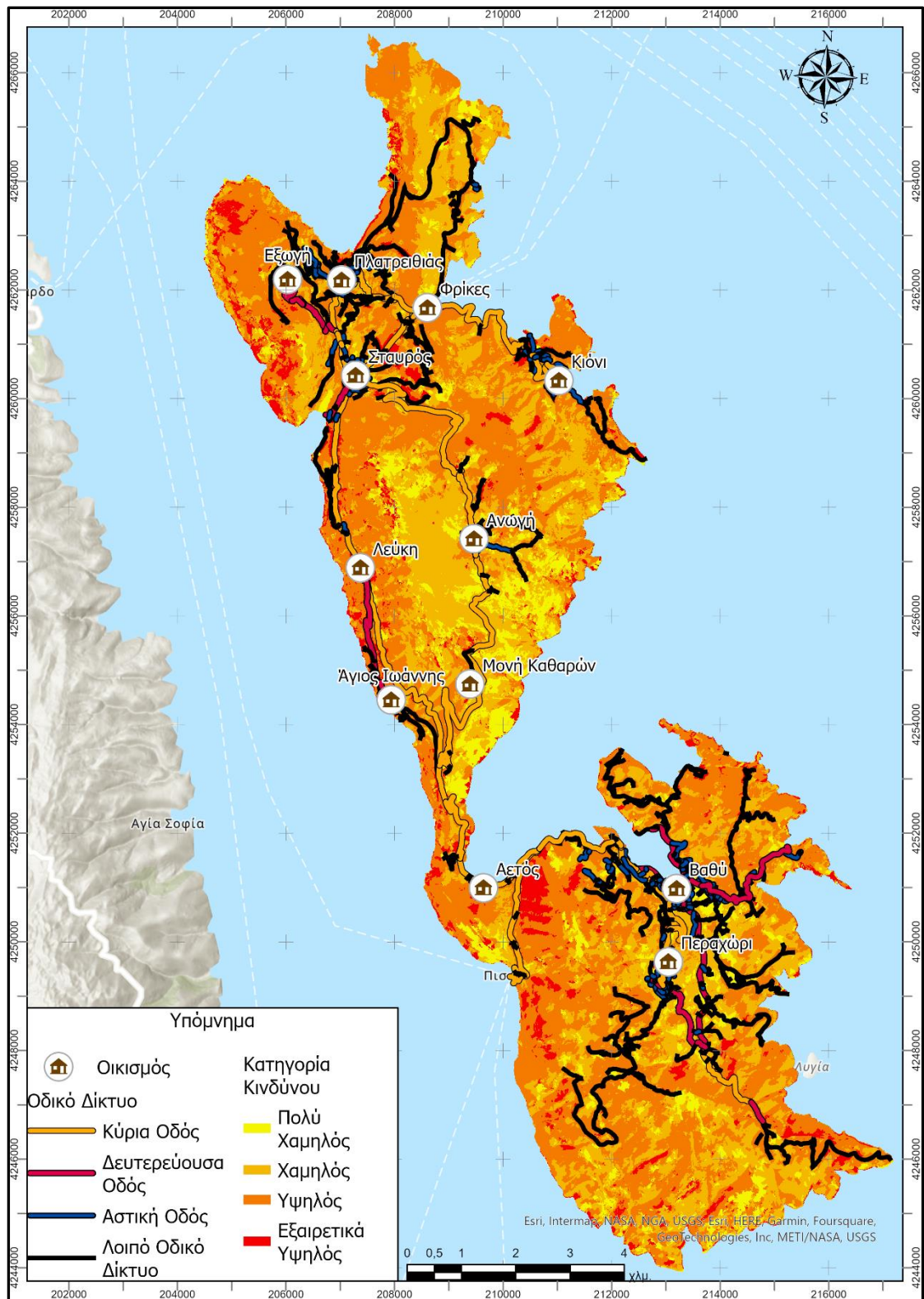
Εικόνα 37. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό το σενάριο των συνήθως επικρατούντων συνθηκών ανέμου (3 Bft) και παρατεταμένης ξηροθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης (Σενάριο ii)



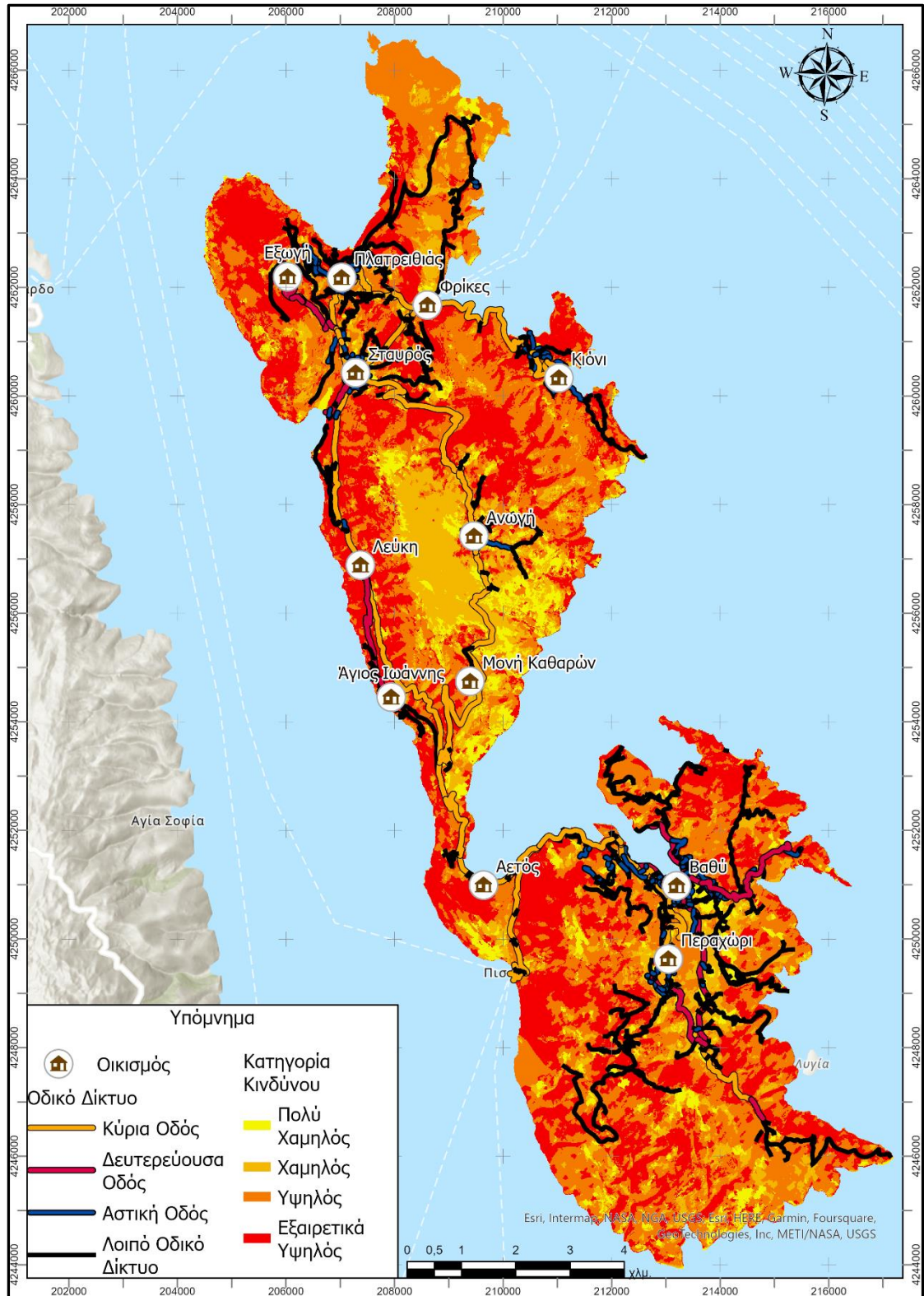
Εικόνα 38. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο iii)



Εικόνα 39. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (5 Bft) παρατεταμένης ηλιοθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης (Σενάριο iv)



Εικόνα 40. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό συνθήκες εξαιρετικά ισχυρού ανέμου (7 Bft) και κανονικές συνθήκες υγρασίας καύσιμης ύλης (Σενάριο ν)



Εικόνα 41. Δείκτης Κινδύνου Πυρκαγιάς (FDI) υπό συνθήκες ισχυρού ανέμου (7 Bft) παρατεταμένης ηλιοθερμικής περιόδου με χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης (Σενάριο vi)

4. Συμπεράσματα

Όπως προκύπτει από όλα τα στοιχεία που παρουσιάστηκαν στα παραπάνω κεφάλαια το νησί της Ιθάκης υπό τις συνήθως επικρατούσες συνθήκες ανέμου (3 bft) αντιμετωπίζει έναν σχετικά χαμηλό κίνδυνο εκδήλωσης υψηλής σφοδρότητας πυρκαγιάς, ακόμα και αν έχει προηγηθεί μια παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο η οποία έχει οδηγήσει σε σημαντική μείωση της υγρασίας της καύσιμης ύλης. Ο συνδυασμός ωστόσο ευνοϊκών για την πυρκαγιά συνθήκων ανέμου και μια παρατεταμένη ξηροθερμική περίοδο καθιστά το σύνολο σχεδόν του νησιού ιδιαίτερα ευάλωτο σε μια υψηλής σφοδρότητας πυρκαγιά.

Η όποια αξιολόγηση της επικινδυνότητας θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη και τις ιδιαίτερες συνθήκες του νησιού το οποίο χαρακτηρίζεται από ένα ιδιαίτερα έντονο ανάγλυφο αλλά και με ένα σχετικά αραιό δίκτυο δρόμων. Αυτό δεν είναι απαραίτητα κακό αφού μειώνει την πιθανότητα εκδήλωσης μιας πυρκαγιάς από ανθρωπογενή αίτια. Δυσκολεύεις βέβαια και την πρόσβαση εάν μια πυρκαγιά συμβεί. Με δεδομένη τη γεωγραφία του νησιού και τα μέσα πυρόσβεσης που υπάρχουν στην περιοχή θα μπορούσε κάποιος να πει ότι η προστασία του νησιού από πυρκαγιές εξαρτάται αποκλειστικά από τον χρόνο αναγγελίας και την ταχύτητα της πρώτης προσβολής. Εάν οι πυροσβεστικές δυνάμεις του νησιού εξοπλιστούν με μικρά και ευέλικτα οχήματα πρώτης προσβολής τα οποία θα βρίσκονται σε συνεχή περιπολία τόσο στο νότιο όσο και στο βόρειο τμήμα του νησιού, τότε η πιθανότητα εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς και μετατροπής της σε μη αντιμετωπίσιμη μειώνεται δραματικά. Παράλληλα θα πρέπει να υπάρχουν και υδροφόρα οχήματα μεγαλύτερης χωρητικότητας για την αντιμετώπιση μεγαλύτερων συμβάντων.

Κανένα μέτρο διαχείρισης δασικών πυρκαγιών δεν θα είναι ποτέ επαρκές αν δεν συνεπικουρείται από την υποστήριξη της κοινωνίας και ιδιαίτερα της τοπικής κοινωνίας. Η πρόσφατη εμπειρία αποδεικνύει περίτρανα ότι η λύση δεν βρίσκεται στον αποκλεισμό της αλλά στην ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού σχεδίου που θα καθιστά την τοπική κοινωνία το βασικότερο φορέα πυροπροστασίας ενός τόπου. Θετικά παραδείγματα υπάρχουν πολλά, τόσο στην Ελλάδα όσο και αλλού αλλά υπάρχουν επίσης και καλές πρακτικές.

5. Βιβλιογραφία

- Bock, M.; Xofis, P.; Rossner, G.; Wissen, M.; Mitchley, J. (2005). Object oriented methods for habitat mapping in multiple scales: case studies from Northern Germany and North Downs, GB. *J. Nat. Conserv.*, 13, 75–89.
- Bond, W.J. & Midgley, J.J. (1995). Kill thy neighbour: an individual based argument for the evolution of flammability. *Oikos*, 73, 79-85.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Mach. Learn.* 45, 5-32.
- Buckley, R. (1983). The role of fire in maintaining a small-scale vegetation gradient: a test of Mutche's hypothesis. *Oikos*, 41, 291-292.
- Buckley, R. (1984). The role of fire: response to Snyder. *Oikos*, 43, 405-406.
- Byram, G. M. (1959). Combustion of forest fuels. In *Forest fire: control and use*; Davis, K. P., Ed; McGraw-Hill Book Company, New York, USA, pp. 61-89.
- Chandler, C.; Cheney, P.; Thomas, P.; Trabaud, L.; Williams, D. (1983). *Fire in Forestry. Volume I. Forest Fire Behavior and Effects*; John Wiley & Sons: New York, USA,; pp 1-30.
- Drusch, M.; Del Bello, U.; Carlier, S.; Colin, O.; Fernandez, V.; Gascon, F.; Hoersch, B.; Isola, C.; Laberinti, P.; Martimort, P.; Meygret, A.; Spoto, F.; Sy, O.; Marchese, F.; Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens. Environ.*, 120, 25-36.
- FAO (2001). *Global Forest fire assessment,1990-2000: Mediterranean Sub-Region*, Rome.
- Finney, M. A. (1998). *FARSITE: Fire Area Simulator—model development and evaluation*. Res. Pap. RMRS-RP-4, Ogden,UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.
- Finney M.A. (2006). *An Overview of FlamMap Fire Modeling Capabilities*. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-41. 2006.
- Founda, D.; Giannakopoulos, C. (2009). The exceptionally hot summer of 2007 in Athens, Greece—A typical summer in the future climate? *Glob. Planet. Chang.*, 67, 227–236.
- Keramitsoglou, I.; Kiranoudis, C.T.; Sarimveis, H.; Sifakis, N. (2004). A multidisciplinary decision support system for forest fire crisis management. *Environ. Manage.* 33, 212–225.
- Keramitsoglou, I., Kontoes C, Sykioti, O., Sifakis, N., Xofis, P. (2008). Reliable, accurate and timely forest mapping for wildfire management using ASTER and Hyperion satellite imagery. *Forest Ecology and Management*, 255, 3556–3562
- Kim, M.; Madden, M.; Warner, T. (2009). Forest type mapping using object-specific texture measures from multispectral Ikonos imagery: segmentation quality and image classification issues. *Photogramm. Eng. Remote. Sens.*, 75, 819–829.

- Mutch, R.W. & Philpot, C.W. (1970). Relationship of silica content to flammability in grasses. *Forest Science*, 16, 64-65.
- Naveh, Z. (1975) The evolutionary significance of fire in the Mediterranean region. *Vegetatio*, 29, 199-208.
- Naveh, Z. & Dan, J. (1973). The Human Degradation of Mediterranean Landscapes in Israel. In *Mediterranean Type Ecosystems. Origin and Structure* (eds F. Di Castri & H.A. Mooney), Vol. 7, pp. 373-390. Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin.
- Rittl, T.; Cooper, M.; Heck, R.J.; Ballester, M.V.R. (2013). Object-based method outperforms per-pixel method for land cover classification in a protected area of the Brazilian Atlantic rainforest region. *Pedosphere*, 23, 290–297.
- Rothermel, R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Research Paper INT-115. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- Rundel, P.W. (1981a). Structural and chemical components of flammability. In *Proceedings of the conference: Fire Regime and Ecosystem properties* (eds H.A. Mooney, T.M. Bonnicksen, N.L. Christensen, J.E. Lotan & W.A. Reiners). USDA Forest Service General Technical Report WO-26, Honolulu, Hawaii.
- Schwilk, D.W. & Kerr, B. (2002). Genetic niche-hiking: an alternative explanation for the evolution of flammability. *Oikos*, 99, 421-442.
- Snyder, J.R. (1984). The role of fire: Much ado about nothing? *Oikos*, 43, 404-405.
- Stratton, R. (2004). Assessing the effectiveness of landscape fuel treatments on fire growth and behaviour. *Journal of Forestry*, 102, 32-40
- Suc, J.P. (1984). Origin and evolution of the Mediterranean vegetation and climate in Europe. *Nature*, 307, 429-432.
- Tolika, K.; Maheras, P.; Tegoulas, I. (2009). Extreme temperatures in Greece during 2007: Could this be a “return to the future”? *Geophys. Res. Lett.*, 36
- Trabaud, L. (1987). Fire and the survival traits of plants. In *The role of fire in ecological systems* (ed L. Trabaud), pp. 65-89. SPB Academic publishing, The Hague.
- Trabaud, L. (1994). Postfire Plant Community Dynamics in the Mediterranean Basin. In *The Role of Fire in Mediterranean-Type Ecosystems* (eds J.M. Moreno & W.C. Oechel), Vol. 107, pp. 1-15. Springer-Verlag, New York.
- Trimble (2014). Ecognition Developer Reference Book. Trimble Documentation, Munich, Germany.
- Troumbis, A.Y. & Trabaud, L. (1989). Some questions about flammability in fire ecology. *Acta Oecologica-Oecologia Plantarum*, 10, 167-175.
- Vakalis, D.; Sarimveis, H.; Kiranoudis, C.T.; Alexandridis, A.; Bafas, G.V. (2004a). A GIS based operational system for wildland fire crisis management. I. Mathematical modelling and simulation. *Appl. Math. Model.* 28, 389–410.

- Vakalis, D.; Sarimveis, H.; Kiranoudis, C.T.; Alexandridis, A.; Bafas, G.V. (2004b). A GIS based operational system for wildland fire crisis management. II. System architecture and case studies. *Appl. Math. Model.* 28, 411–425.
- Whelan, R.J. (1995). *The Ecology of Fire*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Williamson, G.B. & Black, E.M. (1981). High temperature of forest fires under pines as a selective advantage over oaks. *Nature*, **293**, 643-644.
- Xofis, P.; Konstantinidis, P. ;Papadopoulos, I.; Tsiourlis, G. (2020). Integrating Remote Sensing Methods and Fire Simulation Models to Estimate Fire Hazard in a South-East Mediterranean Protected Area. *Fire*, 3, 31
- Xofis, P.; Konstantinidis, P.; Tsiourlis, G. (2020). A Fire Danger Index for the early detection of areas vulnerable to wildfires in the Eastern Mediterranean region. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 5:32