



Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Τμήμα Γεωγραφίας



Κοινωφελές Ίδρυμα
Ιωάννη Σ. Λάτση

Μελέτη	Χαρτογράφηση και Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση Καύσιμης Ύλης για Διαχείριση Πυρκαγιών με Χρήση Δορυφορικών Εικόνων Υψηλής Ανάλυσης και Εργαλείων Γεωπληροφορικής
Διάρκεια	28.01.2008 – 28.01.2009
Παραδοτέο	Ενδιάμεση Έκθεση
Δωρητής	John S. Latsis Public Benefit Foundation
Δωρεοδόχος	Ειδικός Λογαριασμός Έρευνας Πανεπιστημίου Αιγαίου
Μελετητής	Όλγα Ν. Ρούσσου
Επιστημονικοί Υπεύθυνοι	Κώστας Καλαμποκίδης Νικόλαος Σουλακέλλης
Φορέας Υλοποίησης	Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου
Ημερομηνία Παράδοσης	26.01.2009

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	9
3. ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΟΥΣΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	11
3.1 Οργάνωση Βάσης Γεωγραφικών Δεδομένων - Δημιουργία Θεματικών Χαρτών	12
3.2 Εκτίμηση Βιομάζας – Αλλομετρικές εξισώσεις.....	25
3.3 Εκτίμηση βιομάζας από δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης.....	46
3.4 Συστήματα Μοντελοποίησης Καύσιμης Ύλης και Προσομοίωσης Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς.....	55
3.5 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης Περιοχής Μελέτης.....	69
3.6 Προσομοίωση Συμπεριφοράς και Χωρικής Εξάπλωσης Πυρκαγιάς.....	83
3.7 Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση.....	95
4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	112
5. ΛΟΙΠΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ.....	114
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	115
7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	122

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Ο ρόλος φυσικοχημικών ιδιοτήτων καύσιμης ύλης στη έναρξη και εξάπλωση δασικής πυρκαγιάς (NWCG,1981)	7
Σχήμα 2: Μεθοδολογία εκπόνησης παρούσας μελέτης	11
Σχήμα 3: Περιεχόμενη υγρασία καύσιμης ύλης σε διάφορες κατηγορίες ανά κλαδί δειγματοληψίας.	29
Σχήμα 4: Συνολική εκτίμηση βιομάζας δέντρων Τραχείας Πεύκης.....	30
Σχήμα 5: Ανίχνευση συσχέτισης της συνολικής βιομάζας κλαδιών με το ύψος που βρίσκονται τα κλαδιά από το έδαφος.....	31
Σχήμα 6: Συσχέτιση βιομάζας κόμης (χωρίς κορμό) και συνολικής βιομάζας κόμης με ηλικία δέντρου Τραχείας Πεύκης.	33
Σχήμα 7: Απεικόνιση της μεθοδολογίας επιλογής δειγματοληπτικών επιφανειών διαστάσεων 1x1m και καταγραφής των χαρακτηριστικών της βλάστησης	35
Σχήμα 8: Ενεργή βιομάζα σε σχέση με το ύψος και την κάλυψη των θάμνων.	37
Σχήμα 9: Ενεργή βιομάζα (ALOAD) σε σχέση με τα γινόμενα HGTCOV, HGTCOV2, HGTCOVV, HGTCOVV2 των θάμνων.....	39
Σχήμα 10: Διαγράμματα διασποράς βιομάζας θάμνων με κάλυψη - ύψος θάμνων .	42
Σχήμα 11: Διαγράμματα διασποράς βιομάζας θάμνων με κάλυψη - ύψος θάμνων .	44
Σχήμα 12: Μεθοδολογία εκτίμησης βιομάζας δέντρων μέσω δορυφορικών εικόνων	47
Σχήμα 13: Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του NDVI	48
Σχήμα 14: Ανίχνευση συσχέτισης συνολικής βιομάζας θάμνων με δείκτη NDVI.....	53
Σχήμα 15: Μήκος φλόγας (Andrews, 1986).....	58
Σχήμα 16: Διάγραμμα Πυρικών Χαρακτηριστικών (Rothermel and Andrews, 1982)	60
Σχήμα 17: Απεικόνιση της αρχής του Huygens χρησιμοποιώντας μικρά ελλειπτικά κύματα: (α) σε σταθερές συνθήκες χρησιμοποιούνται μικρά κύματα σταθερού σχήματος και μεγέθους για να διατηρηθεί το ελλειπτικό σχήμα της φωτιάς στο χρόνο, (β) σε μεταβαλλόμενες συνθήκες φαίνεται η εξάρτηση του μεγέθους του μικρού κύματος από το μοντέλο καύσιμης ύλης και την επιρροή που ασκεί το διάνυσμα άνεμος-κλίση στο σχήμα και τον προσανατολισμό του κύματος (Finney 1998)	65
Σχήμα 18: Θεματικές επιφάνειες που απαιτούνται για προσομοίωση στο FARSITE (Finney, 1998).....	66
Σχήμα 19: Διαγράμματα μεταβολής ταχύτητας διάδοσης, μήκους φλόγας και θερμικής έντασης πυρκαγιάς του M.K.Y. SH_K1 με τον άνεμο στα τρία σενάρια υγρασίας	78
Σχήμα 20: Διαγράμματα μεταβολής ταχύτητας διάδοσης, μήκους φλόγας και θερμικής έντασης πυρκαγιάς του M.K.Y. SH_K2 με τον άνεμο στα τρία σενάρια υγρασίας	79
Σχήμα 21: Διαγράμματα μεταβολής ταχύτητας διάδοσης, μήκους φλόγας και θερμικής έντασης πυρκαγιάς του M.K.Y. SH_K3 με τον άνεμο στα τρία σενάρια υγρασίας	80
Σχήμα 22: Αποτελέσματα προγράμματος BehavePlus v.3 από τη σύγκριση του τοπικού M.K.Y με τα πρότυπα M. K.Y. θάμνων της Αμερικής.....	81
Σχήμα 23: Περίμετρος και απόσταση εξάπλωσης της πυρκαγιάς (Andrews, 2004)	85

Σχήμα 24: Διάγραμμα πυρικών χαρακτηριστικών στο σημείο έναρξης πυρκαγιάς ..	87
Σχήμα 25: Οι παράμετροι συμπεριφοράς πυρκαγιάς σε μορφή διαγραμμάτων	88
Σχήμα 26: Διάγραμμα πυρικών χαρακτηριστικών προσομοίωσης πυρκαγιάς.....	93
Σχήμα 27: Μεθοδολογία τρισδιάστατης απεικόνισης γεωγραφικών δεδομένων σε τρεις διαφορετικές κλίμακες.	97
Σχήμα 28: Μεθοδολογία συλλογής δεδομένων θάμνου με άμεση μη-καταστροφική δειγματοληψία (Roussou et al., 2008)	99

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1: Περιοχή μελέτης Χερσονήσος Αμαλή, Ν. Λέσβος, Ελλάδα.	10
Χάρτης 2: Χάρτης Υψομέτρου	15
Χάρτης 3: Χάρτης Κλίσεων	16
Χάρτης 4: Χάρτης Εκθέσεων	17
Χάρτης 5: Γεωλογικός Χάρτης περιοχής μελέτης.....	18
Χάρτης 6: Χάρτης Ιστορικού Πυρκαγιών (1971 - 2007).....	19
Χάρτης 7: Χάρτης Υποδομών	20
Χάρτης 8: Χάρτης Χρήσεων γης από QuickBird 2.8 m.....	21
Χάρτης 9: Χάρτης Χρήσεων γης από συζευγμένη QuickBird 0.6 m	22
Χάρτης 10: Χάρτης Μοντέλων Καύσιμης Ύλης από QuickBird 2.8 m	23
Χάρτης 11: Χάρτης Μοντέλων Καύσιμης Ύλης από συζευγμένη QuickBird 0.6 m ..	24
Χάρτης 12: Περιοχές δειγματοληψίας θάμνων και δέντρων στην περιοχή μελέτης .	26
Χάρτης 13: Αρχείο εξόδου του μοντέλου υπολογισμού του Δείκτη NDVI (QB 0.6m)	49
Χάρτης 14: Εκτίμηση βιομάζας μέσω του Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης ..	52
Χάρτης 15: Περιοχή ενδιαφέροντος στην κορυφή “Κουρτερή” Χερ/σου Αμαλής....	106

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Βασικά στατιστικά στοιχεία από δειγματοληψίες θάμνων	36
Πίνακας 2: Πίνακας συσχετίσεων της ενεργής βιομάζας με τις ανεξάρτητες μεταβλητές ύψους και κάλυψης θάμνων (Pearson 2-tailed).....	40
Πίνακας 3: Βασικά στατιστικά στοιχεία μετρήσεων βιομάζας δέντρων και κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης της περιοχής μελέτης.....	50
Πίνακας 4: Τα Μ.Κ.Υ. που αναπτύχθηκαν για το σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς BEHAVE (Andrews,1986) και η προσαρμογή τους στις συνθήκες της ελληνικής βλάστησης (Kalabokidis, 2004).	56
Πίνακας 5: Τα πρότυπα Μ.Κ.Υ. που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο διάδοσης πυρκαγιάς του Rothermel (Scott and Burgan,2005).....	56
Πίνακας 6: Αντιστοίχιση των τιμών του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες καταστολής μίας πυρκαγιάς	60
Πίνακας 7: Αντιπροσωπευτικές τιμές λόγου SA/V, υγρασίας σβησίματος και θερμοχωρητικότητας των πρότυπων Μ.Κ.Υ της Αμερικής (Andrews et al., 2004) ...	74
Πίνακας 8: Αντιπροσωπευτικές τιμές λόγου SA/V και θερμοχωρητικότητας για ορισμένα μεσογειακά είδη βλάστησης (Dimitrakopoulos and Panou, 2001)	74
Πίνακας 9: Αντιπροσωπευτικές τιμές λόγου SA/V ανά τάξη μεγέθους για ορισμένα μεσογειακά είδη βλάστησης (Dimitrakopoulos, 2001)	75
Πίνακας 10: Τιμές περιεχόμενης υγρασίας της νεκρής καύσιμης ύλης (%)	76
Πίνακας 11: Τιμές περιεχόμενης υγρασίας της ζωντανής καύσιμης ύλης (%)	77
Πίνακας 12: Τιμές εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (KJ/m ²) για τα Μ.Κ.Υ. SH_K1, SH_K2 και SH_K3 στα τρία σενάρια υγρασίας της	77
Πίνακας 13: Χρονοδιάγραμμα και μετεωρολογικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της 19 ^{ης} Ιουλίου 2006 πυρκαγιάς στη Χαραμίδα, Ν. Λέσβου.....	83
Πίνακας 14: Χαρακτηριστικά φωτιάς στο σημείο έναρξης (άνεμος 0km/h)	85
Πίνακας 15: Χαρακτηριστικά φωτιάς στο σημείο κύριας εξάπλωσης (άνεμος 17km/h).....	85
Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά φωτιάς στο σημείο μέγιστης εξάπλωσης (άνεμος 22km/h).....	86
Πίνακας 17: Περίμετρος και απόσταση εξάπλωσης φωτιάς σε δάσος κωνοφόρων για άνεμο 0km/h.....	86
Πίνακας 18: Απόσταση εξάπλωσης φωτιάς (m/h) για άνεμο 17 km/h	86
Πίνακας 19: Παρουσίαση αποτελεσμάτων FARSITE για περίμετρο και καμένη έκταση.....	93

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Το υποσύστημα μοντελοποίησης καύσιμης ύλης στο BehavePlus.....	63
Εικόνα 2: Τα βασικά χωρικά δεδομένα που απαιτούνται για τη συγκρότηση του ψηφιακού τοπίου	90
Εικόνα 3: Απεικόνιση της περιμέτρου της φωτιάς με οπτικό βήμα δύο ωρών δισδιάστατα (πάνω) και τρισδιάστατα (κάτω).....	92
Εικόνα 4: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης από τις τρεις κάμερες του προγράμματος 3D_VNS2.	97
Εικόνα 5: Απεικόνιση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την οπτικοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος.....	98
Εικόνα 6: Οπτικοποίηση της Χερσονήσου Αμαλής από μεγάλο υψόμετρο	100
Εικόνα 7: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση τμήματος της περιοχής μελέτης	101
Εικόνα 8: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση εναλλαγής διαφορετικών χρήσεων γης.....	101
Εικόνα 9: Απεικόνιση αστικής περιοχής με κύριο και δευτερεύον οδικό δίκτυο	102
Εικόνα 10: Απεικόνιση αραιού δάσους κωνοφόρων με δασικούς δρόμους.....	102
Εικόνα 11: Τρισδιάστατη απεικόνιση εναλλαγής αραιού -πυκνού δάσους κωνοφόρων.....	103
Εικόνα 12: Απεικόνιση ελαιώνα	103
Εικόνα 13: Τρισδιάστατη απεικόνιση εναλλαγής ελαιώνα με δάσος κωνοφόρων..	104
Εικόνα 14: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση χρήσεων γης στην κορυφή “Κουρτερή”...	107
Εικόνα 15: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση χρήσεων γης στην κορυφή “Κουρτερή”, σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα	107
Εικόνα 16: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 1)	108
Εικόνα 17: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 2)	109
Εικόνα 18: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 3)	109
Εικόνα 19: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 4)	110
Εικόνα 20: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 5)	110
Εικόνα 21: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 6)	111

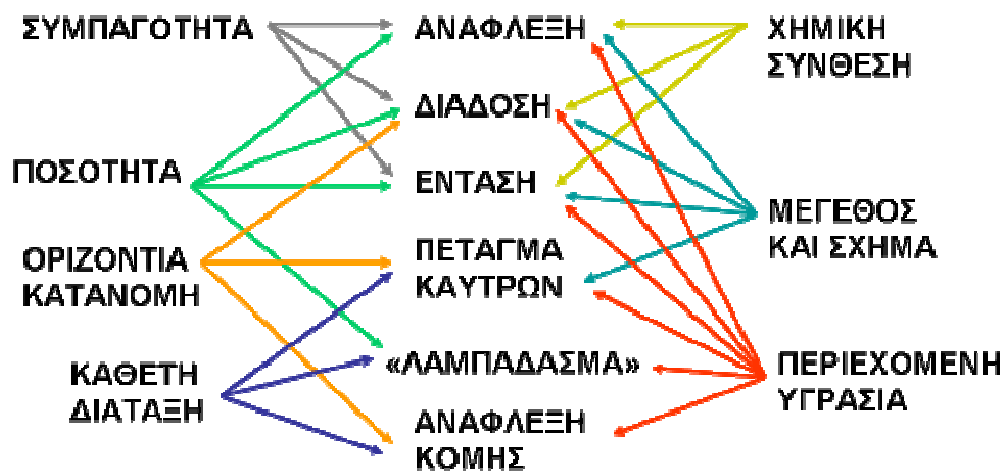
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στη Μεσογειακή Λεκάνη οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μια κύρια οικολογική διεργασία η οποία ασκεί σημαντική επίδραση στο φυσικό κύκλο διαδοχής της βλάστησης, στη δυναμική των φυσικών οικοσυστημάτων, καθώς και στη δομή και λειτουργία τους, ανάλογα των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών αυτών. Οι δασικές πυρκαγιές, σε ένα κατεξοχήν πυριγενές και φυσικό περιβάλλον από άποψη κλίματος, έντονου ανάγλυφου και ποικιλομορφίας βλάστησης, αποτελούν μία από τις σημαντικότερες φυσικές καταστροφές (Kozlowski and Ahlgren 1974, Pyne *et al.* 1996). Οι οικονομικές, κοινωνικές, οικολογικές, ατμοσφαιρικές και κλιματικές συνέπειες που συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με την εκδήλωση των πυρκαγιών, αναδεικνύουν τη σοβαρότητα του προβλήματος.

Οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν στην έναρξη, συμπεριφορά και εξάπλωση των δασικών πυρκαγιών είναι τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης (υφή, μέγεθος, συσσώρευση, κατανομή), η τοπογραφία (έκθεση, κλίση, υψόμετρο, διαμόρφωση εδάφους) και οι μετεωρολογικές συνθήκες (άνεμος, θερμοκρασία, σχετική υγρασία). Είναι γεγονός ότι σε περιβάλλον με παρόμοιο ανάγλυφο και καιρικές συνθήκες, ο κρίσιμος παράγοντας που καθορίζει την έναρξη και εξάπλωση μιας δασικής πυρκαγιάς, το μέγεθος, τη διάρκεια, και γενικότερα τις αρνητικές της επιπτώσεις στο φυσικό και κοινωνικοοικονομικό περιβάλλον, είναι το είδος, η πυκνότητα, η κατανομή και η ευφλεκτικότητα της βλάστησης. Η βλάστηση αποτελεί το μέσο που εκδηλώνεται μια πυρκαγιά, και συνεπώς η άριστη γνώση της ποιοτικής και ποσοτικής δομής της βλάστησης είναι σημαντικό στοιχείο σε κάθε σχεδιασμό αποδοτικής πυροπροστασίας είτε πρόληψη είτε καταστολή.

Ως καύσιμη ύλη χαρακτηρίζεται όλο το ζωντανό ή νεκρό οργανικό υλικό που υπάρχει είτε στο έδαφος (όπως φυλλόστρωμα, βελόνες, κλαδιά, κορμοί, χόρτα, θάμνοι, δενδρύλλια και δέντρα) είτε πάνω στα δέντρα (όπως κλαδιά, φύλλωμα, όρθια νεκρά δέντρα) που προκαλεί ή υφίσταται ανάφλεξη και καίγεται (Pyne *et al.*, 1996). Οι φυσικοχημικές ιδιότητες της καύσιμης ύλης αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που ελέγχουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς τόσο από άποψη εξάπλωσης όσο και εκλυόμενης θερμότητας (Σχήμα 1). Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης είναι το φορτίο της καύσιμης ύλης, το βάθος, ο λόγος επιφάνεια προς όγκο και η περιεχόμενη υγρασία. Περιεχόμενη υγρασία είναι το ποσό του νερού που περιέχεται στην καύσιμη, εκφράζεται ως ποσοστό επί του ξηρού της βάρους και είναι ιδιαίτερα σημαντική για όλες τις παραμέτρους της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς (ταχύτητα διάδοσης, θερμική ένταση του μετώπου, παραγωγή καπνού, θνησιμότητα). Η περιεχόμενη υγρασία μεταβάλλεται με διαφορετικό τρόπο και ρυθμό στη ζωντανή και τη νεκρή καύσιμη ύλη και η μεταβολή αυτή είναι κυρίως αποτέλεσμα της επίδρασης των μετεωρολογικών συνθηκών. Όσο πιο ομοιόμορφη και συνεχόμενη κατανομή της καύσιμης ύλης υπάρχει τόσο μεγαλύτερη και γρηγορότερη ανάφλεξη και πλήρη καύση αναμένεται, ενώ όσο πιο πολλά διάκενα βλάστησης υπάρχουν τόσο περισσότερες είναι οι αλλαγές στην ταχύτητα εξάπλωσης και την ένταση μιας πυρκαγιάς.

Για να διευκολυνθεί η περιγραφή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών όλων των "καυσίμων" που υπάρχουν σε μια περιοχή, αναπτύχθηκε η έννοια των μοντέλων καύσιμης ύλης (Anderson, 1982). «Μοντέλο Καύσιμης Ύλης» ορίζεται ως ένας προσομοιωμένος τύπος καύσιμης ύλης για τον οποίο έχουν καθοριστεί οι τιμές για όλες τις φυσικοχημικές μεταβλητές περιγραφής του που απαιτούνται για τη λύση του μαθηματικού μοντέλου διάδοσης της φωτιάς (Xanthopoulos and Manasi, 2002; Rothermel, 1972).



Σχήμα 1: Ο ρόλος φυσικοχημικών ιδιοτήτων καύσιμης ύλης στη έναρξη και εξάπλωση δασικής πυρκαγιάς (NWCG, 1981)

Σταθμό έχουν αποτελέσει τα δεκατρία (13) μοντέλα καύσιμης ύλης (ΜΚΥ) που αναπτύχθηκαν στην Αμερική για το Σύστημα Πρόβλεψης Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς BEHAVE (Anderson, 1982; Burgan and Rothermel, 1984; Andrews, 1986), όπου η ταξινόμηση της βλάστησης βασίστηκε σε επιτόπια μέτρηση της καύσιμης ύλης. Στη συνέχεια αναπτύχθηκαν άλλα είκοσι (20) ΜΚΥ, με επιπλέον παραμέτρους από τα αρχικά μοντέλα, για χρήση τους στο Εθνικό Σύστημα Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιών της Αμερικής (Burgan *et al.*, 1988). Σε μια προσπάθεια να γίνει μια πιο περιεκτική περιγραφή του υποστρώματος της δασικής καύσιμης ύλης δημιουργήθηκε ένα σύστημα ταξινόμησης της βλάστησης στις Η.Π.Α. που περιείχε πάνω από 200 ΜΚΥ (Sandberg *et al.* 2001). Στις μέρες μας, το πιο ολοκληρωμένο σύνολο πρότυπων μοντέλων καύσιμης ύλης αποτελείται από σαράντα (40) ΜΚΥ, που αποτελούν εξέλιξη των αρχικών 13 ΜΚΥ, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο διάδοσης δασικών πυρκαγιών του Rothermel (Scott & Burgan, 2005; Rothermel, 1972).

Η μοντελοποίηση της καύσιμης ύλης είναι μια πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί λεπτομερή ταξινόμηση της καύσιμης ύλης και μέτρηση των διαφόρων φυσικοχημικών ιδιοτήτων που την χαρακτηρίζουν στο πεδίο, ποσοτική εκτίμηση και μεθοδικότητα προκειμένου να μελετηθεί σε βάθος (Keane *et al.*, 2001). Το βασικότερο δεδομένο που απαιτείται για τη δημιουργία ενός μοντέλου καύσιμης ύλης είναι η ποσότητα της ζωντανής και νεκρής βιομάζας σε κλάσεις διαστάσεων αυτής (0-0,5 cm, 0,5-2,5 cm, 2,5-7,5 cm και >7,5 cm). Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για τη συγκέντρωση των απαραίτητων στοιχείων όσον αφορά τις τιμές των παραμέτρων της καύσιμης ύλης είναι η δειγματοληπτική μέτρηση αυτής (Brown *et al.*, 1982). Η δειγματοληπτική διαδικασία μπορεί να είναι είτε άμεση είτε έμμεση. Η άμεση δειγματοληπτική διαδικασία μπορεί να είναι:

- α) *καταστροφική*, όπου όλη η καύσιμη ύλη αποψιλώνεται με σκοπό την αποτίμηση του φορτίου καύσιμης ύλης και τη μέτρηση των υπόλοιπων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών της. Οι περιοχές δειγματοληψίας επιλέγονται σε σχήμα (τετράγωνο, ορθογώνιο ή κύκλο) και μέγεθος, ανάλογα με την διάσπαση της καύσιμης ύλης που λαμβάνεται ως δείγμα (Maxweel and Ward 1981; Brown *et al.*, 1982; Etienne, 1989),
- β) *μη-καταστροφική*, όπου η μέτρηση της καύσιμης ύλης γίνεται σε διατομές (εγκάρσιες ή ζώνης) με σκοπό την εκτίμηση της σύνθεσης και της δομής των φυτικών κοινωτών (Brown, 1970b, 1974; Brown 1981; Etienne and Legrand, 1994).

Η έμμεση δειγματοληπτική διαδικασία για την εκτίμηση βιομάζας μπορεί να επιτευχθεί με: α) *τεχνικές διαβαθμισμένης οπτικής εκτίμησης*. Η γρήγορη και σχετική εκτίμηση του βάρους βασίζεται σε φωτογραφίες-κλειδιά, μέθοδο photo-series (Catchpole and Wheeler, 1992; McCarthy *et al.*, 1998).

β) *αλλομετρικές εξισώσεις*, λαμβάνοντας υπόψη πραγματικά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί στο πεδίο. Η εκτίμηση της βιομάζας βασίζεται στην καθιέρωση μιας εξίσωσης, όπου συσχετίζεται η μεταβλητή της καύσιμης ύλης που μας ενδιαφέρει με ανεξάρτητες μεταβλητές που είναι εύκολα μετρήσιμες, όπως κάλυψη, ύψος, βάθος, ηλικία (Porte *et al.*, 2002; Cruz *et al.*, 2003; Xanthopoulos and Manasi, 2002; Xiao and Ceulemans, 2004; Wang, 2006).

γ) *συστήματα LIDAR*, μία από τις ακριβότερες και πιο αξιόπιστες μεθόδους, όπου χρησιμοποιούνται διάφορες οπτικές τεχνικές (laser) για εκτίμηση της κάλυψης των δέντρων, της κόμης των δέντρων, της πυκνότητας, της εναέριας βιομάζας και ανάλυση κάθε δέντρου ξεχωριστά (Lefsky *et al.*, 1999; Means *et al.*, 1999; Naesset and Okland, 2002; Brandtberg *et al.*, 2003; Morsdorf *et al.*, 2004; Anderson *et al.*, 2005; Falkowski *et al.*, 2006). Η συγκεκριμένη μέθοδος δεν έχει αξιόπιστα μέχρι στιγμής αποτελέσματα για εκτίμηση βιομάζας θάμνων.

Ορισμένα παραδείγματα δημιουργίας Τοπικών Μ.Κ.Υ. στη Μεσόγειο καταγράφονται στη βιβλιογραφία για Ελλάδα, Ισπανία, Πορτογαλία (Dimitrakopoulos *et al.*, 2001; ADAI 2000; Hernando *et al.*, 1995). Συγκεκριμένα, για την περιοχή της Ελλάδας επιλέχθηκαν 181 σημεία δειγματοληψίας ανάλογα με την ποικιλομορφία και την έκταση των Μεσογειακών συμπλεγμάτων της καύσιμης ύλης στα επιμέρους γεωγραφικά διαμερίσματα της χώρας μας. Έγινε στατιστική ανάλυση των τιμών των ιδιοτήτων της καύσιμης ύλης, εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ανάλυσης κατά ομάδες (cluster analysis), για την ταξινόμηση των φωτοσειρών σε επτά αντιπροσωπευτικά μοντέλα καύσιμης ύλης. Βέβαια επιπρόσθετες δειγματοληψίες αναμένεται να επιτρέψουν την επαλήθευση, διαφοροποίηση ή επαύξηση αυτών των μοντέλων μελλοντικά.

Η ακριβής και πλήρης χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης έχει ουσιαστική σημασία για τη διαχείριση πυρκαγιών, ιδιαίτερα για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας μιας πυρκαγιάς και του κινδύνου εμφάνισής της στο χώρο καθώς και την προσομοίωση της εξάπλωσης και της έντασής της κατά μήκος του τοπίου (Keane *et al.*, 2001). Η χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης μπορεί να λάβει χώρα σε διάφορες κλίμακες. Οι μεγάλης κλίμακας χάρτες καύσιμης ύλης (coarse scale fuel maps) σχετίζονται με την εκτίμηση κινδύνου πυρκαγιάς σε παγκόσμιο, εθνικό και περιφερειακό επίπεδο προκειμένου να επιτευχθεί πιο αποτελεσματικός σχεδιασμός, καταμερισμός και κινητοποίηση των δυνάμεων καταστολής σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια διαστήματα αξιολόγησης (Chuvieco and Martin 1994; Simard 1996; Burgan *et al.*, 1998; Klaver *et al.*, 1998; de Vasconcelos *et al.*, 1998). Οι ψηφιακοί χάρτες καύσιμης ύλης περιφερειακής κλίμακας (mid-scale or regional-scale digital fuel maps) συμβάλλουν στην εκτίμηση της «υγείας» ενός οικοσυστήματος, στον εντοπισμό και την αξιολόγηση της καύσιμης ύλης αναφορικά με τη διαχείρισή της, και στην εκτίμηση κινδύνου πυρκαγιάς (Salas and Chuvieco 1994; Chuvieco *et al.*, 1997). Οι χάρτες της καύσιμης ύλης σε κλίμακα τοπίου (fine scale or landscape level fuel maps) είναι σημαντικοί στην διαχείριση πυρκαγιάς σε τοπικό επίπεδο (Chuvieco and Congalton 1989; Maselli *et al.*, 1996).

Οι δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης και διακριτικής ικανότητας αποτελούν σήμερα τα σημαντικότερα δεδομένα τηλεπισκόπησης, καθώς επιδέχονται από το χρήστη κάθε είδους επεξεργασία, με τελικό σκοπό την εξαγωγή όσο το δυνατό ποιοτικής και ποσοτικής πληροφορίας σχετικά με τα χαρακτηριστικά του ανάγλυφου και της κάλυψης της γης. Χρήσιμο εργαλείο της γεωπληροφορικής για την απεικόνιση γεωγραφικών δεδομένων αποτελεί η τρισδιάστατη οπτικοποίηση. Η «γεωγραφική οπτικοποίηση», ή «γεω-οπτικοποίηση» (geovisualization), όπως συχνά αναφέρεται, συνδυάζει υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες και συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών και επικεντρώνεται στην τρισδιάστατη προβολή των χωρικών δεδομένων, αυξάνοντας τον επιδιωκόμενο βαθμό ρεαλισμού. Η γεω-οπτικοποίηση μπορεί να εφαρμοσθεί σε όλα τα στάδια της επίλυσης προβλημάτων

στη γεωγραφική ανάλυση, όπως ανάπτυξη σεναρίων, ανάλυση, παρουσίαση αποτελεσμάτων και αξιολόγηση (Buckley *et al.*, 2000). Συνεπώς, οι νέες τεχνολογίες της Γεω-Πληροφορικής μπορούν να συμβάλλουν στην αποτελεσματικότερη οργάνωση της προστασίας του περιβάλλοντος με τον έγκαιρο εντοπισμό και εκτίμηση των κινδύνων, τη συστηματική παρακολούθηση των βιοφυσικών και κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων και την υποστήριξη των αποφάσεων διαχείρισης.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο νότιο ανατολικό άκρο της Λέσβου και καλύπτει όλη τη Χερσόνησο Αμαλή (Χάρτης 1). Η έκταση που καλύπτει είναι περίπου 10 Km² και περιλαμβάνει το Δημόσιο Δάσος Κρατήγυ, ιδιωτικά δασοτεμάχια και αγροκτήματα. Το Δημόσιο Δάσος Κρατήγυ βρίσκεται περίπου 15 km νότια της πόλης της Μυτιλήνης προς το ακρωτήριο Αγριλιά, σε σειρά λόφων που εκτείνονται από Ν.-Ν.Α. προς Β.-Β.Δ. και εκτείνεται σε υψόμετρο που κυμαίνεται από 5 m ως 547 m. Παραθαλάσσιες εκτάσεις και λοφώδεις σειρές καθορίζουν την περιοχή ενδιαφέροντος που χαρακτηρίζεται από ποικιλομορφία αναγλύφου.

Στην περιοχή μελέτης απαντάται τεκτονικό κάλυμμα των οφιολιθικών πετρωμάτων που καταλαμβάνει σημαντικό τμήμα του κεντρικού τμήματος του νησιού καθώς και την χερσόνησο Αμαλή. Τα βασικά πετρώματα είναι πυριγενή όπως περιδοτίτες, πυροξενο-περιδοτίτες και ολιβινίτης. Τα πετρώματα αυτά με την διαδικασία της σερπεντινίωσης μεταμορφώνονται σε μεταμορφωσιγενή. Ο βαθμός σερπεντινίωσης είναι μεταβλητός. Μικρές αποφύσεις των πετρωμάτων διεισδύουν κατά θέσεις μέσα στον περμο-λιθανθρακοφόρο μαρμαρο-σχιστολιθικό σχηματισμό.

Η βλάστηση της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται από φρύγανα, θαμνότοπους, μακκία βλάστηση, ελαιώνες, χορτολιβαδικές εκτάσεις και πευκοδάσος. Τα φρύγανα αναπτύσσονται σε ξηρές περιοχές και σε περιοχές όπου η φωτιά και η βόσκηση έχουν υποβαθμίσει την υπάρχουσα βλάστηση. Απαρτίζονται από αραιούς και χαμηλούς θάμνους με μικρά και συχνά χνουδωτά φύλλα, αγκαθωτά κλαδιά και είναι προσαρμοσμένοι στη θερινή ξηρασία. Κυρίαρχα είδη στα φρύγανα της περιοχής είναι η αστοιβή (*Sarcopoterium spinosum*), η λεβάντα (*Lavandula stoechas*), η αφάνα (*Genista acanthoclada*), οι λαδανιές (*Cistus creticus*, *Cistus savofolius*) κ.α.

Στη Μακκία βλάστηση κυριαρχούν οι αείφυλλοι σκληρόφυλλοι θάμνοι ύψους μέχρι 2-2,5 m με βαθιές ρίζες για να αντλούν το απαραίτητο νερό και μικρά δερματώδη φύλλα για να περιορίζουν τη διαπνοή το καλοκαίρι, όταν η ξηρασία γίνεται έντονη. Κυρίαρχα είδη είναι το πουρνάρι (*Quercus infectoria*), η κουμαριά (*Arbutus andrachnus*), ο σχίνος (*Pistacia lentiscus*), το φιλύκι (*Phillyrea media*), το ρείκι (*Erica Malipuliflora*), το αγριοκυπάρισσο (*Juniperus oxycedrus*) κ.α.

Μεγάλη έκταση της περιοχής μελέτης καλύπτεται από δάση κωνοφόρων (*Pinus brutia*) σε πυκνούς ή αραιούς σχηματισμούς. Τραχεία Πεύκη ηλικίας 20-25 ετών εμφανίζεται στην περιοχή μελέτης σε υψηλή συχνότητα με ή χωρίς υπόροφο θάμνων ή μικρών πεύκων. Λόγω του πλούσιου υπορόφου, το δάσος κωνοφόρων εμφανίζεται εξαιρετικά εύφλεκτο.

Σημαντικό ρόλο στη σύνθεση και την κατανομή της βλάστησης της περιοχής μελέτης διαδραμάτισαν οι τρεις μεγαλύτερες καταστροφικές πυρκαγιές των ετών 1977 (6.500 στρ), 1999 (1000 στρ.) και 2006 (6.700 στρ.).

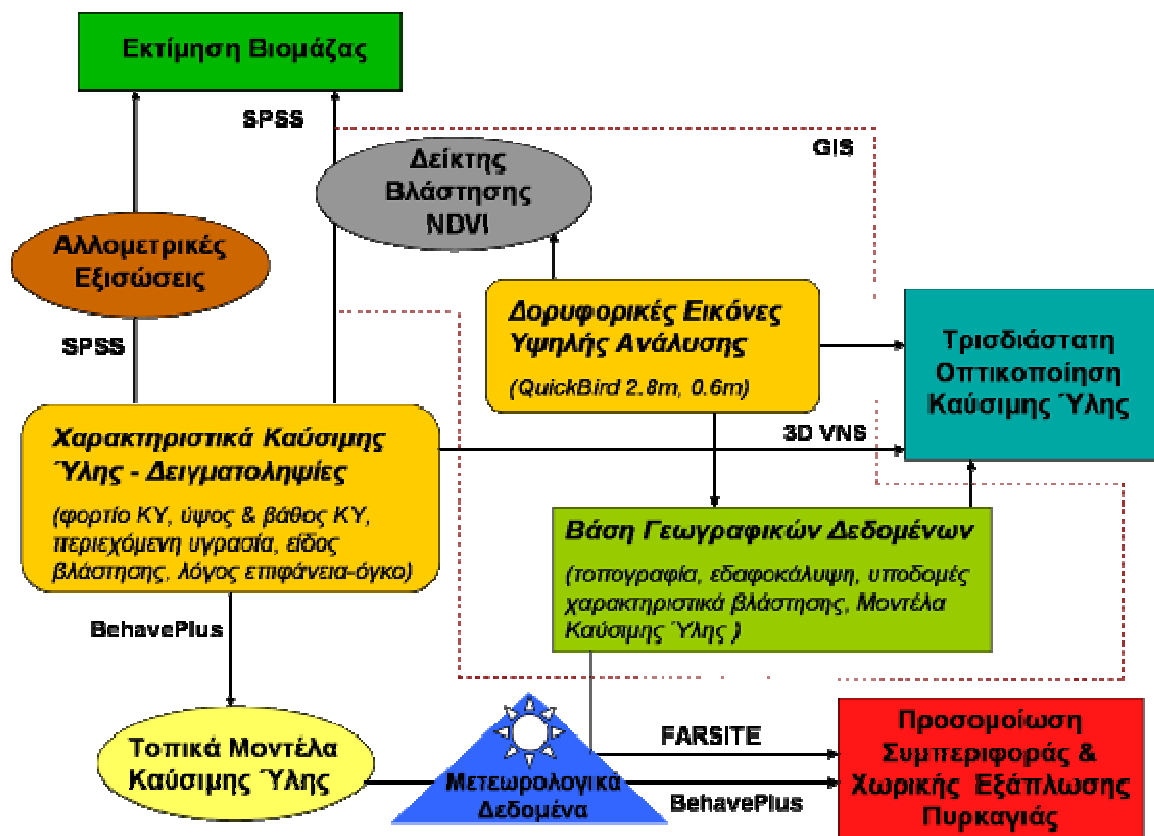


Χάρτης 1: Περιοχή μελέτης Χερσόνησος Αμαλή, Ν. Λέσβος, Ελλάδα.

3. ΣΤΟΧΟΙ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΟΥΣΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Οι στόχοι της παρούσας μελέτης περιελάμβαναν: (α) οργάνωση βάσης γεωγραφικών δεδομένων για δημιουργία ενημερωμένων θεματικών χαρτών της περιοχής μελέτης, (β) δημιουργία αλλομετρικών εξισώσεων για την εκτίμηση βιομάζας (θάμνων και δέντρων) λαμβάνοντας υπόψη λεπτομερή δεδομένα που έχουν συλλεχθεί με δειγματοληπτικές μεθόδους, (γ) εκτίμηση βιομάζας εκτίμησης χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης, (δ) δημιουργία μοντέλου καύσιμης ύλης αντιπροσωπευτικού για την περιοχή μελέτης, (ε) προσομοίωση συμπεριφοράς πυρκαγιάς που εκδηλώθηκε στις 19/07/2006 στην περιοχή μελέτης με τα προγράμματα BehavePlus 3.0 και FARSITE, και τέλος (στ) τρισδιάστατη οπτικοποίηση καύσιμης ύλης σε διάφορες κλίμακες, χρησιμοποιώντας πραγματικές μετρήσεις σε μορφή εικονικής πραγματικότητας και βίντεο.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την διεκπεραίωση της παρούσας μελέτης περιγράφεται συνοπτικά στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2: Μεθοδολογία εκπόνησης παρούσας μελέτης

3.1 Οργάνωση Βάσης Γεωγραφικών Δεδομένων - Δημιουργία Θεματικών Χαρτών

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.) είναι υπολογιστικά συστήματα σχεδιασμένα για να υποστηρίξουν τη συλλογή, διαχείριση, επεξεργασία, ανάλυση, μοντελοποίηση και απεικόνιση δεδομένων που αναφέρονται στο χώρο και μεταβάλλονται στο χρόνο. Ο ρόλος των Σ.Γ.Π. στις διάφορες εφαρμογές (κοινωνικοοικονομικές, περιβαλλοντικές, διαχείρισης κ.α.) είναι να προσφέρουν στους χρήστες και υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων ισχυρά εργαλεία για την επίλυση των σύνθετων και όχι πάντα πλήρως δομημένων χωρικών προβλημάτων (Στεφανάκης, 2003).

Τα διάφορα στοιχεία που καταχωρούνται σε ένα Σ.Γ.Π. πρέπει να είναι οργανωμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπουν, με το μικρότερο δυνατό κόστος (σε χρήμα και χρόνο), τη λήψη όλων των πληροφοριών που χρειάζονται οι χρήστες ή οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων. Βάση δεδομένων ενός συστήματος πληροφοριών είναι μια κατάλληλα συνδυασμένη συγκέντρωση ορισμένων αρχείων του συστήματος με σκοπό τη δημιουργία ενός νέου, πιο αποτελεσματικού και λειτουργικά ολοκληρωμένου αρχείου, χωρίς περιττές επαναλήψεις στοιχείων, με δυνατότητα εξυπηρέτησης πολλαπλών εφαρμογών - αναγκών και του οποίου τα στοιχεία αποθηκεύονται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ανεξάρτητα από τα προγράμματα που τα χρησιμοποιούν (Μανιάτης, 1996).

Σε μια προσπάθεια οργάνωσης, συλλογής και επεξεργασίας απαραίτητων (πρωτογενών και μη) στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε φάση εμφάνισης και εξάπλωσης πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης δημιουργήθηκε μία βάση γεωγραφικών δεδομένων για την περιοχή μελέτης με τη βοήθεια του προγράμματος *ArcCatalogue* του ArcMap (ESRI, 2007). Τα γεωγραφικά δεδομένα είναι είτε *διανυσματικού τύπου* (vector), όπως σημειακά χαρακτηριστικά (π.χ. σημείο έναρξης πυρκαγιάς), γραμμικά χαρακτηριστικά (π.χ. οδικό δίκτυο) και επιφάνειες (π.χ. οικισμοί), είτε *κυψελιδωτού τύπου* (raster) τα οποία χωρίζουν το γεωγραφικό χώρο σε γραμμές και στήλες ώστε να δημιουργούνται κελιά, όπου κάθε κελί έχει μία ή περισσότερες ιδιότητες.

Το λογισμικό πρόγραμμα ArcMap, ως το κύριο πρόγραμμα του ArcGIS, χρησιμοποιείται για όλες τις λειτουργίες που μπορεί να εκτελέσει ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ESRI, 2007).

Συγκεκριμένα, τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, δημιουργήθηκαν και επεξεργάστηκαν για τις ανάγκες της μελέτης περιλαμβάνουν:

- Πολυφασματική δορυφορική εικόνα Quick-Bird χωρικής ανάλυσης και διακριτικής ικανότητας 2.8 m της περιοχής μελέτης (γεωμετρικά διορθωμένη).
- Παν-χρωματική δορυφορική εικόνα Quick-Bird χωρικής και διακριτικής ικανότητας 0.6 m της περιοχής μελέτης
- Δορυφορική εικόνα υψηλής χωρικής και διακριτικής ικανότητας 0.6m, η οποία προέκυψε από τη σύζευξη των δύο προαναφερόμενων δορυφορικών εικόνων. Η εικόνα αυτή συνδυάζει τις φασματικές ιδιότητες των δεδομένων χαμηλής ανάλυσης με αυτές της υψηλής και της γεωμετρίας της πανχρωματικής εικόνας υψηλής χωρικής ανάλυσης. Στην παραγόμενη δορυφορική εικόνα πραγματοποιήθηκε γεωμετρική διόρθωση χρησιμοποιώντας πενήντα (50) σημεία ελέγχου, δηλαδή σημείων με συγκεκριμένες γεωδαιτικές συντεταγμένες, που καταγράφηκαν με Διαφορικό Σύστημα Εντοπισμού Παγκόσμιας Θέσης (DGPS). Μετά την γεωμετρική διόρθωση, η πληροφορία που εξήχθη από την δορυφορική εικόνα είναι λεπτομερής και αξιόπιστη, δηλαδή τα δεδομένα αποκτούν πραγματικές συντεταγμένες και κλίμακα.

- Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Elevation Model) ανάλυσης 20x20 m που παράχθηκε από ψηφιοποίηση ισοϋψών 20m σε χάρτες της Γενικής Υπηρεσίας Στρατού κλίμακας 1:50.000.
- Λεπτομερή και αξιόπιστη γεωγραφική πληροφορία, όπως δομημένο περιβάλλον, χρήσεις γης, οδικό δίκτυο, υποδομές κ.α., προερχόμενη από ταξινόμηση δορυφορικής εικόνας χωρικής ανάλυσης 2.8 m.
- Λεπτομερή και αξιόπιστη γεωγραφική πληροφορία, όπως δομημένο περιβάλλον, χρήσεις γης, μοντέλα καύσιμης ύλης, όπως προέκυψε από την ταξινόμηση δορυφορικής εικόνας χωρικής ανάλυσης 0.6 m. Η ταξινόμηση της δορυφορικής εικόνας βασίστηκε στη μέθοδο ερμηνείας εικόνας (image interpretation) σε κλίμακα 1:3.000
- Δελτία Πυρκαγιών από τη Διεύθυνση Δασών και την Πυροσβεστική Υπηρεσία Λέσβου για την περιοχή μελέτης. Χαρακτηριστικά, για την περίοδο από το έτος 1970 έως το έτος 2007 έγινε καταγραφή και ψηφιοποίηση του σημείου έναρξης της κάθε δασικής πυρκαγιάς (κατά προσέγγιση) που εκδηλώθηκε στη Χερσόνησο Αμαλής, Ν. Λέσβος.

Η επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού ERDAS IMAGINE 8.7, ενώ η φωτοερμηνεία των δορυφορικών εικόνων και η επεξεργασία των γεωγραφικών δεδομένων έγινε μέσω του προγράμματος ArcGIS.

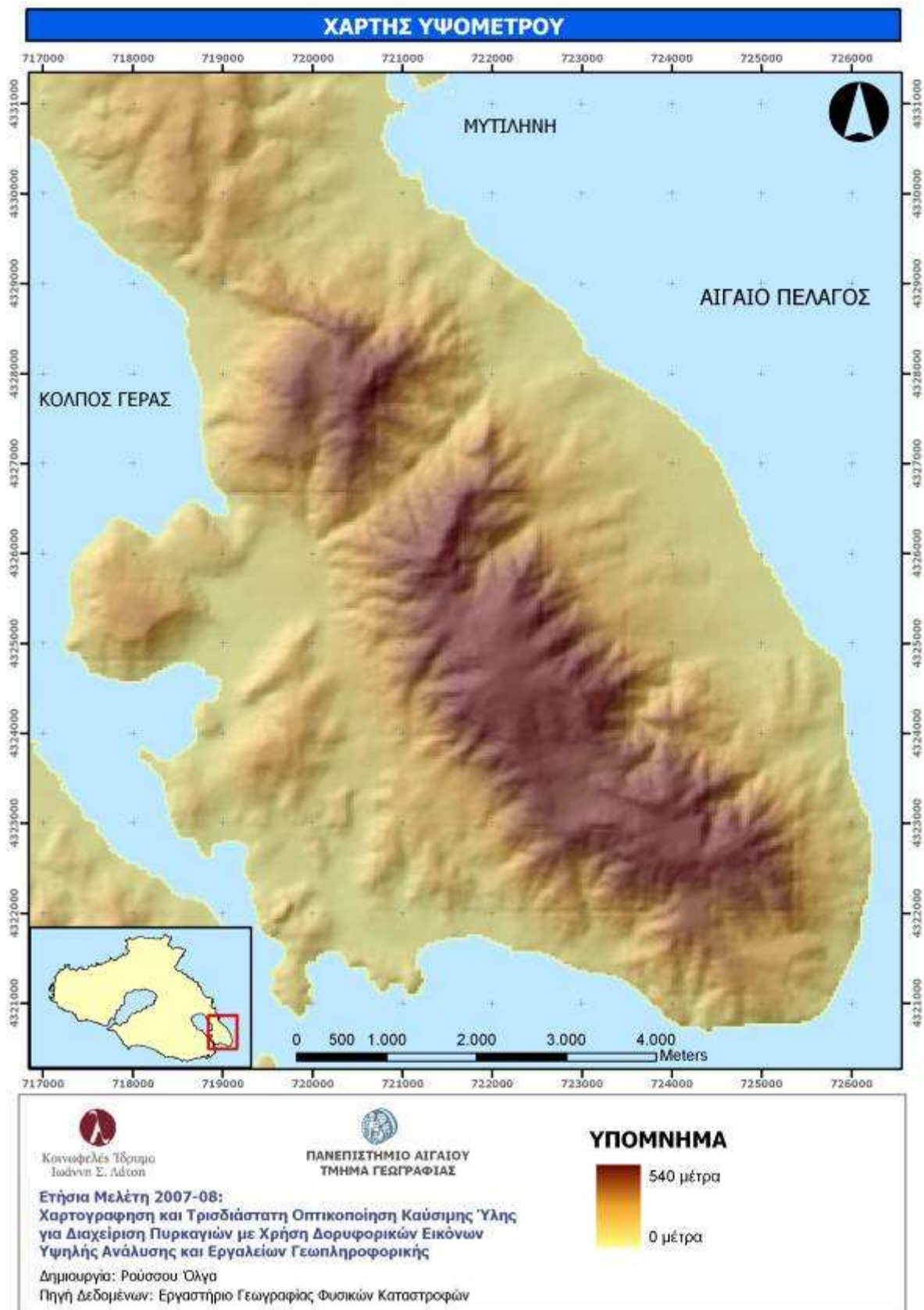
Οι θεματικές επιφάνειες που δημιουργήθηκαν και εισήχθησαν στην βάση γεωγραφικών δεδομένων είναι οι ακόλουθες:

- Τύποι κάλυψης γης
- Οδικό δίκτυο
- Πυροφυλάκια
- Σημεία υδροληψίας
- Διοικητικά όρια ΟΤΑ
- Περιστατικά πυρκαγιών
- Υψομετρική Διαβάθμιση
- Κλίσεις
- Εκθέσεις
- Δορυφορικές εικόνες
- Οικισμοί
- Γεωλογικά δεδομένα
- Εκκλησίες

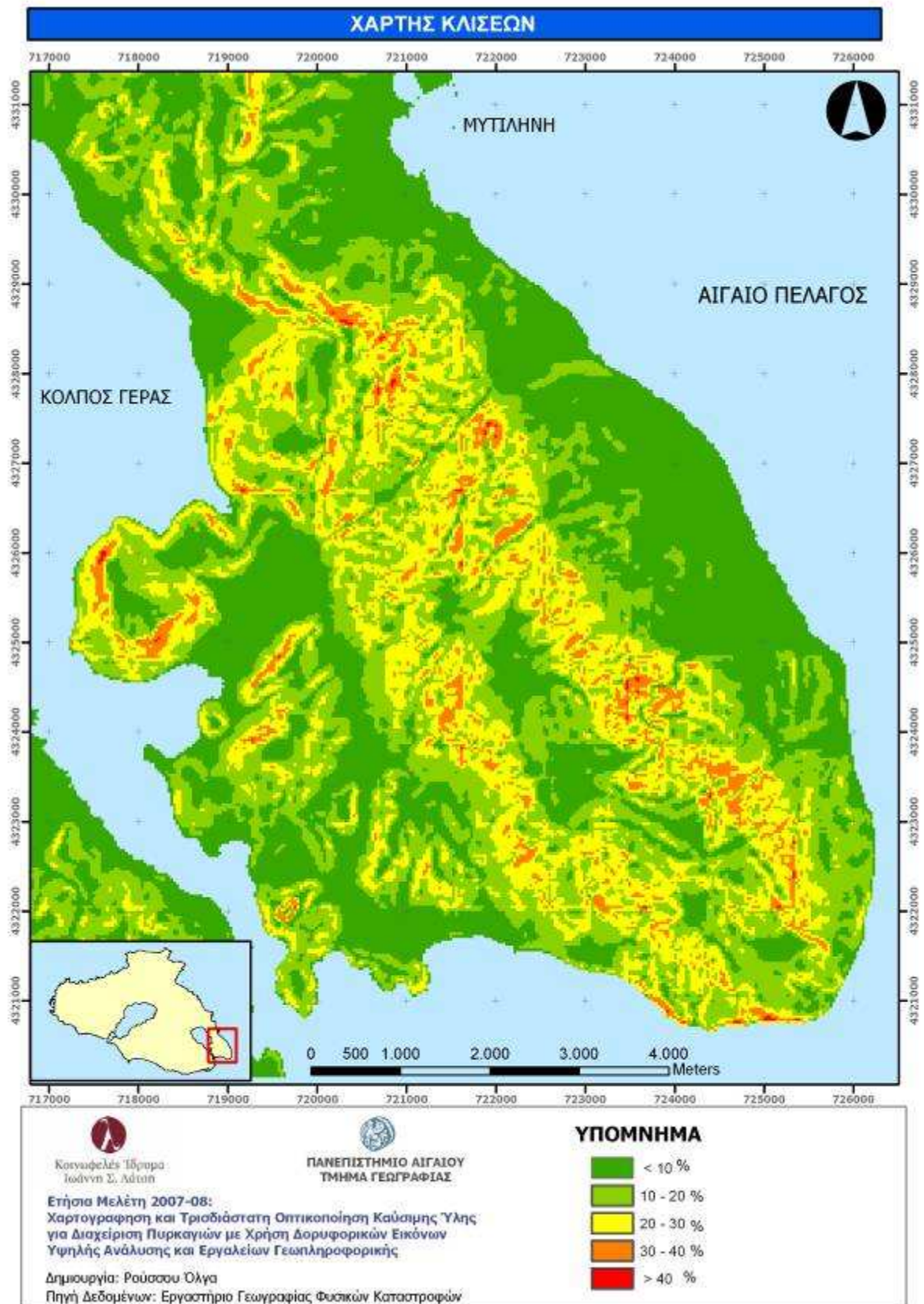
Δεδομένου επίσης ότι οι χάρτες αποτελούν το βασικό εργαλείο επικοινωνίας μεταξύ του αρχηγείου της πυροσβεστικής και των δυνάμεων πυρόσβεσης, κρίθηκε απαραίτητο να δημιουργηθεί το σωστό χαρτογραφικό υπόβαθρο που θα απεικονίζει με ακρίβεια τα γεωγραφικά δεδομένα της περιοχής μελέτης. Οι χάρτες που δημιουργήθηκαν με γνώμονα τις ανάγκες χρήσης τους τόσο σε καθημερινή όσο και σε επιχειρησιακή βάση είναι:

- Χάρτης Υψομέτρου (Χάρτης 2)
- Χάρτης Κλίσεων (Χάρτης 3)
- Χάρτης Εκθέσεων (Χάρτης 4)

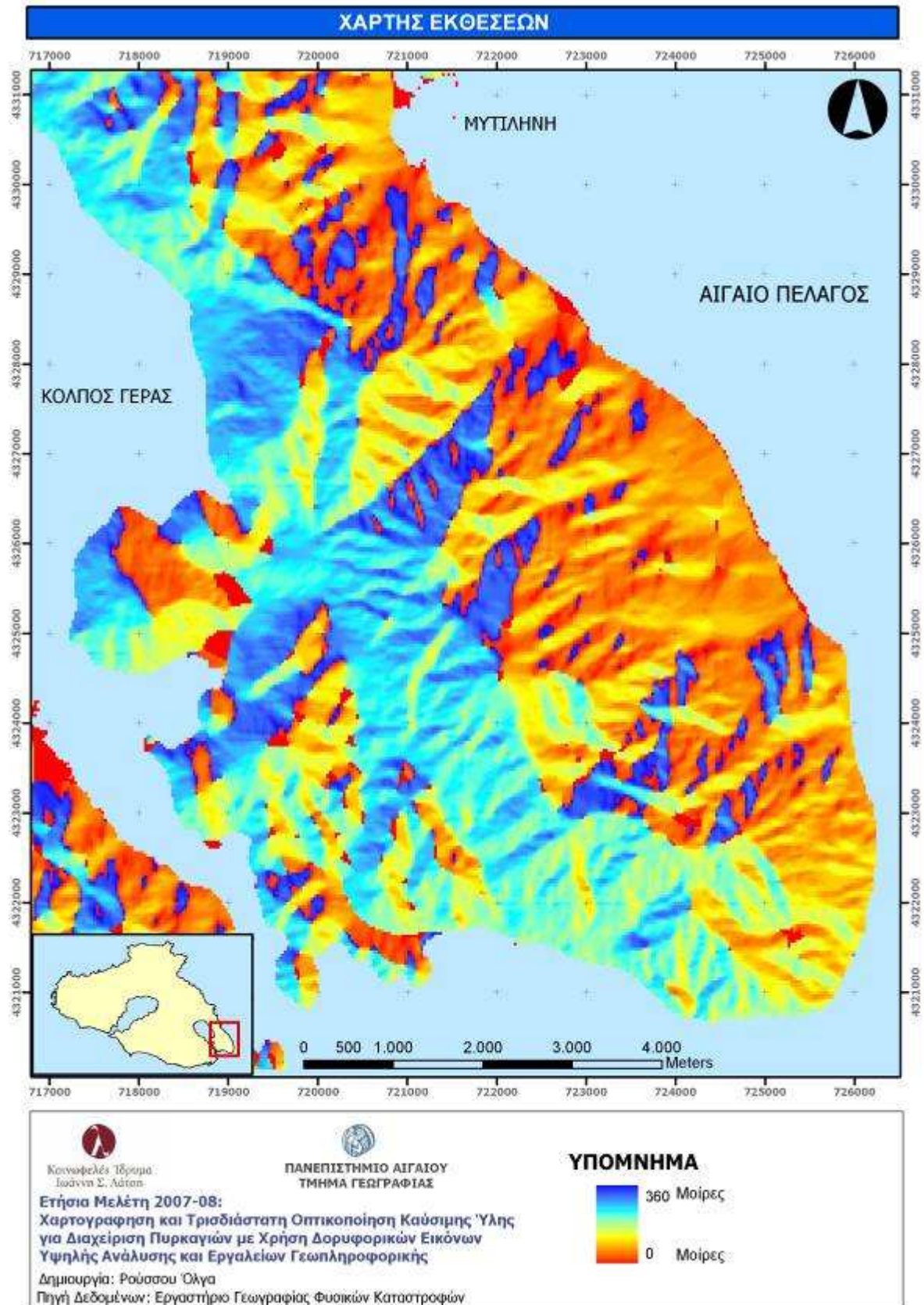
- Γεωλογικός Χάρτης (Χάρτης 5)
- Χάρτης Ιστορικού Πυρκαγιών (1971 - 2007) (Χάρτης 6)
- Χάρτης Υποδομών (Χάρτης 7)
- Χάρτης Χρήσεων γης από QuickBird 2.8 m (Χάρτης 8)
- Χάρτης Χρήσεων γης από συζευγμένη QuickBird 0.6 m (Χάρτης 9)
- Χάρτης Μοντέλων Καύσιμης Ύλης (Χάρτης 10 , Χάρτης 11)



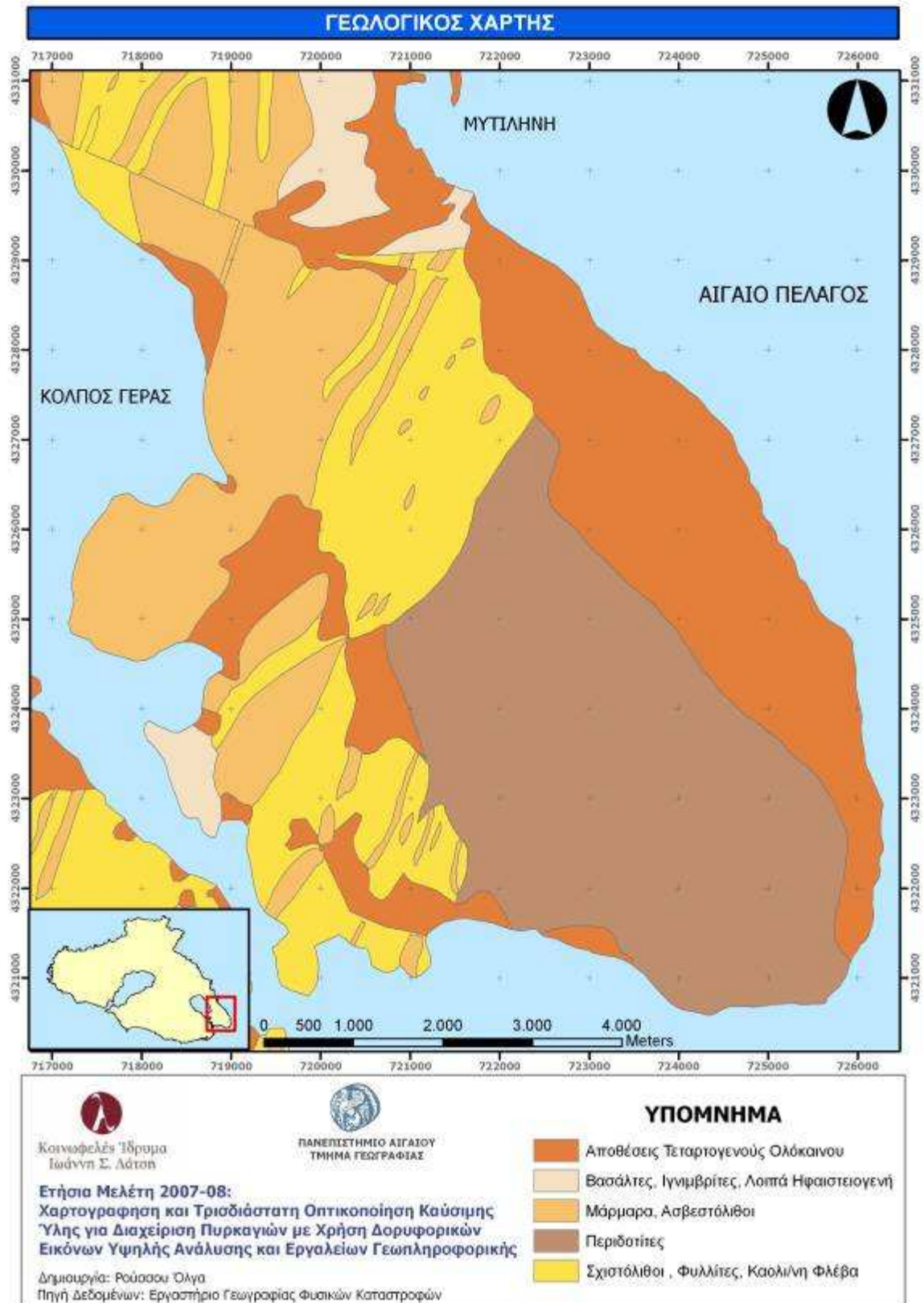
Χάρτης 2: Χάρτης Υψομέτρου



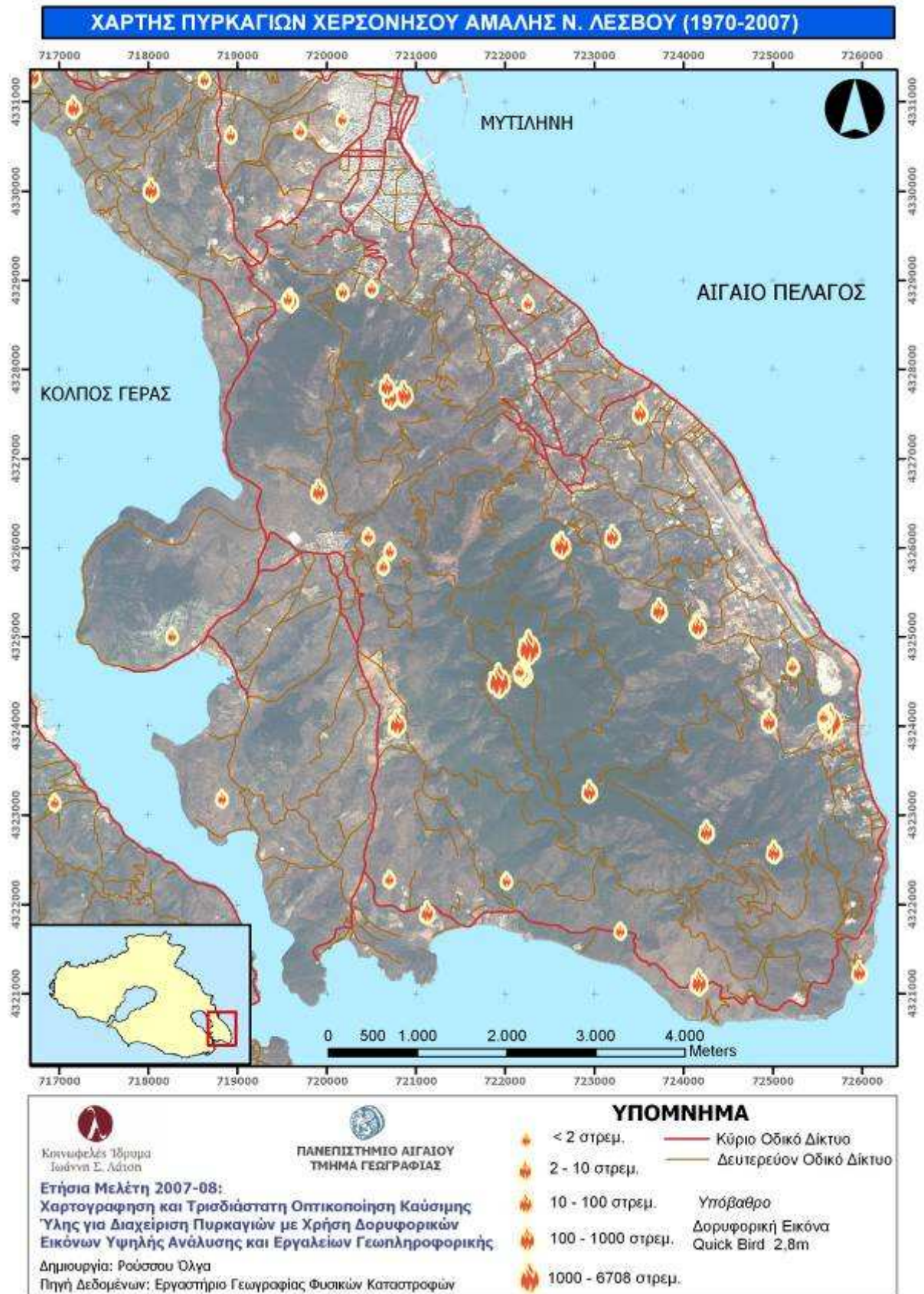
Χάρτης 3: Χάρτης Κλίσεων



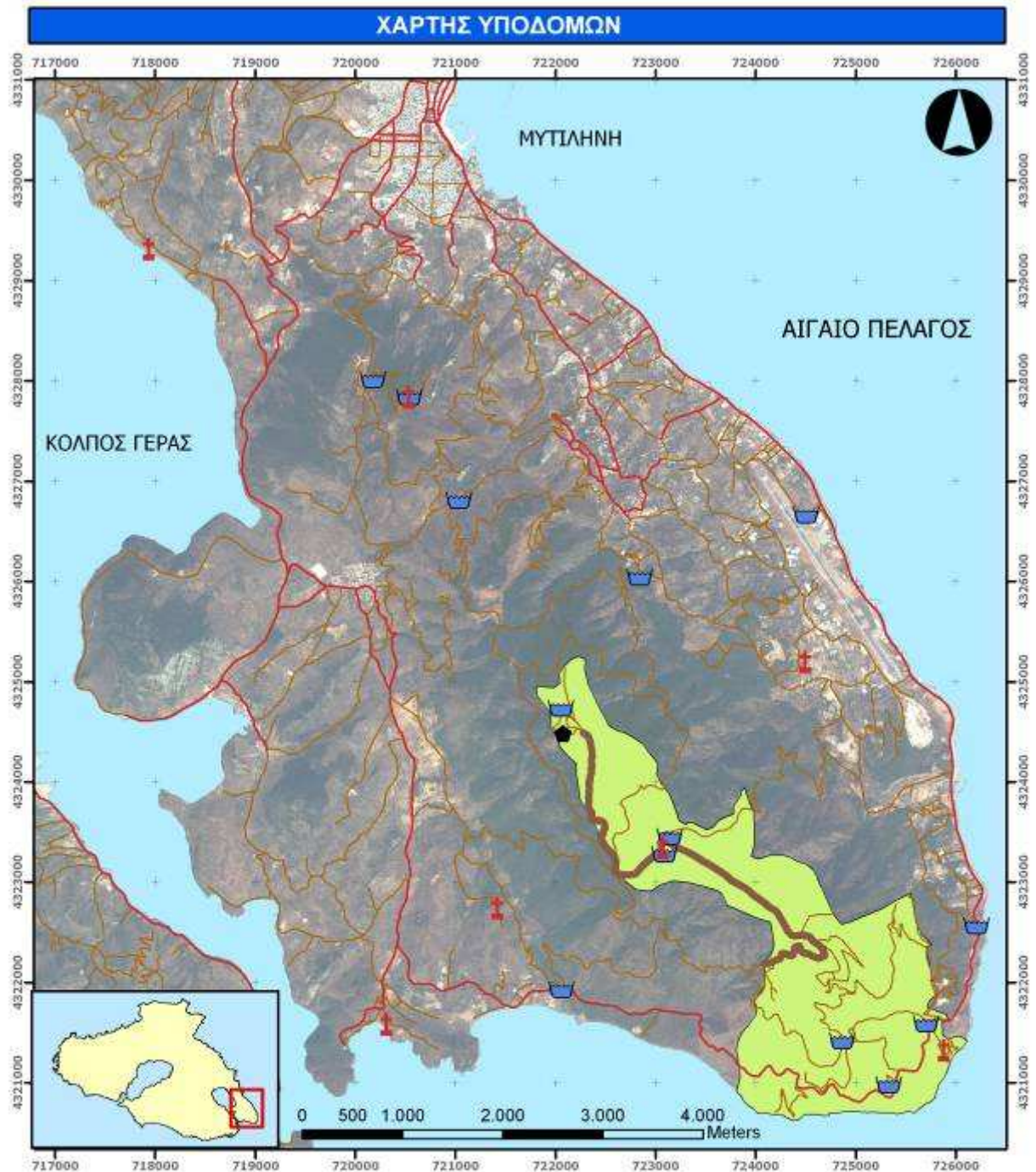
Χάρτης 4: Χάρτης Εκθέσεων



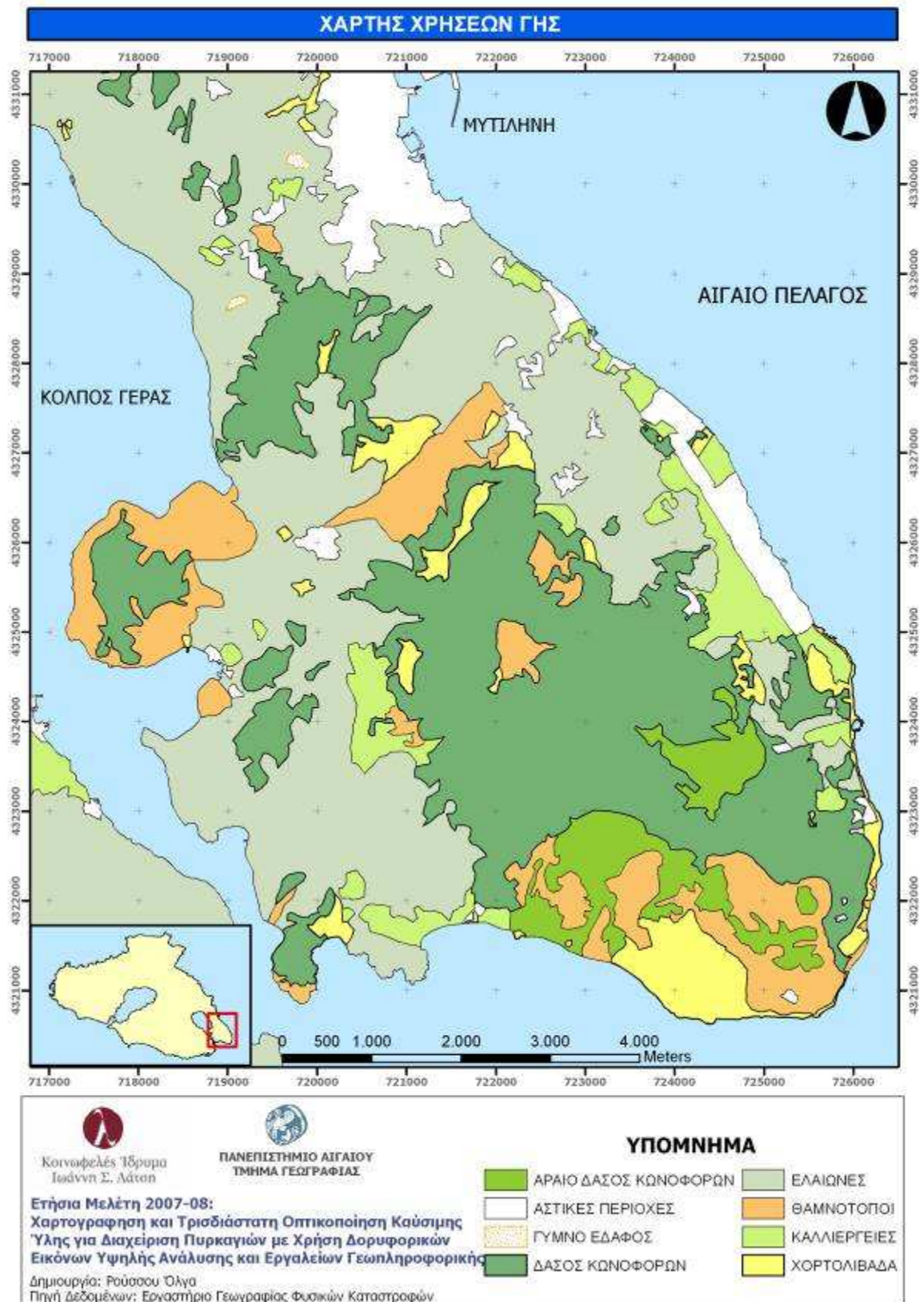
Χάρτης 5: Γεωλογικός Χάρτης περιοχής μελέτης



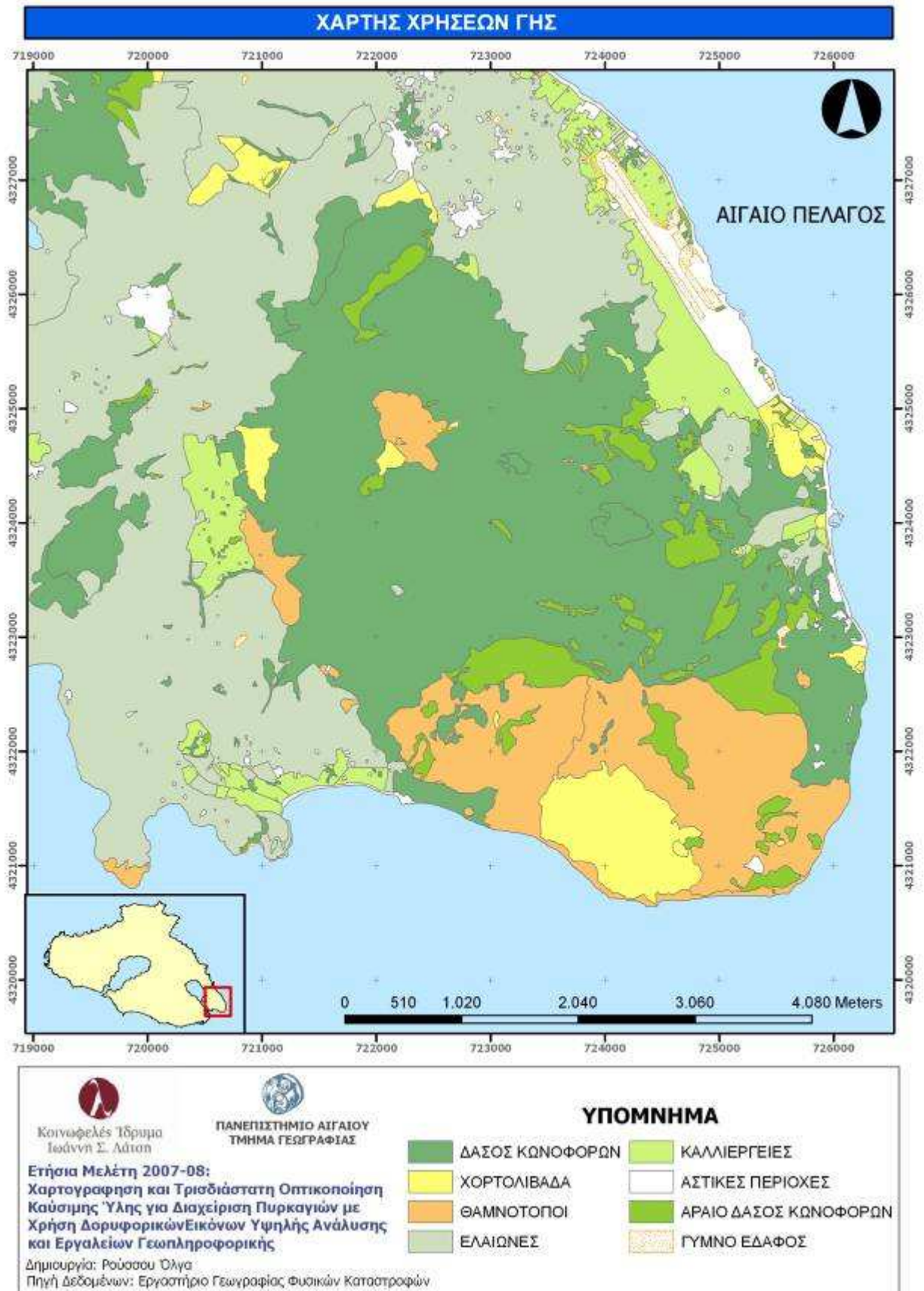
Χάρτης 6: Χάρτης Ιστορικού Πυρκαγιών (1971 - 2007)



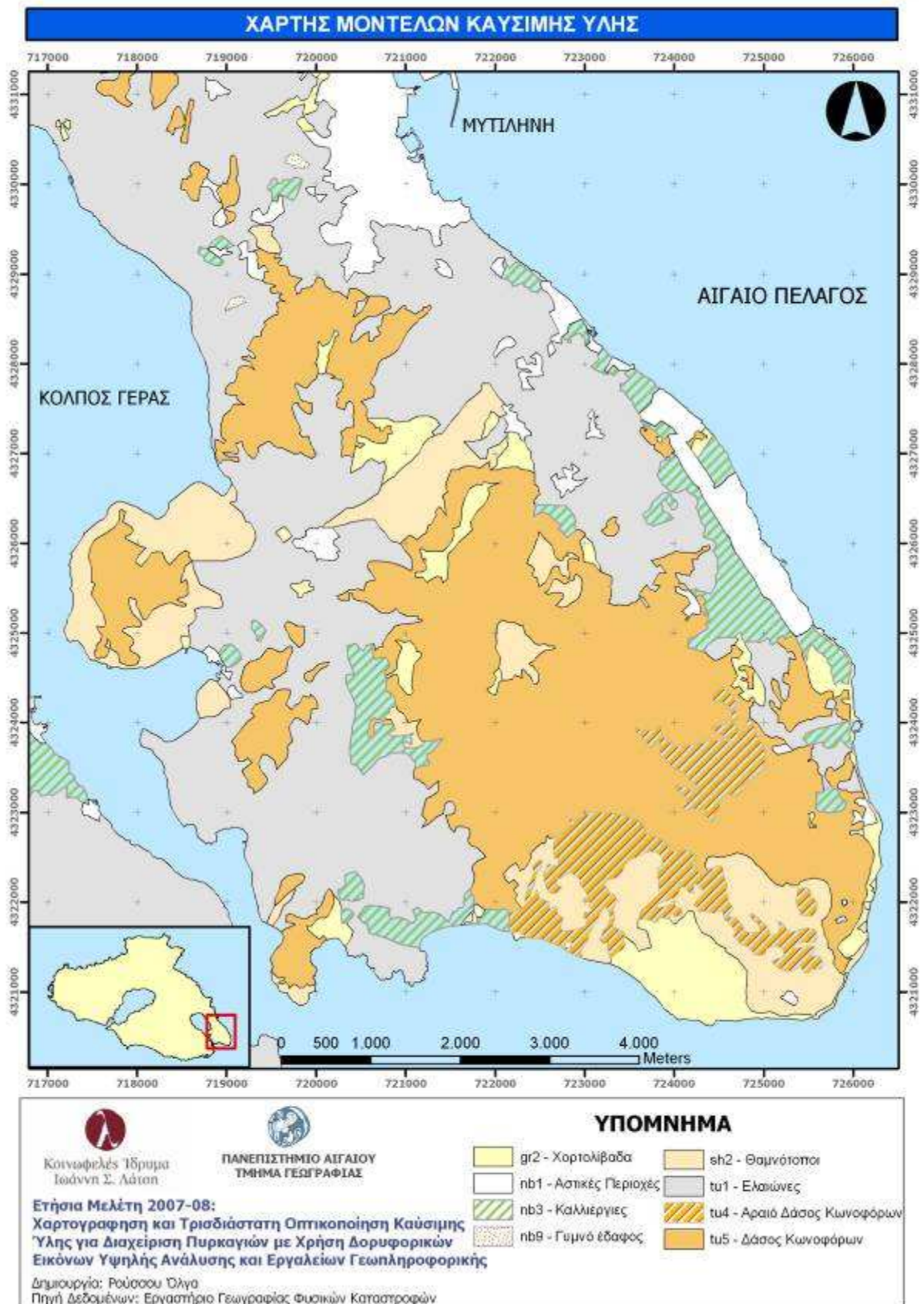
Χάρτης 7: Χάρτης Υποδομών



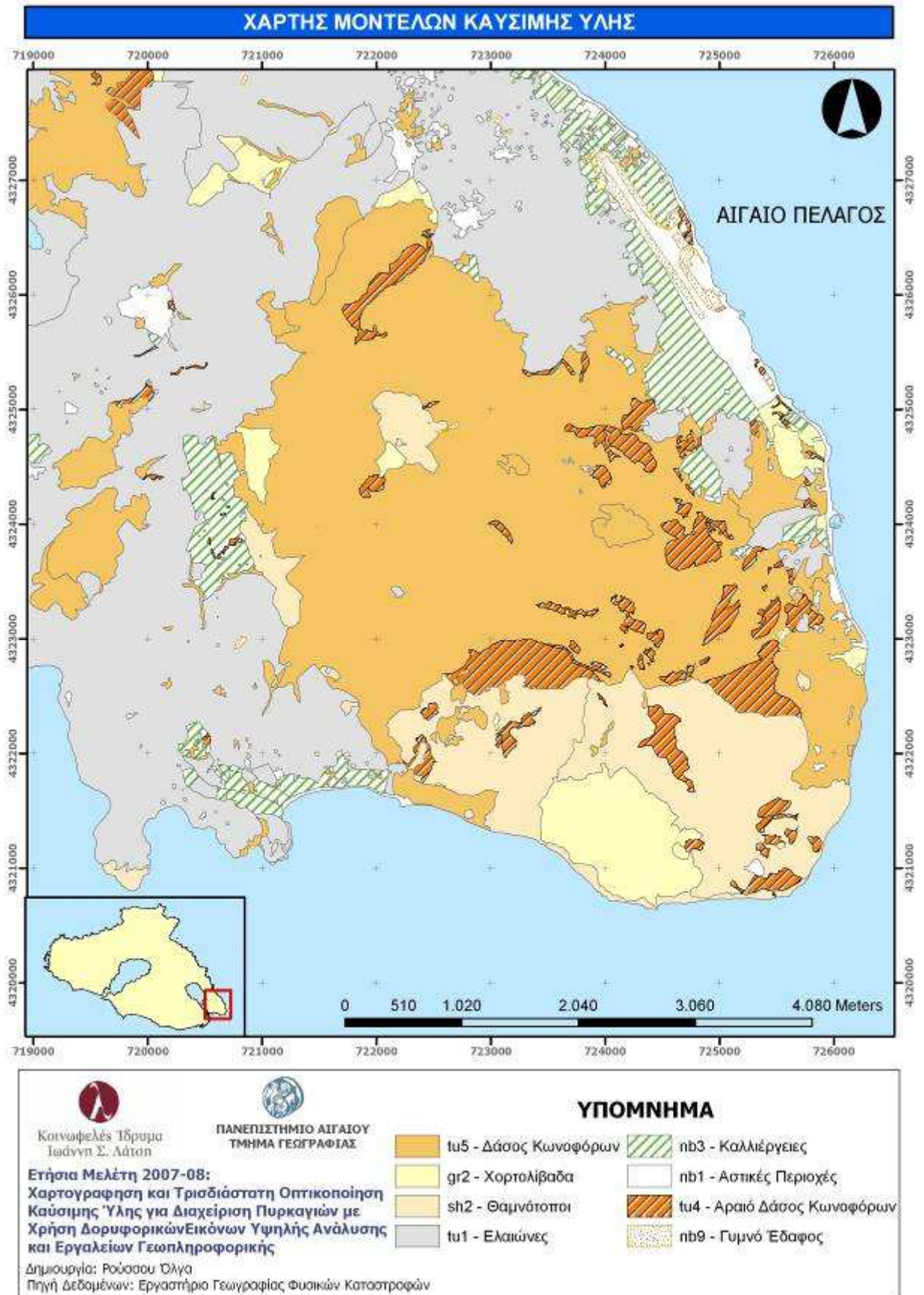
Χάρτης 8: Χάρτης Χρήσεων γης από QuickBird 2.8 m



Χάρτης 9: Χάρτης Χρήσεων γης από συζευγμένη QuickBird 0.6 m



Χάρτης 10: Χάρτης Μοντέλων Καύσιμης Ύλης από QuickBird 2.8 m



Χάρτης 11: Χάρτης Μοντέλων Καύσιμης Ύλης από συζευγμένη QuickBird 0.6 m

3.2 Εκτίμηση Βιομάζας – Αλλομετρικές εξισώσεις

Η συστηματική δειγματοληψία είναι οπωσδήποτε ο ορθότερος τρόπος για την ακριβή περιγραφή της δασικής καύσιμης ύλης μιας περιοχής και προτιμάται συνήθως κατά τη δημιουργία μακροπρόθεσμων σχεδίων διαχείρισης πυρκαγιών, διαχειριστικών μελετών που αναγνωρίζουν την ανάγκη εξέτασης της πυρασφάλειας των συστάδων κτλ. Δυστυχώς όμως η δειγματοληψία είναι ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία και κατ' επέκταση εργασία υψηλού κόστους.

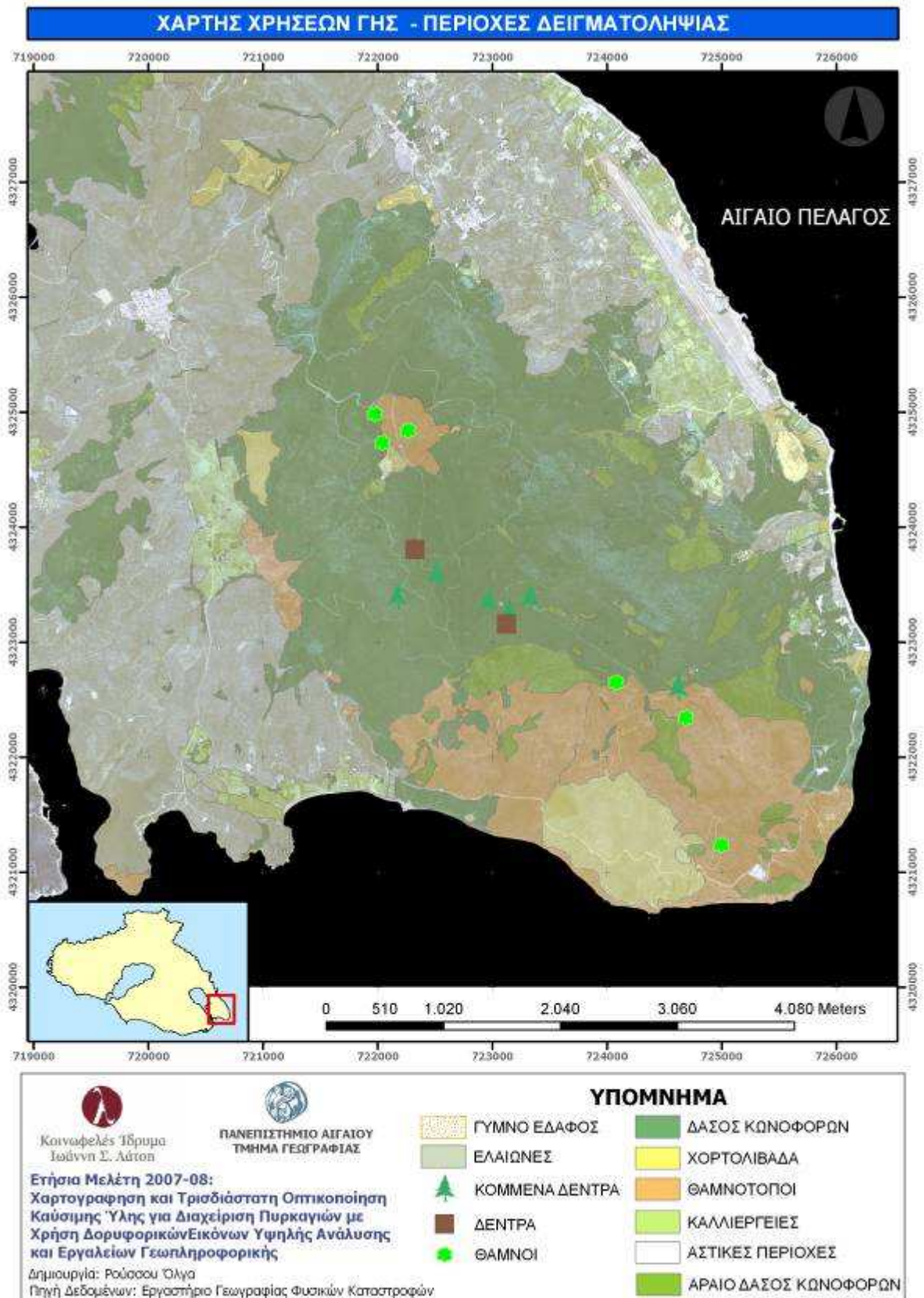
Μία εναλλακτική μέθοδος για τον υπολογισμό των παραμέτρων της καύσιμης ύλης είναι η δημιουργία και χρήση αλλομετρικών εξισώσεων, δηλαδή εξισώσεων απλής ή πολλαπλής γραμμικής ή μη παλινδρόμησης. Με τον τρόπο αυτό θα είναι δυνατός ο υπολογισμός των απαραίτητων παραμέτρων της καύσιμης ύλης που είναι δύσκολο να μετρηθούν, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τιμές χαρακτηριστικών της βλάστησης που είναι εύκολη η μέτρηση ή ακόμη και η εκτίμησή τους (Brown and Marsden, 1976). Αλλομετρία είναι η διαδικασία εύρεσης συναρτήσεων δύναμης μεταξύ βιολογικών χαρακτηριστικών. Η αλλομετρία μελετάει το πώς μεταβάλλεται ένα χαρακτηριστικό σε σχέση με κάποιο άλλο ή με το σύνολο. Μπορούμε να γράψουμε την αναλογία ως εξίσωση εισάγοντας μία σταθερά αναλογίας a , $y=ax^{\beta}$, όπου β μη μηδενικός πραγματικός αριθμός (Gower *et al.*, 1999; Wang, 2006).

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές έρευνες ανά την υφήλιο για τη δημιουργία αλλομετρικών σχέσεων με χαρακτηριστικά της κόμης για την ποσοτική εκτίμηση της βιομάζας σε επίπεδο κλαδιού και σε επίπεδο δέντρου. Οι έρευνες αυτές έχουν γίνει σε διαφορετικά είδη δέντρων, όπως σε έλατα (Douglas fir) (Monserud and Marshall, 1999), δρυς (holm oak, cork oak) (Fonseca and Parresol, 2001) και πεύκα (western white pine, ponderosa pine, maritime pine, loblolly pine, Scots pine, *Aleppo pine*) (Porte *et al.*, 2002; Fonseca and Parresol, 2001; Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997; Mitsopoulos and Dimitrakopoulos, 2007). Αντίστοιχες μελέτες για εκτίμηση της βιομάζας θάμνων από χαρακτηριστικά επίγειας καύσιμης ύλης μέσα από τη δημιουργία αλλομετρικών εξισώσεων έχουν πραγματοποιηθεί κυρίως στη Μινεσότα (Grigal and Ohmann, 1977), το Μεξικό (Navar *et al.*, 2002; Navar *et al.*, 2002; Navar *et al.*, 2004), την Αργεντινή (Guevara *et al.*, 2002) και την Ελλάδα (Xanthopoulos and Manasi, 2002; Kazanis *et al.*, 2006).

Βασικός στόχος της παρούσας μελέτης είναι η δημιουργία αλλομετρικών εξισώσεων για εκτίμηση βιομάζας δέντρων Τραχείας Πεύκης από χαρακτηριστικά της κόμης και η δημιουργία αλλομετρικών εξισώσεων για εκτίμηση βιομάζας θάμνων από μετρήσεις των χαρακτηριστικών της επίγειας καύσιμης ύλης που πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο.

3.2.1 Περιοχές δειγματοληψίας στην περιοχή μελέτης

Στην περιοχή μελέτης η απογραφή της καύσιμης ύλης στηρίχθηκε σε δειγματοληπτικές επιφάνειες διαστάσεων 20x20 m που κατανεμήθηκαν στην περιοχή μελέτης. Σε κάθε δειγματοληπτική επιφάνεια πραγματοποιήθηκε λεπτομερής περιγραφή των διαφόρων τύπων βλάστησης και καταγραφή της ποιότητας, του μεγέθους, της πυκνότητας και της διάταξης της καύσιμης ύλης. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν έξι (6) διασκορπισμένα δέντρα Τραχείας Πεύκης και έξι (6) δειγματοληπτικές επιφάνειες σε θάμνους (Χάρτης 12).



Χάρτης 12: Περιοχές δειγματοληψίας θάμνων και δέντρων στην περιοχή μελέτης

3.2.2 Εκτίμηση Βιομάζας Τραχείας Πεύκης

Για την εκτίμηση της βιομάζας της κόμης των δέντρων Τραχείας Πεύκης έλαβε χώρα άμεση καταστροφική δειγματοληψία έξι (6) πεύκων. Πεύκα (*Pinus brutia*) με διαφορετικό ύψος και μορφή κόμης κόπηκαν και μετρήθηκαν λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά της κόμης (ύψος, διάμετρος κ.α.), προκειμένου να συσχετιστούν με ιδιότητες της κόμης ως καύσιμη ύλη (λεπτή ζωντανή βιομάζα κόμης, πυκνότητα του όγκου της κόμης κ.α.). Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για κάθε πεύκο περιλάμβανε:

- *Φωτογραφική τεκμηρίωση*: Φωτογράφιση του δένδρου από Α. Δ. Β. Ν
- *Μετρήσεις πριν την κοπή*: Στηθαία διάμετρο (D.B.H.), ακτίνα της κόμης προς ανατολή, δύση, βορρά, Νότο, ύψος, ύψος της κόμης από το έδαφος, θέση των γειτονικών δένδρων (απόσταση, αζιμούθιο, υψος, & στηθαία διάμετρος
- *Μετρήσεις όλων των κλαδιών*: Ύψος στον κορμό, αριθμός ετησίων δακτυλίων στη βάση, διάμετρος στη βάση, μήκος, μέγιστο πλάτος, συνολικό βάρος
- *Λεπτομερείς μετρήσεις 4-5 κλαδιών*: Διαχωρισμός καύσιμης ύλης στις κατηγορίες:

1 hr	0 – 0.5 cm
10 hrs	0.5 – 2.5 cm
100 hrs	2.5 – 7.5 cm
1000hrs	> 7.5 cm

Βάρος της κάθε κατηγορίας

- *Λήψη υποδείγματος από κάθε κατηγορία για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας*
- *Μετρήσεις μετά την κοπή*: Συντεταγμένες με GPS, αριθμός των ετησίων δακτυλίων

Τα χαρακτηριστικά του κάθε δέντρου όπως προέκυψαν από τις βασικές μετρήσεις στο πεδίο, καταγράφονται στον ακόλουθο πίνακα:

Αριθμός δέντρου	Στηθαία διάμετρο (cm)	Διάμετρος στη βάση (cm)	Ύψος (m)	Ύψος έναρξης κόμης (m)	Ηλικία
1	9.75	16	6.9	1.8	32
2	24	32	9.4	2.35	63
3	16	23	7.05	2.45	40
4	19.5	29	8.3	3.85	60
5	29.3	35	13.1	4.02	70
6	22	29	13.55	4.3	43

Από το κάθε δέντρο επιλέχθηκαν τέσσερα ή πέντε κλαδιά, μετρήθηκαν τα διάφορα χαρακτηριστικά του φυλλώματος του δέντρου σύμφωνα με την προαναφερόμενη μεθοδολογία και μετρήθηκε το υγρό βάρος του κάθε κλαδιού ανά κατηγορία. Στη συνέχεια επιλέχθηκαν δείγματα ζωντανής ή/και νεκρής καύσιμης ύλης ανά κατηγορία (1 hr, 10 hr, 100 hr) τα οποία εισήχθησαν σε κλίβανο στους 105° C για 48 ώρες

(Agee, 1983) για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας και την εκτίμηση του ξηρού βάρους των επιλεγμένων κλαδιών ανά κατηγορία καύσιμης ύλης (Σχήμα 3). Η περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης ανά κατηγορία διαμέτρου υπολογίζεται από τη ακόλουθη εξίσωση:

$$\text{ΠΥ} = \frac{\text{XB} - \text{XB}}{\text{XB}} \cdot 100$$

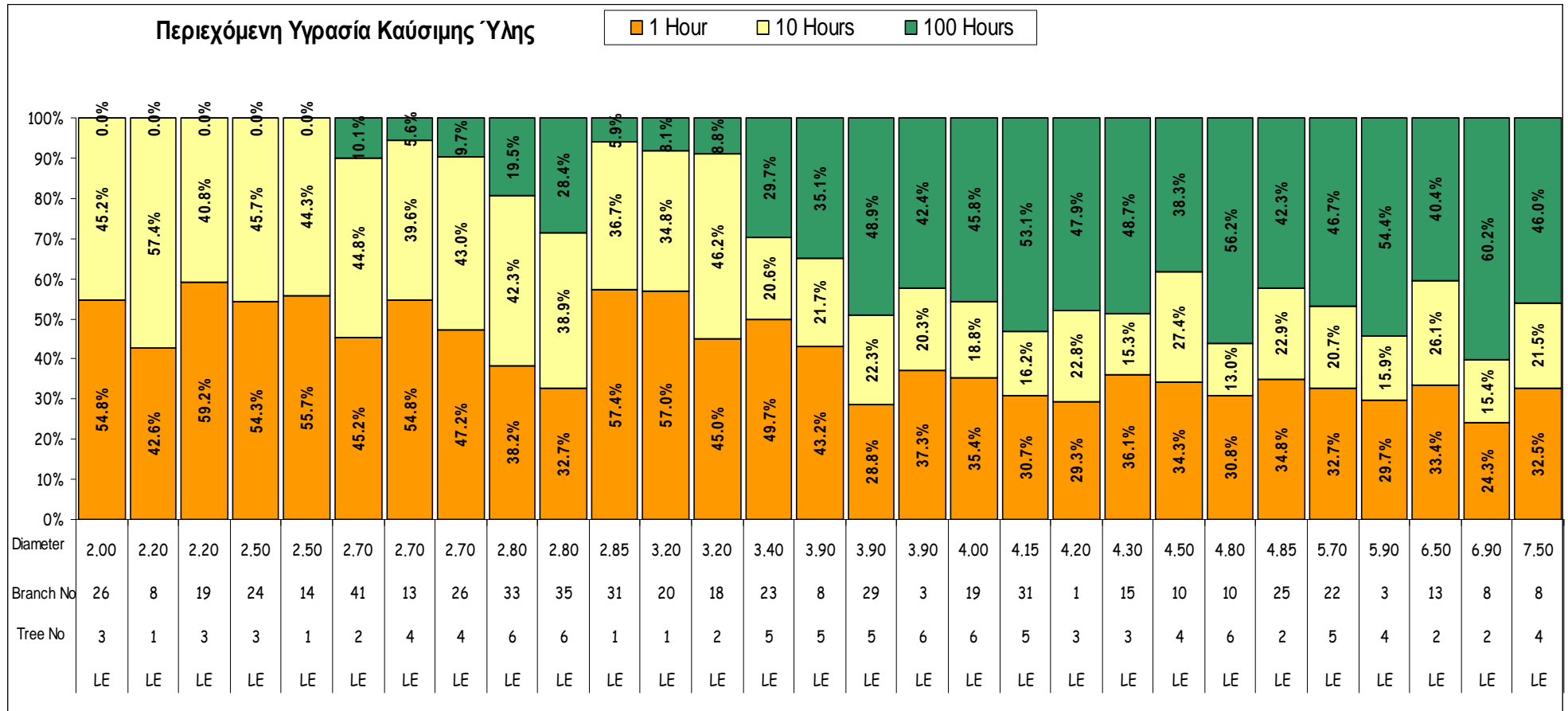
όπου,

ΠΥ : ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας επί του ξηρού βάρους (%)

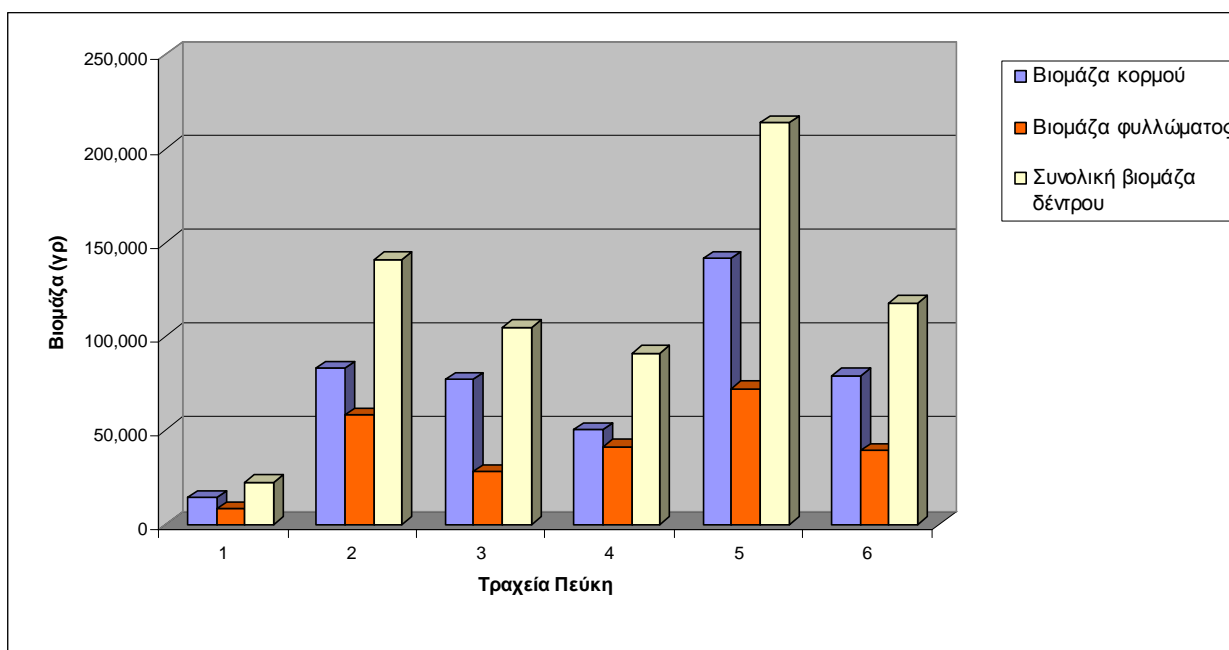
XB : χλωρό βάρος της καύσιμης ύλης (gr)

XB : ξηρό βάρος της καύσιμης ύλης μετά τη ξήρανση (gr)

Ακολούθησε αναγωγή των αποτελεσμάτων και στα υπόλοιπα κλαδιά του δέντρου, υπολογίστηκε το ξηρό βάρος του κορμού του κάθε δέντρου και τέλος, υπολογίστηκε η συνολική βιομάζα κάθε δέντρου (Σχήμα 4). Στην παρούσα μελέτη, η συνολική βιομάζα (ξηρό βάρος εναέριας καύσιμης ύλης) του κάθε δέντρου Τραχείας Πεύκης αντιστοιχεί κατά μέσο όρο σε 41,085 κιλά, και η συνολική βιομάζα (φυλλώματος και κορμού) αντιστοιχεί κατά μέσο όρο σε 115,015 κιλά.



Σχήμα 3: Περιεχόμενη υγρασία καύσιμης ύλης σε διάφορες κατηγορίες ανά κλαδί δειγματοληψίας.



Σχήμα 4: Συνολική εκτίμηση βιομάζας δέντρων Τραχείας Πεύκης

Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το στατιστικό λογισμικό πρόγραμμα SPSS προκειμένου να αναπτυχθούν εξισώσεις παλινδρόμησης. Η ανάλυση έγινε σε δύο επίπεδα: α) βιομάζα κλαδιού και β) βιομάζα δέντρου Τραχείας Πεύκης. Αρχικά διερευνήθηκε η συσχέτιση της συνολικής βιομάζας των κλαδιών (εξαρτημένη μεταβλητή) με τη διάμετρο, το μήκος και το πλάτος του κλαδιού (ανεξάρτητες μεταβλητές). Οι αλλομετρικές εξισώσεις που αναπτύχθηκαν είναι οι ακόλουθες:

$$\text{TBDW} = 0,026 \cdot \text{BL}^{2,005} \quad (1)$$

$$\text{ή} \quad \ln(\text{TBDW}) = \ln(0,026) + 2,005 \cdot \ln(\text{BL}) \quad (2)$$

$$R^2 = 0,668$$

$$\text{TBDW} = -440,60 + 20,034 \cdot \text{BW} \quad (3)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0,524$$

$$\text{TBDW} = 62,065 \cdot \text{BD}^{2,348} \quad (4)$$

$$\text{ή} \quad \ln(\text{TBDW}) = \ln(62,065) + 2,348 \cdot \ln(\text{BD}) \quad (5)$$

$$R^2 = 0,931$$

$$\text{TBDW} = 383,612 + 0,011 \cdot \text{BDLW} \quad (6)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0,839$$

όπου,

$N=29$

R^2 : Συντελεστής προσδιορισμού.

Adjusted R^2 : Προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού

BL: πλάτος κλαδιού (cm)

BW: Μήκος κλαδιού (cm)

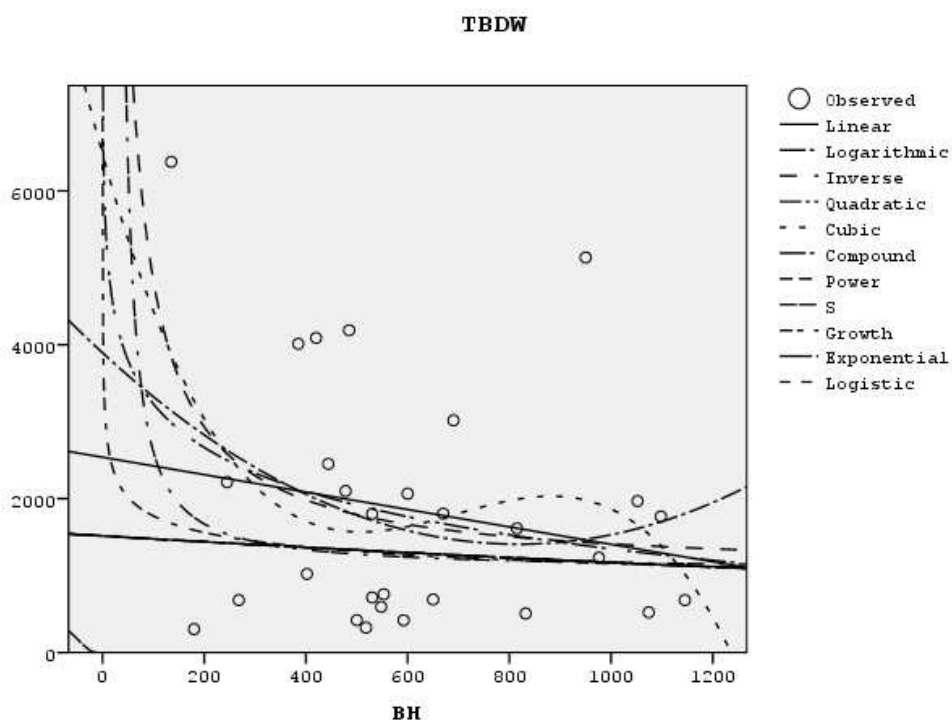
BD: Διάμετρος στη βάση του κλαδιού (cm)

BDLW: Γινόμενο διαμέτρου κλαδιού με μήκος κλαδιού και με πλάτος κλαδιού (cm)

TBDW: συνολική βιομάζα κλαδιών (gr)

Από τις προαναφερόμενες αλλομετρικές εξισώσεις φαίνεται ότι η συνολική βιομάζα των κλαδιών εξαρτάται σημαντικά από τη διάμετρο του κλαδιού και το συνδυασμό των παραμέτρων του κάθε κλαδιού (διάμετρο, μήκος, πλάτος). Χαρακτηριστικά, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4 ή 5) υπολογίζεται η συνολική βιομάζα των κλαδιών ενός δέντρου κατά 93,1% γνωρίζοντας τη διάμετρο στη βάση του κλαδιού. Όσο μεγαλώνει η διάμετρος στη βάση του κάθε κλαδιού μεγαλώνει σε μεγάλο βαθμό η συνολική βιομάζα του κλαδιού.

Στη συνέχεια ανιχνεύοντας τη συσχέτιση της βιομάζας κλαδιών με το ύψος που βρίσκεται το κλαδί από το έδαφος διαπιστώθηκε ότι δεν υπάρχει κάποια συνάρτηση που να μπορεί να περιγράψει τη σχέση μεταξύ των μεταβλητών TBDW (συνολική βιομάζα κλαδιών) και BH (ύψος που βρίσκεται το κλαδί από το έδαφος) (Σχήμα 5).



Σχήμα 5: Ανίχνευση συσχέτισης της συνολικής βιομάζας κλαδιών με το ύψος που βρίσκονται τα κλαδιά από το έδαφος.

Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο SPSS διερευνήθηκε η συσχέτιση της συνολικής βιομάζας της κόμης με το ύψος και τη στηθαία διάμετρο. Ως ανεξάρτητη μεταβλητή επιλέχθηκε η στηθαία διάμετρος (Diameter Breast Height - D.B.H.) και το ύψος των δέντρων, ενώ ως εξαρτημένη επιλέχθηκε η συνολική βιομάζα κόμης (χωρίς τον κορμό) και η συνολική βιομάζα κόμης (με τον κορμό) της Τραχείας Πεύκης. Οι αλλομετρικές εξισώσεις που αναπτύχθηκαν είναι οι ακόλουθες:

$$\mathbf{BDW = -227.291 , 582 + 40.081 , 604 \cdot H - 106 , 569 \cdot H^2} \quad (7)$$

$$R^2 = 0,807$$

$$\mathbf{BDW = e^{\left(12,196 - \frac{31,377}{DBH}\right)}} \quad (8)$$

$$\mathbf{\ln(BDW) = 12 , 196 - \frac{31 , 377}{DBH}} \quad (9)$$

$$R^2 = 0,983$$

όπου,

N=29

R²: Συντελεστής προσδιορισμού.

BDW: συνολική βιομάζα κόμης, χωρίς τον κορμό (gr)

H: το ύψος δέντρου Τραχείας Πεύκης (m)

DBH: η στηθαία διάμετρος του κορμού του δέντρου (cm)

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις 7, 8 και 9 υπάρχει έντονη συσχέτιση της βιομάζας της κόμης (χωρίς τον κορμό) τόσο με το ύψος όσο και με τη στηθαία διάμετρο του δέντρου Τραχείας Πεύκης. Οι δύο αυτές ανεξάρτητες μεταβλητές είναι στατιστικά σημαντικές στην εκτίμηση της συνολικής βιομάζας κόμης.

$$\mathbf{TDW = -39.3748 + 72.911 , 508 \cdot H - 175 , 756 \cdot H^2} \quad (10)$$

$$R^2 = 0,636$$

$$\mathbf{TDW = -64.213 , 334 + 8.920 , 516 \cdot DBH} \quad (11)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0,920$$

όπου,

N=6

R²: Συντελεστής προσδιορισμού

Adjusted R²: Προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού

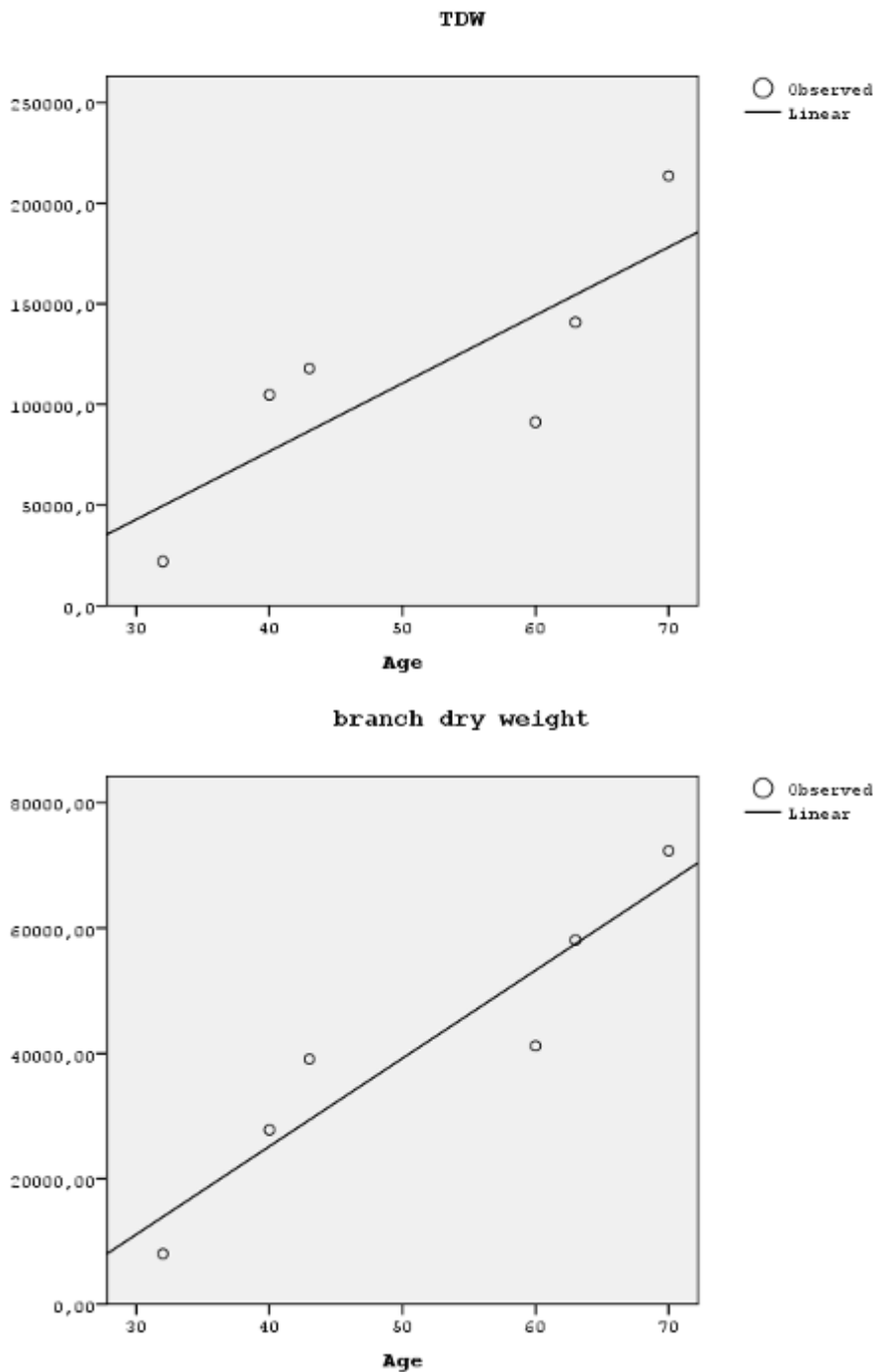
H: το ύψος δέντρου Τραχείας Πεύκης (m)

DBH: η στηθαία διάμετρος του κορμού του δέντρου (cm)

TDW: συνολική βιομάζα κόμης (gr)

Στην περίπτωση που στην εκτίμηση της βιομάζας της κόμης συνυπολογίζεται και το ξηρό βάρος του κορμού δεν παρατηρείται σημαντική συσχέτιση της βιομάζας με το ύψος. Ενώ η σθηθιαία διάμετρος φαίνεται να αποτελεί στατιστικά σημαντική παράμετρο στην συνολική βιομάζα της κόμης δέντρου Τραχείας Πεύκης.

Συγκρίνοντας τη συσχέτιση της βιομάζας με και χωρίς τον κορμό (BWD και TDW) με την ηλικία του δέντρου προέκυψε ότι η ηλικία του δέντρου είναι στατιστικά σημαντική παράμετρος στην εκτίμηση της συνολική βιομάζα κόμης (χωρίς τον κορμό) και η σχέση τους είναι γραμμική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Συσχέτιση βιομάζας κόμης (χωρίς κορμό) και συνολικής βιομάζας κόμης με ηλικία δέντρου Τραχείας Πεύκης.

$$\text{BDW} = -30.959 + 1.403,446 \cdot \text{Age} \quad (12)$$

Adjusted $R^2 = 0,879$

όπου,

$N=6$

Adjusted R^2 : Προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού

BDW: συνολική βιομάζα κόμης, χωρίς τον κορμό (gr)

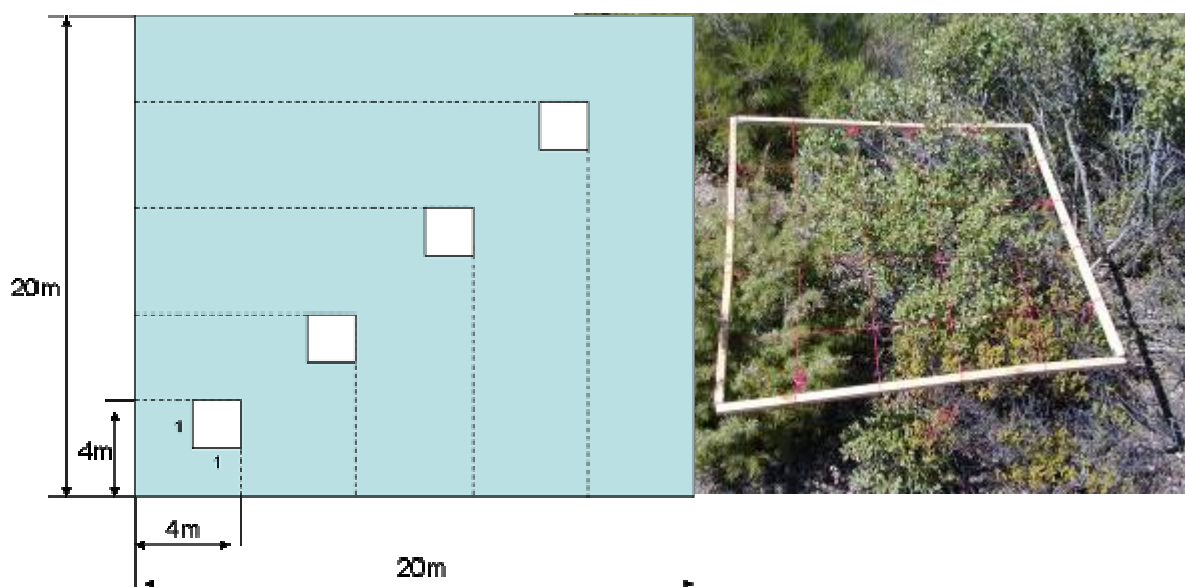
Age: ηλικία του δέντρου

Η εκτίμηση του φορτίου της εναέρια καύσιμης ύλης με τη δημιουργία αλλομετρικών εξισώσεων με ανεξάρτητη μεταβλητή τη στηθαία διάμετρο ανταποκρίθηκε πολύ καλά στα δεδομένα, κάτι που είναι σύμφωνο με πολλές μελέτες βιομάζας παγκοσμίως (Ter-Mikaelian and Korzukhin, 1997; Xiao and Ceulemans, 2004; Wang, 2006). Η στηθαία διάμετρος αποτελεί το χαρακτηριστικό του δέντρου που υπολογίζεται πολύ εύκολα και με ακρίβεια στο πεδίο, και υπάρχει σε όλα τα δασικά διαχειριστικά σχέδια. Από την άλλη, το ύψος ως ανεξάρτητη μεταβλητή στο μοντέλο παλινδρόμησης δεν έδειξε σημαντική συσχέτιση στην εκτίμηση της συνολικής βιομάζας κόμης (μαζί με το ξηρό βάρος του κορμού του δέντρου). Η μέτρηση του ύψους ενός δέντρου στο πεδίο είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία, και λιγότερο ακριβής σε σύγκριση με τη στηθαία διάμετρο. Η ηλικία των δέντρων Τραχείας Πεύκης φαίνεται να συνεισφέρει σημαντικά στην εκτίμηση της συνολικής βιομάζας της κόμης, αλλά αποτελεί δύσκολα μετρήσιμο χαρακτηριστικό στο πεδίο.

Συνεπώς, παρόλο που το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε είναι περιορισμένο (αριθμός δέντρων=6), μπορούμε να ισχυριστούμε ότι οι εξισώσεις για την εκτίμηση φορτίου εναέριας καύσιμης ύλης σε δέντρα Τραχείς Πεύκης σε συνάρτηση με την στηθαία διάμετρο μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά για τους σκοπούς διαχείρισης των δασών. Αρκεί βέβαια η στηθαία διάμετρος των δέντρων θα κυμαίνεται από 9,75 έως 29,3cm. Σε περίπτωση που εφαρμοστούν αλλομετρικές εξισώσεις (8, 9 και 11) για δέντρα με στηθαία διάμετρο εκτός του συγκεκριμένου ορίου η εκτίμηση της βιομάζας θα απέχει σημαντικά από την πραγματικότητα. Προτείνεται να πραγματοποιηθούν σε δάσος Τραχείας Πεύκης επιπλέον δειγματοληψίες ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία έτσι ώστε να μεγαλώσει το δείγμα και το εύρος των ανεξάρτητων μεταβλητών και στη συνέχεια να μπορέσουν οι αλλομετρικές να εφαρμοστούν επιχειρησιακά. Η γνώση του φορτίου της εναέριας καύσιμης ύλης συνεισφέρει στην αξιολόγηση της επικινδυνότητας πυρκαγιάς μιας δασικής συστάδας και στο ενδεχόμενο για έναρξη και διάδοση καταστροφικών πυρκαγιών κόμης.

3.2.3 Εκτίμηση Βιομάζας Θάμνων

Μέσα σε καθεμία από τις έξι (6) δειγματοληπτικές επιφάνειες θάμνων διαστάσεων 20x20 m επιλέχθηκαν τέσσερις (4) τετράγωνες επιφάνειες δειγματοληψίας διαστάσεων 1x1 m (Χάρτης 1, Σχήμα 7), εκτός από την έκτη επιφάνεια στην οποία επιλέχθηκαν πέντε δειγματοληπτικές επιφάνειες 1m², δεδομένης της ελάχιστης κάλυψης σε θάμνους. Σε κάθε δειγματοληπτική επιφάνεια διαστάσεων 1x1 m έλαβε χώρα συγκεκριμένη συστηματική μέτρηση του ύψους, των ειδών βλάστησης και της κάλυψης. Χαρακτηριστικά, το ύψος μετρήθηκε ως ο μέσος όρος δεκαέξι (16) προκαθορισμένων σημείων εντός του τετραγώνου 1x1 m. Η κάλυψη των θάμνων εκτιμήθηκε ως η συνολική προβολή των θάμνων στο έδαφος, χωρίζοντας την τετράγωνη δειγματοληπτική επιφάνεια σε τέσσερα ίσα μέρη και εκτιμώντας το ποσοστό μη-καλυπτόμενου εδάφους από την προβολή της κόμης των θάμνων σε καθένα από αυτά. Η κάλυψη των θάμνων υπολογίστηκε για κάθε τεταρτημόριο ως «100 πλην ποσοστό καλυπτόμενου εδάφους». Στη συνέχεια καταγράφηκε ως κάλυψη για τη δειγματοληπτική επιφάνεια ο μέσος όρος των τεσσάρων εκτιμήσεων.



Σχήμα 7: Απεικόνιση της μεθοδολογίας επιλογής δειγματοληπτικών επιφανειών διαστάσεων 1x1m και καταγραφής των χαρακτηριστικών της βλάστησης

Ακολούθησε κοπή, διαχωρισμός της ζωντανής και νεκρής καύσιμης ύλης σε κατηγορίες και ζύγισμα ανά κατηγορία διαμέτρου και ανά είδος. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια των δειγματοληψιών έγινε συλλογή δειγμάτων από όλες τις κατηγορίες καύσιμης ύλης θάμνων για τον υπολογισμό της περιεχόμενης υγρασίας της καύσιμης ύλης μετά από ξήρανση (105 °C για 48 ώρες). Με βάση αυτή τη μέτρηση ακολούθησε αναγωγή όλων των μετρήσεων βάρους σε ξηρό βάρος. Ο διαχωρισμός της καύσιμης ύλης σε κατηγορίες διαμέτρου (0 - 0,5 cm, 0,5 - 2,5cm, 2,5-7,5 cm και >7,5 cm) είναι απαραίτητος για την περαιτέρω δημιουργία μοντέλων καύσιμης ύλης αντιπροσωπευτικών για την περιοχή μελέτης. Τέλος, σε κάθε επιφάνεια διαστάσεων 1x1 m, μετρήθηκε το ύψος, το βάθος και το βάρος των χόρτων και του ξηροφυλλοτάπητα όπου υπήρχε κάτω από τους θάμνους και εκτιμήθηκε η περιεχόμενη υγρασία τους. Ακολούθησε αναγωγή και υπολογισμός του ξηρού βάρους των χόρτων και του ξηροφυλλοτάπητα. Η μεθοδολογία συλλογής και ανάλυσης των δεδομένων βασίστηκε στη μεθοδολογία που χρησιμοποίησαν οι Xanthopoulos and Manasi (2002).

Τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν και επεξεργάστηκαν με το στατιστικό λογισμικό πακέτο SPSS 15.0 (Norusis, 1990). Η ανάλυση των στοιχείων αρχικά περιέλαβε τον

υπολογισμό των βασικών περιγραφικών στατιστικών στοιχείων. Στον Πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα βασικά περιγραφικά στατιστικά αποτελέσματα των μετρήσεων βιομάζας στις 25 δειγματοληπτικές επιφάνειες 1m² του Δημόσιου Δάσους Κρατήγγου.

		Πλήθος	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέσος Όρος	Τυπική Απόκλιση
LW1	t/ha	25	1,0987	9,7499	5,502100	2,2538016
SH10HR	t/ha	25	0,00	10,5316	2,756088	3,2119732
SHRUBH	m	25	0,0794	0,9206	0,4523480	0,24341479
SHRUBC	%	25	44	100,00	88,25	18,604
SHRUBVC	%	25	40,00	100,00	86,48	18,178
GRASS	t/ha	25	0,0000	0,6733	0,086984	1577365
DW1	t/ha	25	0,4103	7,2210	3,187176	2,0047182
DW10	t/ha	25	0,00	4,2513	0,782996	0,9094938
LITTER	t/ha	25	0,00	25,5104	10,526600	5,9983483
LITTERD	m	25	0,00	,06120	0,0265360	0,01940753
ALOAD	t/ha	25	2,1181	39,2375	20,085856	9,3147836
TLOAD	t/ha	25	2,1181	43,5527	22,841944	11,6213190
SHRUBW	t/ha	25	1,0987	18,8225	8,258188	5,0127122

Πίνακας 1: Βασικά στατιστικά στοιχεία από δειγματοληψίες θάμνων

Όπου,

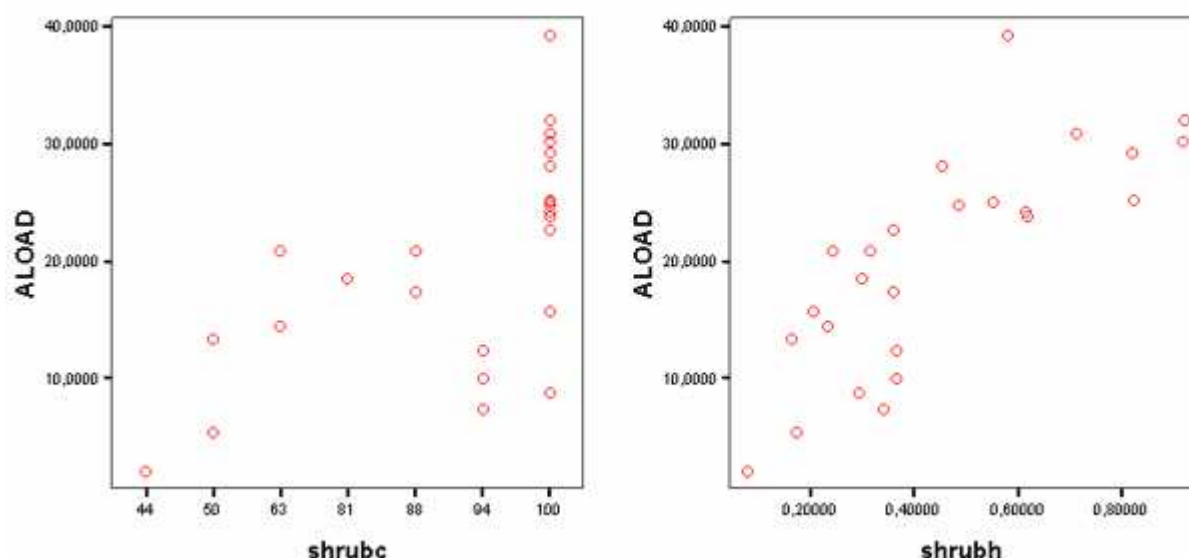
- LW1 : Ζωντανή βιομάζα των θάμνων (φύλλα και λεπτά κλαδάκια διαμέτρου 0-0,5cm)
- SH10HR : Ζωντανή βιομάζα των θάμνων (κλαδάκια διαμέτρου 0,5-2,5cm)
- SHRUBH : Μέσο ύψος θάμνων όπως προκύπτει από τις 16 μετρήσεις (m)
- SHRUBC : Κάλυψη θάμνων (%)
- SHRUBVC : Οπτική εκτίμηση της κάλυψης θάμνων (%)
- GRASS : Βιομάζα χόρτων
- DW1 : Νεκρή ξυλώδης βλάστηση διαμέτρου 0-0,5 cm
- DW10 : Νεκρή ξυλώδης βλάστηση διαμέτρου 0,5-2,5 cm
- LITTER : Βιομάζα ξηροφυλλοτάπητα
- LITTERD : Μέσο βάθος ξηροφυλλοτάπητα όπως προκύπτει από τις 16 μετρήσεις (m)
- ALOAD : Ενεργό φορτίο καύσιμης ύλης που χρησιμοποιείται στο Σύστημα Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς BehavePlus
LW1+GRASS+LITTER+DW1+DW10
- SHRUBW : Ζωντανή βιομάζα θάμνων (φύλλα, κλαδιά διαμέτρου 0-2,5 cm)
LW1 + SH10HR
- TLOAD : Συνολική βιομάζα θάμνων
SHRUBW+GRASS+LITTER+DW1+DW10

Η βιομάζα ή το φορτίο καύσιμης ύλης εκφράζεται σε βάρος ανά μονάδα επιφάνειας, τόνους ανά εκτάριο (t/ha), όπου 1 ha = 10 στρέμματα.

Αναφορικά με τις ανεξάρτητες μεταβλητές, η κάλυψη των θάμνων κυμαίνεται από 0 έως 100% και καλύπτει κατά μέσο όρο το 88,25% της δειγματοληπτικής επιφάνειας διαστάσεων 1X1m. Το ύψος των θάμνων που κυμαίνεται από 0 έως 92 cm είναι κατά μέσο όρο 45,23 cm.

Στη συνέχεια η έρευνα επικεντρώθηκε στη δημιουργία εξισώσεων γραμμικής και μη παλλινδρόμησης για την ορθότερη εκτίμηση της βιομάζας θάμνων. Ως εξαρτημένες μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν τόσο η συνολική βιομάζα θάμνων (TLOAD) όσο και μέρη αυτής (ενεργή βιομάζα – ALOAD) και (ζωντανή βιομάζα θάμνων - SHRUBW). Η ενεργή βιομάζα περιλαμβάνει όλη τη ζωντανή βιομάζα των θάμνων διαμέτρου 0 -0,5 cm και τη νεκρή βιομάζα όλων των κατηγοριών διαμέτρου <7,5 cm.

Από τα σχεδιαγράμματα συσχέτισης της ενεργής βιομάζας με τις ανεξάρτητες μεταβλητές παρατηρούμε ότι η σχέση της ενεργής βιομάζας με την κάλυψη των θάμνων δεν είναι γραμμική. Η συσχέτιση της ενεργής βιομάζας με το ύψος έδειξε ότι υπάρχει αυξητική τάση της ενεργής βιομάζας με το ύψος των θάμνων (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Ενεργή βιομάζα σε σχέση με το ύψος και την κάλυψη των θάμνων.

Οι αλλομετρικές εξισώσεις που αναπτύχθηκαν με εξαρτημένη μεταβλητή την ενεργή βιομάζα και ανεξάρτητες το ύψος και την κάλυψη του θάμνου είναι οι εξής:

$$ALOAD = e^{\left(3.565 - \frac{0,23}{SHRUBH}\right)} \quad (13)$$

$$\ln(ALOAD) = 3.565 - \frac{0,23}{SHRUBH} \quad (14)$$

$$R^2 = 0,708$$

$$ALOAD = 6,563 + 29,895 \cdot SHRUBH \quad (15)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0,593$$

$$\text{ALOAD} = e^{\left(4,323 - \frac{122,433}{\text{SHRUBC}}\right)} \quad (16)$$

$$\ln(\text{ALOAD}) = 4,323 - \frac{122,433}{\text{SHRUBC}} \quad (17)$$

$$R^2 = 0,487$$

όπου,

N=25

R²: Συντελεστής προσδιορισμού

Adjusted R²: Προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού

ALOAD = ενεργή βιομάζα (t/ha)

SHRUBH = ύψος θάμνων (cm)

SHRUBC = κάλυψη θάμνων (%)

Η διασπορά που παρατηρείται στις τιμές της ενεργής βιομάζας με την κάλυψη των θάμνων είναι μια ένδειξη ότι η κάλυψη από μόνη της δεν μπορεί να εξηγήσει την μεταβολή της ενεργής βιομάζας. Για το λόγο αυτό δημιουργήθηκαν κάποιες επιπλέον ανεξάρτητες μεταβλητές που συνδυάζουν το ύψος με την κάλυψη των θάμνων:

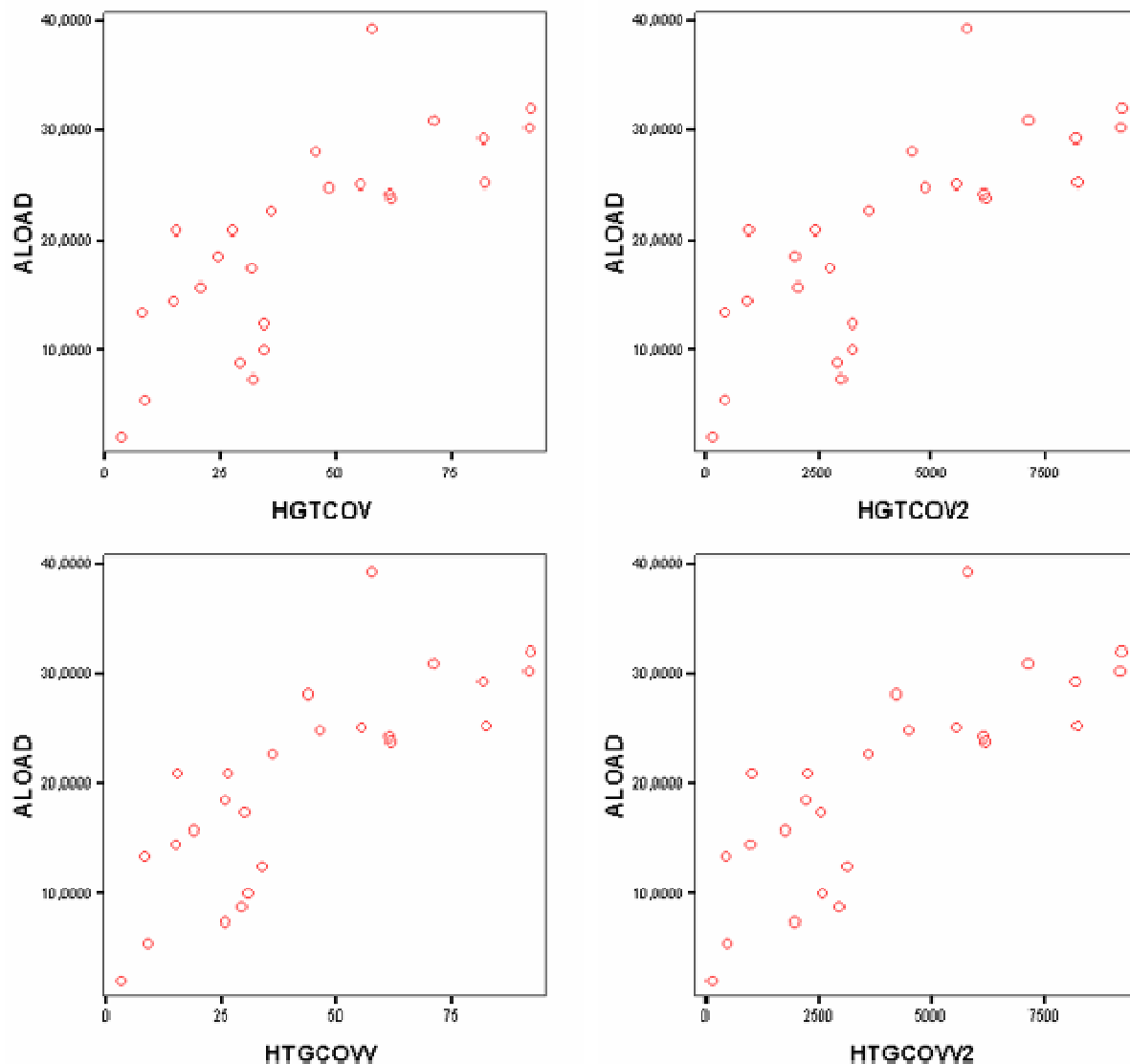
HGTCOV Ύψος θάμνου * κάλυψη θάμνου
SHRUBH*SHRUBC

HGTCOV2 Ύψος θάμνου * κάλυψη θάμνου²
SHRUBH*SHRUBC²

HGTCOVV Ύψος θάμνου * οπτική εκτίμηση της κάλυψης θάμνου
SHRUBH*SHRUBVC

HGTCOVV2 Ύψος θάμνου * οπτική εκτίμηση της κάλυψης θάμνου²
SHRUBH*SHRUBVC²

Στο Σχήμα 9 απεικονίζονται οι σχέσεις της ενεργής βιομάζας με τα γινόμενα του ύψους θάμνων με την κάλυψη, του ύψους θάμνων με το τετράγωνο της κάλυψης των θάμνων, του ύψους θάμνων με την οπτική εκτίμηση κάλυψης των θάμνων και του ύψους θάμνων με το τετράγωνο της οπτικής εκτίμησης κάλυψης των θάμνων.



Σχήμα 9: Ενεργή βιομάζα (ALOAD) σε σχέση με τα γινόμενα HGTCOV, HGTCOV2, HGTCOVV, HGTCOVV2 των θάμνων.

Οι παρατηρήσεις αυτές απεικονίζονται και στον πίνακα συσχετίσεων, όπου όλες οι συσχετίσεις εμφανίζονται όχι ιδιαίτερα ισχυρές, αλλά εξίσου σημαντικές στην ανάλυση παλινδρόμησης που ακολουθεί. Ο πιο κοινός συντελεστής συσχέτισης είναι ο συντελεστής Pearson, ο οποίος είναι ένας δείκτης του μεγέθους της συσχέτισης μεταξύ δύο ή και περισσότερων συνόλων τιμών (Πίνακας 2). Κυμαίνεται σε μέγεθος από +1.00 μέχρι -1.00. Το πρόσημο “+” σημαίνει θετική συσχέτιση, δηλαδή ότι οι τιμές μίας μεταβλητής (π.χ. ALOAD) αυξάνονται όταν αυξάνονται και της άλλης (π.χ. SHRUBH).

		ALOAD	SHRUBH	SHRUBC	SHRUBVC	HGTCOV	HGTCOV2	HTGCOVV	HTGCOVV2
ALOAD	Pearson Correlation	1	,781(**)	,604(**)	,701(**)	,780(**)	,776(**)	,791(**)	,792(**)
	Sig. (2-tailed)		,000	,001	,000	,000	,000	,000	,000
	N	25	25	25	25	25	25	25	25
SHRUBH	Pearson Correlation	,781(**)	1	,671(**)	,728(**)	,996(**)	,990(**)	,996(**)	,990(**)
	Sig. (2-tailed)	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	25	25	25	25	25	25	25	25
SHRUBC	Pearson Correlation	,604(**)	,671(**)	1	,969(**)	,723(**)	,741(**)	,705(**)	,710(**)
	Sig. (2-tailed)	,001	,000		,000	,000	,000	,000	,000
	N	25	25	25	25	25	25	25	25
SHRUBVC	Pearson Correlation	,701(**)	,728(**)	,969(**)	1	,772(**)	,786(**)	,766(**)	,776(**)
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000		,000	,000	,000	,000
	N	25	25	25	25	25	25	25	25
HGTCOV	Pearson Correlation	,780(**)	,996(**)	,723(**)	,772(**)	1	,999(**)	,998(**)	,996(**)
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,000
	N	25	25	25	25	25	25	25	25
HGTCOV2	Pearson Correlation	,776(**)	,990(**)	,741(**)	,786(**)	,999(**)	1	,996(**)	,996(**)
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000		,000	,000
	N	25	25	25	25	25	25	25	25
HTGCOVV	Pearson Correlation	,791(**)	,996(**)	,705(**)	,766(**)	,998(**)	,996(**)	1	,999(**)
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000		,000
	N	25	25	25	25	25	25	25	25
HTGCOVV2	Pearson Correlation	,792(**)	,990(**)	,710(**)	,776(**)	,996(**)	,996(**)	,999(**)	1
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	
	N	25	25	25	25	25	25	25	25

** Η συσχέτιση είναι σημαντική σε επίπεδο σημαντικότητας 0,01

Πίνακας 2: Πίνακας συσχετίσεων της ενεργής βιομάζας με τις ανεξάρτητες μεταβλητές ύψους και κάλυψης θάμνων (Pearson 2-tailed)

Η μορφή της συναρτησιακής σχέσης και οι τιμές των παραμέτρων (συντελεστών) υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τη θεωρία της ανάλυσης παλινδρόμησης από τη στατιστική (SPSS 15.0). Έτσι, οι αλλομετρικές εξισώσεις που έχουν την μεγαλύτερη συσχέτιση της εξαρτημένης μεταβλητής (ALOAD) με τις ανεξάρτητες (HGTCOV, HGTCOV2, HGTCOVV, HGTCOVV2) επιλέχθηκαν και παρουσιάζονται ακολούθως:

$$\text{ALOAD} = 1,805 \cdot \text{HGTCOV}^{0,643} \quad (18)$$

$$\text{ή} \quad \ln(\text{ALOAD}) = \ln(1,805) + 0,643 \cdot \ln(\text{HGTCOV}) \quad (19)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0,650$$

$$\text{ALOAD} = 0,350 \cdot \text{HGTCOV2}^{0,489} \quad (20)$$

$$\text{ή} \quad \ln(\text{ALOAD}) = \ln(0,350) + 0,489 \cdot \ln(\text{HGTCOV2}) \quad (21)$$

$$R^2 = 0,624$$

$$\text{ALOAD} = 1,747 \cdot \text{HGTCOV}^{0,656} \quad (22)$$

$$R^2 = 0,684$$

$$\text{ή} \quad \ln(\text{ALOAD}) = \ln(1,747) + 0,656 \cdot \ln(\text{HGTCOV}) \quad (23)$$

$$\text{ALOAD} = 0,307 \cdot \text{HGTCOVV2}^{0,509} \quad (24)$$

$$\text{ή} \quad \ln(\text{ALOAD}) = \ln(0,307) + 0,509 \cdot \ln(\text{HGTCOVV2}) \quad (25)$$

$$R^2 = 0,682$$

Όπου,

N=25

R²: Συντελεστής προσδιορισμού

Adjusted R²: Προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού

ALOAD = "ενεργό" φορτίο καύσιμης ύλης (t/ha)

HGTCOV = Γινόμενο ύψος θάμνου με κάλυψη θάμνων

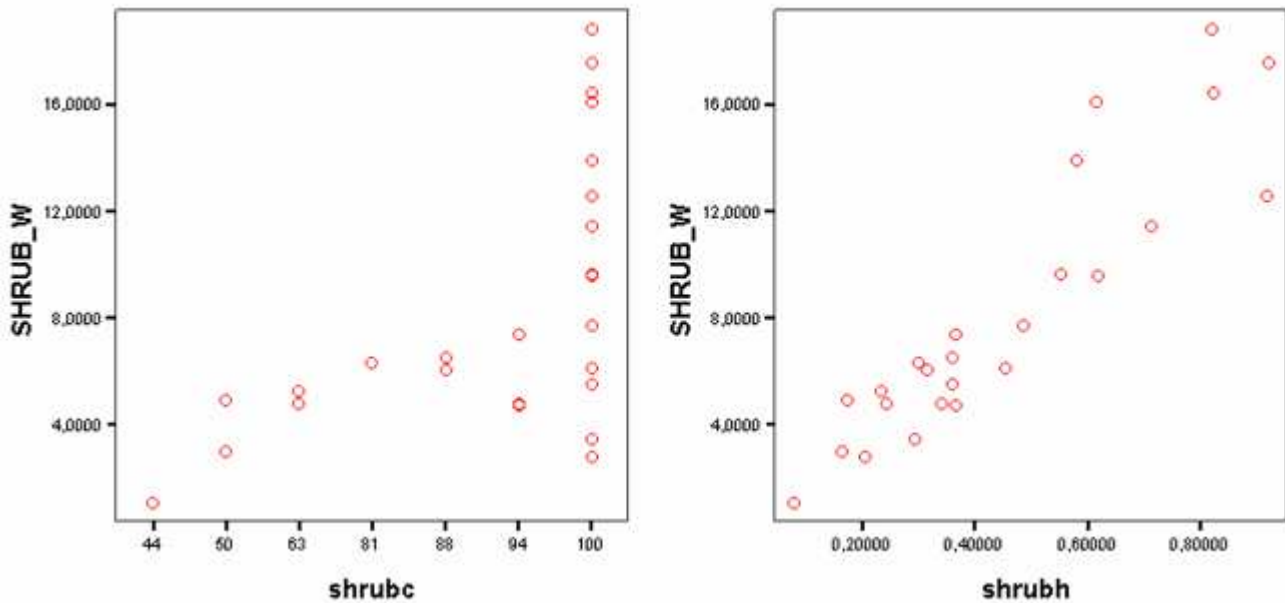
HGTCOV2 = Γινόμενο ύψος με (κάλυψη θάμνων)²

HGTCOVV = Γινόμενο ύψος θάμνου με οπτική εκτίμηση της κάλυψης θάμνου

HGTCOVV2 = Γινόμενο ύψος θάμνου με (οπτική εκτίμηση της κάλυψης θάμνου)²

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εξέταση των δεδομένων μέσω διαγραμμάτων ανάμεσα στη ζωντανή βιομάζα θάμνων (φύλλα, κλαδιά διαμέτρου 0-2,5 cm) και τις ανεξάρτητες μεταβλητές (SHRUBH, SHRUBC, SHRUBVC, HGTCOV, HGTCOV2, HGTCOVV, HGTCOVV2). Από το σχήμα 10 παρατηρείται ότι η συσχέτιση της ζωντανής βιομάζας θάμνων με την κάλυψη των θάμνων δεν είναι γραμμική και ότι μεγάλος αριθμός των δειγμάτων καλύπτονται από θάμνους κατά 100%. Από την

άλλη, παρατηρείται αυξητική τάση της ζωντανής βιομάζας θάμνων καθώς αυξάνει το ύψος των θάμνων, κάτι που είναι λογικό να συμβαίνει.



Σχήμα 10: Διαγράμματα διασποράς βιομάζας θάμνων με κάλυψη - ύψος θάμνων

Επόμενο στάδιο ήταν η δημιουργία αλλομετρικών εξισώσεων για την εκτίμηση της βιομάζας θάμνων, μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης. Τα αποτελέσματα έχουν ως εξής:

$$\text{SHRUBW} = 18,235 \cdot \text{SHRUBH}^{1,036} \quad (26)$$

$$\text{ή} \quad \ln(\text{SHRUBW}) = \ln(18,235) + 1,036 \cdot \ln(\text{SHRUBH}) \quad (27)$$

$$R^2 = 0,876$$

$$\text{SHRUBW} = e^{\left(3,321 - \frac{116,012}{\text{SHRUBC}}\right)} \quad (28)$$

$$\text{ή} \quad \ln(\text{SHRUBW}) = 3,321 - \frac{116,012}{\text{SHRUBC}} \quad (29)$$

$$R^2 = 0,425$$

$$\text{SHRUBW} = 0,993 + 0,170 \cdot \text{HGTCOV} \quad (30)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0,812$$

$$\text{SHRUBW} = 1,703 + 0,002 \cdot \text{HGTCOV2} \quad (31)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0,785$$

$$\text{SHRUBW} = 1,604 + 0,140 \cdot \text{HGTCOVV} \quad (32)$$

Adjusted $R^2 = 0,824$

$$\text{SHRUBW} = 1,906 + 0,002 \cdot \text{HGTCOVV2} \quad (33)$$

Adjusted $R^2 = 0,802$

Όπου,

$N=25$

R^2 : Συντελεστής προσδιορισμού

Adjusted R^2 : Προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού

SHRUBW = βιομάζα θάμνων (t/ha)

SHRUBH = ύψος θάμνων (m)

SHRUBC = κάλυψη θάμνων (%)

HGTCOV = Ύψος των θάμνων (cm) * κάλυψη θάμνων (%)

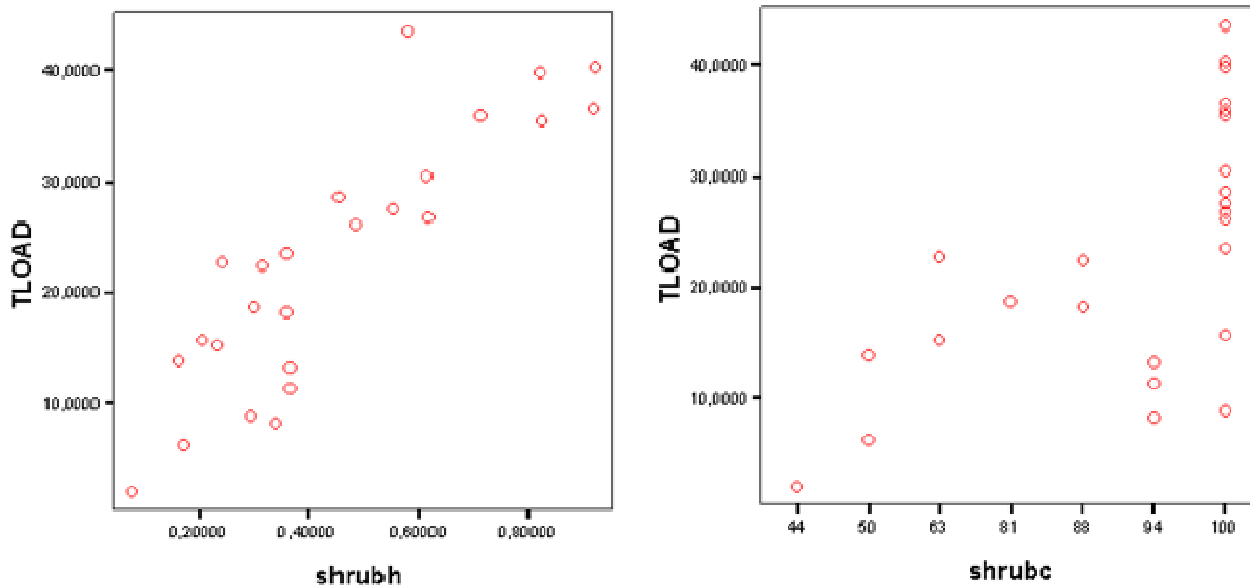
HGTCOV2= Ύψος των θάμνων (cm) * (κάλυψη θάμνων (%))²

HGTCOVV = Γινόμενο ύψος θάμνου με οπτική εκτίμηση της κάλυψης θάμνου

HGTCOVV2 = Γινόμενο ύψος θάμνου με (οπτική εκτίμηση της κάλυψης θάμνου)²

Όπως φαίνεται από τις εξισώσεις 26-33 η εκτίμηση του φορτίου της βιομάζας των θάμνων (SHRUBW), χωρίς την προσθήκη του φορτίου των χόρτων και του ξηροφυλλοτάπητα, είναι αρκετά επιτυχής μία και οι ανεξάρτητες μεταβλητές (ύψος, κάλυψη) αποτελούν μετρήσεις θάμνων.

Η συνολική βιομάζα θάμνων (TLOAD) περιλαμβάνει τη βιομάζα θάμνων (SHRUBW), τη βιομάζα χόρτων, τη βιομάζα ξηροφυλλοτάπητα και τη νεκρή ξυλώδες βιομάζα διαμέτρου 0 - 2,5 cm. Η συσχέτιση της συνολικής βιομάζας με την κάλυψη και το ύψος των θάμνων αναπαρίσταται στα ακόλουθα διαγράμματα διασποράς (Σχήμα 11). Παρατηρούμε ότι η διασπορά των σημείων στην περίπτωση συσχέτισης συνολικής βιομάζας θάμνων με το ύψος των θάμνων είναι σχετικά μικρή, γεγονός που δείχνει ότι υπάρχει σχετικά μεγάλη συσχέτιση. Η κλίση της διασποράς δείχνει μία μάλλον ευθεία γραμμή, ένδειξη ότι υπάρχει περισσότερο γραμμική παρά καμπυλόγραμμη συσχέτιση.



Σχήμα 11: Διαγράμματα διασποράς βιομάζας θάμνων με κάλυψη - ύψος θάμνων

Μετά από ανάλυση παλινδρόμησης στο στατιστικό λογισμικό πακέτο SPSS 15.0, δημιουργήθηκαν οι ακόλουθες αλλομετρικές εξισώσεις:

$$\mathbf{TLOAD = 3,711 + 24,813 \cdot SHRUBH + 75,744 \cdot SHRUBH^2 - 67,13 \cdot SHRUBH^3} \quad (34)$$

$$R^2 = 0,779$$

$$\mathbf{TLOAD = 0,005 \cdot SHRUBC^{1,845}} \quad (35)$$

$$\eta \ln(\mathbf{TLOAD}) = \ln(0,005) + 1,845 \cdot \ln(\mathbf{SHRUBC}) \quad (36)$$

$$R^2 = 0,461$$

$$\mathbf{TLOAD = 5,257 + 0,463 \cdot HGTCOV - 0,001 \cdot HGTCOV^2} \quad (37)$$

$$R^2 = 0,748$$

$$\mathbf{TLOAD = 6,708 + 0,377 \cdot HGTCOV} \quad (38)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0,734$$

$$\mathbf{TLOAD = 8,23 + 0,004 \cdot HGTCOV2} \quad (39)$$

$$\text{Adjusted } R^2 = 0,723$$

$$\mathbf{TLOAD = 4,382 + 0,527 \cdot HGTCOVV - 0,002 \cdot HGTCOVV^2} \quad (40)$$

$$R^2 = 0,771$$

$$\text{TLOAD} = 8,561 + 0,004 \cdot \text{HGTCOVV2} \quad (41)$$

Adjusted $R^2 = 0,752$

όπου,

$N=25$

R^2 : Συντελεστής προσδιορισμού

Adjusted R^2 : Προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού

TLOAD = Συνολική βιομάζα θάμνων

SHRUBH = ύψος θάμνων (m)

SHRUBC = κάλυψη θάμνων (%)

HGTCOV = Ύψος των θάμνων (cm) * κάλυψη θάμνων (%)

HGTCOV2= Ύψος των θάμνων (cm) * (κάλυψη θάμνων (%))²

HGTCOVV = Γινόμενο ύψος θάμνου με οπτική εκτίμηση της κάλυψης θάμνου

HGTCOVV2 = Γινόμενο ύψος θάμνου με (οπτική εκτίμηση της κάλυψης θάμνου)²

Ο υψηλός συντελεστής προσδιορισμού R^2 υποδεικνύει ισχυρή σχέση ανάμεσα στις ανεξάρτητες μεταβλητές και συνεπώς, όσο ισχυρότερη είναι η συσχέτιση τόσο πιο αξιόπιστη θα είναι και η πρόβλεψη. Από πλευράς στατιστικών μεθόδων οι αλλομετρικές εξισώσεις εκτίμησης βιομάζας των θάμνων είναι αποδεκτές, καθώς καλύπτουν ένα φάσμα κάλυψης θάμνων (44 - 100%) και ύψους θάμνων (8,0-0,92 cm). Προκειμένου όμως οι εξισώσεις αυτές να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά, θα πρέπει να μεγαλώσει το μέγεθος του δείγματος, με δεδομένα είτε της περιοχής μελέτης είτε από άλλες περιοχές της Ελλάδας χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία δειγματοληψίας, και να επιβεβαιωθεί ή να βελτιωθεί ο συντελεστής προσδιορισμού. Επόμενο βήμα στην μελέτη είναι η ανάπτυξη μεθοδολογίας σύνδεσης των αλλομετρικών εξισώσεων με δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης για εκτίμηση βιομάζας μιας δασικής περιοχής.

3.3 Εκτίμηση βιομάζας από δορυφορικές εικόνες υψηλής ανάλυσης

Ο όρος *τηλεπισκόπηση* χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συλλογή, ανάλυση και ερμηνεία της πληροφορίας γύρω από ένα στόχο για την αναγνώριση και μέτρηση των ιδιοτήτων του, εξετάζοντας τις αλληλεπιδράσεις του με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (Μερτίκας, 1999). Η παρατήρηση της επιφάνειας της γης είναι δυνατή με τη χρήση ψηφιακών σαρωτών (τηλεπισκοπικών ανιχνευτών) που είναι εγκατεστημένοι σε τεχνητούς δορυφόρους που ανιχνεύουν την αντανάκλαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας της γήινης επιφάνειας και την αποδίδουν ως ψηφιακή εικόνα (Καρτάλης και Φείδας, 2006). Στις μέρες μας, οι δορυφορικές εικόνες αποτελούν μία από τις πιο διαδεδομένες μορφές καταγραφής δεδομένων, που η εφαρμογή τους ποικίλει ανάλογα με τις χαρακτηριστικές τους ιδιότητες (χωρική διακριτική ικανότητα, φασματική και ραδιομετρική ανάλυση).

Βασική αρχή λειτουργίας των τηλεπισκοπικών ανιχνευτών (ψηφιακών σαρωτών) είναι ότι η γήινη επιφάνεια απορροφά, εκπέμπει ή ανακλά την ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται. Έτσι, διαφορετικά υλικά ανακλούν και απορροφούν με διαφορετικό τρόπο στα διάφορα μήκη κύματος. Η κατανομή της ανακλώμενης, εκπεμπόμενης ή απορροφώμενης ακτινοβολίας από μια επιφάνεια σε σχέση με το μήκος κύματος λ καλείται ως *φασματική απόκριση* (Καρτάλης και Φείδας, 2006). Κάθε υλικό παρουσιάζει διαφορετική φασματική απόκριση η μελέτη της οποίας μας επιτρέπει τη διάκριση μιας επιφάνειας από κάποια άλλη και την εξαγωγή πληροφορίας σχετικά με το σχήμα, το μέγεθος, τις φυσικές ακόμα και τις χημικές ιδιότητές της. Η μορφή της καμπύλης της φασματικής απόκρισης μιας επιφάνειας σε σχέση με το μήκος κύματος λ καλείται *φασματική υπογραφή* της επιφάνειας και είναι μοναδική για κάθε επιφάνεια (Μερτίκας, 1999).

Η βλάστηση έχει μια μοναδική φασματική υπογραφή η οποία καθιστά ικανό τον άμεσο διαχωρισμό της από άλλους τύπους εδαφοκάλυψης σε μια εικόνα στο ορατό ή στο εγγύς υπέρυθρο. Οι φωτοχρωστικές ουσίες του φύλλου των φυτών (κυρίως η χλωροφύλλη) απορροφούν κυρίως στο ορατό φάσμα για τη φωτοσύνθεση. Η υγιής πράσινη βλάστηση απορροφά ισχυρά στο ορατό φάσμα και ιδιαίτερα στην ερυθρή ακτινοβολία (0.63-0.69μm), ενώ ταυτόχρονα ανακλά ισχυρά στο κοντινό υπέρυθρο μέρος του φάσματος (0.76-0.90μm). Κατά συνέπεια, στο ερυθρό η φασματική υπογραφή της βλάστησης παρουσιάζει ελάχιστο, ενώ στο εγγύς υπέρυθρο παρουσιάζει τοπικό μέγιστο.

Η αντίθεση (διαφορά) μεταξύ της ανάκλασης στο ερυθρό και στο κοντινό υπέρυθρο είναι μια ευαίσθητη μέτρηση της ποσότητας της βλάστησης. Έτσι, τα τηλεπισκοπικά δεδομένα από το ερυθρό (RED) και το κοντινό υπέρυθρο (NIR) μπορούν να συνδυαστούν και να αποτελέσουν τους λεγόμενους *δείκτες βλάστησης – vegetation indices*. Οι δείκτες βλάστησης είναι πολύ καλοί φασματικοί μετασχηματισμοί δύο ή περισσότερων καναλιών μιας δορυφορικής εικόνας, συνήθως του ερυθρού και του κοντινού υπέρυθρου, και έχουν σχεδιαστεί για να βελτιώνουν το σήμα της βλάστησης ώστε να επιτρέπουν αξιόπιστες χωρικές και χρονικές συγκρίσεις της επίγειας φωτοσυνθετικής δραστηριότητας και των δομικών μεταβολών της κόμης.

Ο περισσότερο χρησιμοποιημένος δείκτης βλάστησης είναι ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) που ορίζεται ως εξής (Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

όπου,

NIR: η ανακλαστικότητα στο κοντινό υπέρυθρο και

RED: η ανακλαστικότητα στο ερυθρό κανάλι.

Το συγκριτικό πλεονέκτημα του Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης (NDVI) με τους άλλους δείκτες είναι οι ιδιότητες που προκύπτουν από το γεγονός ότι είναι λόγος. Η κανονικοποίηση μέσω διαίρεσης με άθροισμα ελαχιστοποιεί την πιθανότητα διαίρεσης με μηδέν. Επίσης, ο δείκτης NDVI βοηθάει στην εξομάλυνση διαφόρων εξωτερικών παραγόντων, όπως οι αλλαγές στις συνθήκες φωτισμού, η επιφανειακή κλίση και η έκθεση.

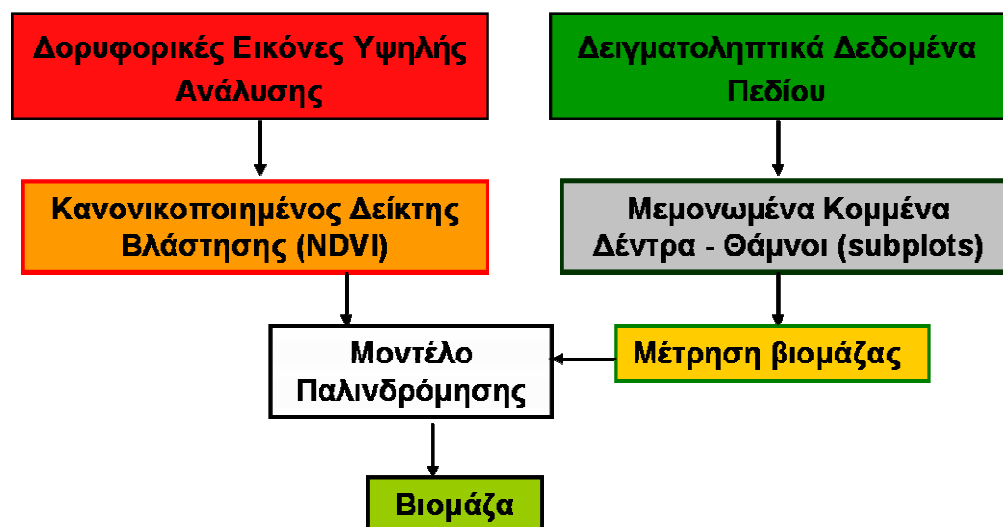
Ο λόγος που ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (NDVI) σχετίζεται με τη βλάστηση είναι ότι στο κοντινό υπέρυθρο μέρος του φάσματος η ανάκλαση της υγιούς βλάστησης αυξάνει πάρα πολύ (40-50%) λόγω της εσωτερικής δομής των φύλλων, ενώ στην περιοχή του ορατού (μπλε ως ερυθρό) η ανάκλαση της υγιούς βλάστησης είναι πολύ μικρότερη (20% ή λιγότερη) εξαιτίας της μεγάλης απορρόφησης της ακτινοβολίας από τη χλωροφύλλη για τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Το εύρος των τιμών του NDVI κυμαίνεται από -1 έως +1. Μεγάλες τιμές του δείκτη αντιπροσωπεύουν πυκνή βλάστηση με υγιές και πράσινο φύλλωμα, εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς ανακλαστικότητας μεταξύ του κοντινού υπέρυθρου και του ορατού φάσματος.

Ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (NDVI) χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο ως έμμεσος παράγοντας στη μελέτη των βιοφυσικών ιδιοτήτων της βλάστησης, όπως βιομάζα (Pearson and Miller, 1972; Tucker, 1979; Turker et al., 1981) και ο δείκτης έκτασης φυλλώματος (Leaf Area Index-LAI) (Hoben et al., 1980; Bandwar et al., 1986; Clevers, 1988; Clevers, 1989; Spanner et al., 1990; Baret and Guyot, 1991; Chen, 1996).

3.3.1 Μεθοδολογία - Αποτελέσματα

Ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρησιμοποίηση δορυφορικών εικόνων υψηλής χωρικής ανάλυσης για την εκτίμηση βιομάζας καύσιμης ύλης, χρησιμοποιώντας δεδομένα πεδίου (όπως στηθαία διάμετρος-DBH, ύψος, διάμετρο κόμης), αλλομετρικές εξισώσεις ή/και δείκτες βλάστησης. Ένας από τους επιμέρους στόχους της παρούσας μελέτης ήταν η ανάπτυξη μεθοδολογίας εκτίμησης βιομάζας δέντρων Τραχείας Πεύκης στο δάσος Κρατήγου (Λέσβος) μέσω πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων υψηλής ανάλυσης, καθορίζοντας τη σχέση βιομάζας και Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης (NDVI).

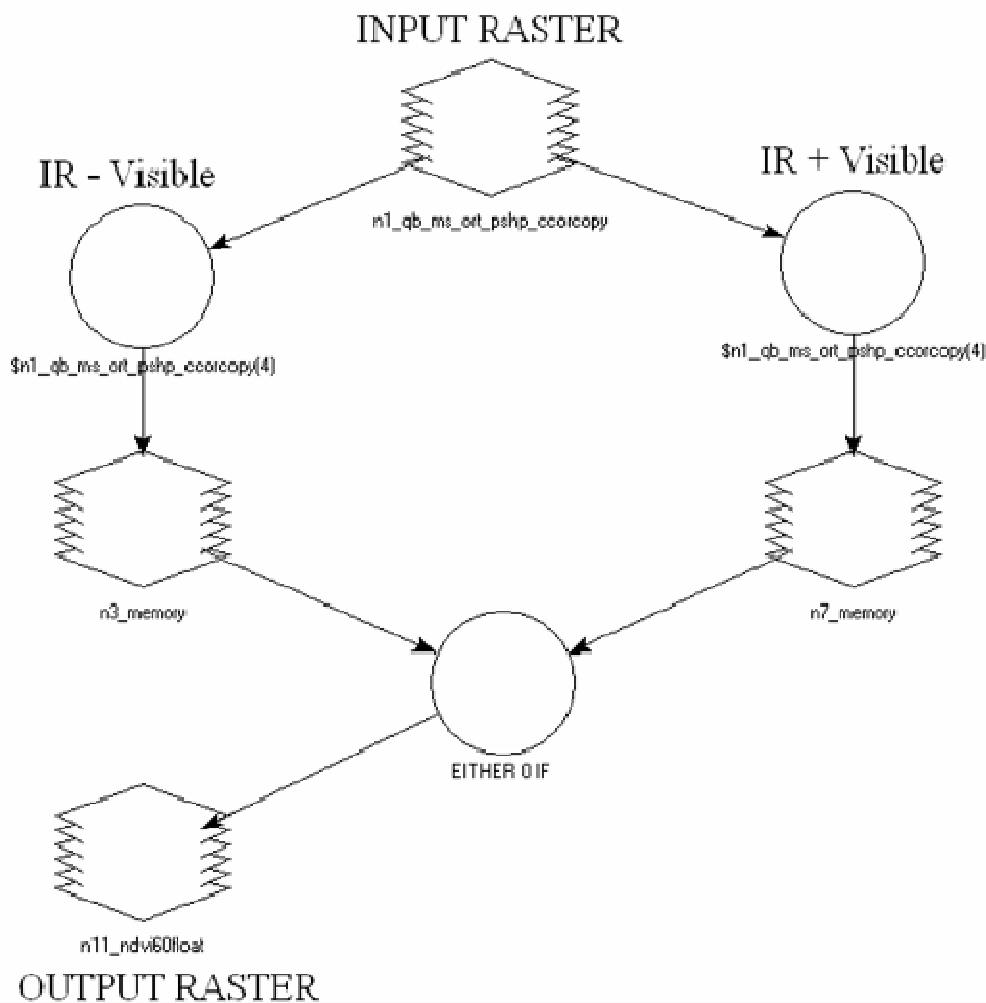
Τα μεθοδολογικά βήματα που ακολουθήθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 12:



Σχήμα 12: Μεθοδολογία εκτίμησης βιομάζας δέντρων μέσω δορυφορικών εικόνων

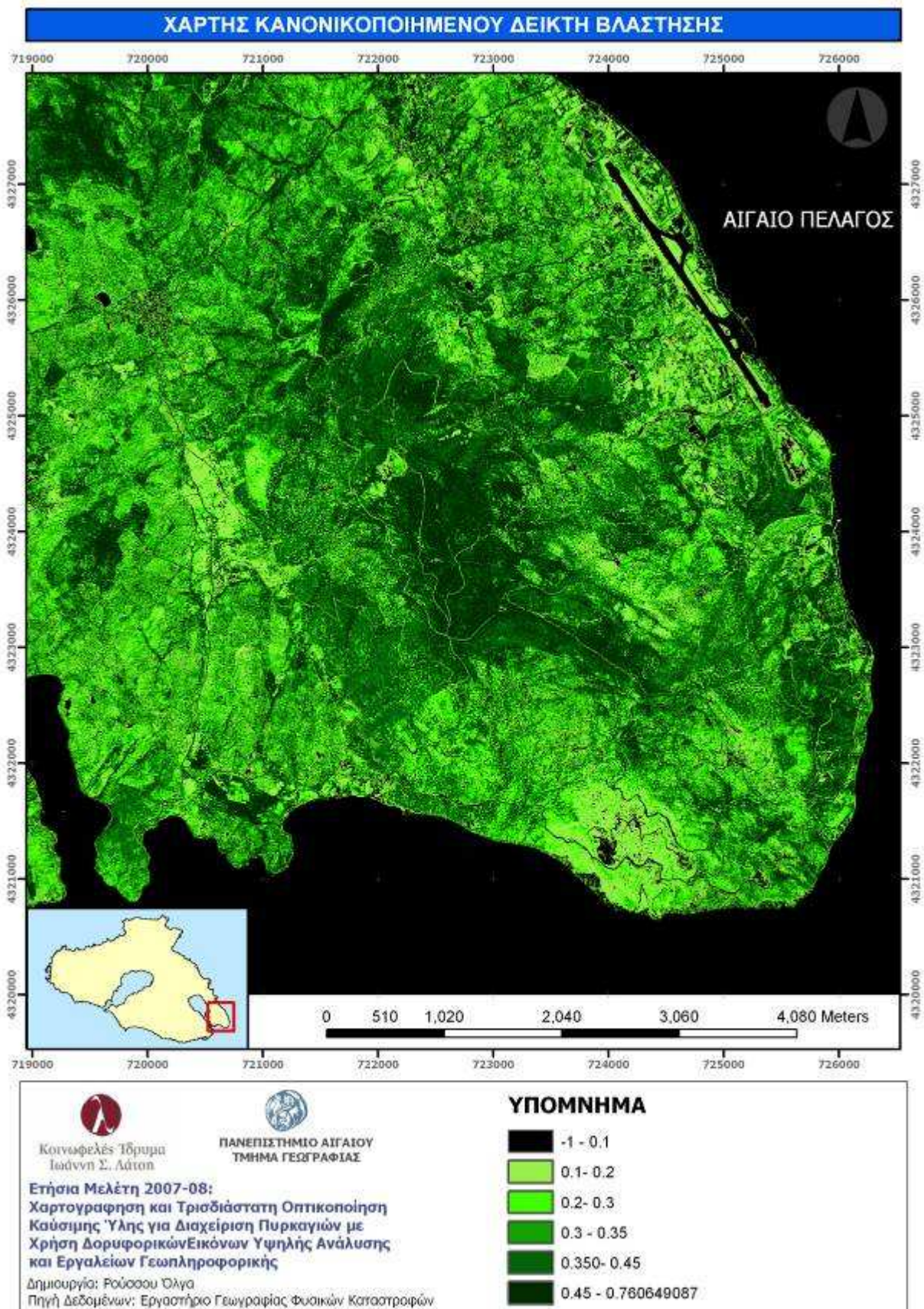
Ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (NDVI) υπολογίστηκε από την διαζευγμένη πολυφασματική δορυφορική εικόνα QuickBird χωρικής ανάλυσης 0.6m της περιοχής ενδιαφέροντος με τη βοήθεια του λογισμικού ERDAS Imagine 8.7 (Απόκτηση QuickBird 2.8m: Ιούνιος 2002, QuickBrd 0.6m: Ιούνιος 2003). Δεδομένου ότι το συγκεκριμένο λογισμικό δεν διαθέτει πρότυπο μοντέλο υπολογισμού του δείκτη NDVI για τις δορυφορικές εικόνες QuickBird, δημιουργήθηκε ένα νέο μοντέλο για τον υπολογισμό του δείκτη (Σχήμα 13). Στο αρχείο εξόδου, η τιμή κάθε εικονοστοιχείου προκύπτει από τον τύπο υπολογισμού του συγκεκριμένου δείκτη $(NIR-RED)/(NIR+RED)$, τα οποία είναι για την QuickBird τα κανάλια 4 (NIR) και 3(RED).

Normalized Difference Vegetation Index



Σχήμα 13: Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του NDVI

Στην περιοχή της Χερσονήσου Αμαλίας οι τιμές του Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης (NDVI) κυμαίνονται από -1 έως 0.7606 (Χάρτης 13). Οι αρνητικές και οι μηδενικές τιμές του δείκτη NDVI δεν αποτελούν βλάστηση και απεικονίζουν γυμνό έδαφος, νερό και αστικές περιοχές. Στον Χάρτη 13 οι τιμές αυτές απεικονίζονται με μαύρο χρώμα. Οι τιμές του δείκτη NDVI που αντιστοιχούν σε βλάστηση στην περιοχή κυμαίνονται από 0.1 έως 0.7606. Με ανοικτές αποχρώσεις του πράσινου απεικονίζεται η χορτολιβαδική βλάστηση, ενώ με σκούρο πράσινο απεικονίζεται το πυκνό δάσος κωνοφόρων.



Χάρτης 13: Αρχείο εξόδου του μοντέλου υπολογισμού του Δείκτη NDVI (QB 0.6m)

Από την καταστροφική δειγματοληψία των έξι (6) δέντρων Τραχείας Πεύκης στην περιοχή μελέτης έγινε εκτίμηση της βιομάζας αυτών (βλ. παρ. 3.2.2 της παρούσας μελέτης). Στη συνέχεια, με βάση την μέση ακτίνα της κόμης του κάθε δέντρου υπολογίστηκε το εμβαδόν της κόμης, εκτιμήθηκε η βιομάζα ανά τετραγωνικό μέτρο (kg/m^2) και έγινε αναγωγή του εμβαδού στα 0.6m, δεδομένου ότι η δορυφορική εικόνα της περιοχής έχει χωρική διακριτική ικανότητα 0.6m. Έγινε η παραδοχή ότι η κόμη του κάθε δέντρου είναι σε μορφή κύκλου. Η ακτίνα του κύκλου υπολογίστηκε από τη μέση διάμετρο της κόμης, η οποία μετρήθηκε πριν την κοπή κάθε δέντρου σε δύο κατευθύνσεις (βορράς-νότος, ανατολή-δύση). Με τη βοήθεια του προγράμματος ArcMap και γνωρίζοντας τις συντεταγμένες κάθε δέντρου που κόπηκε, εκτιμήθηκε μία μέση τιμή του NDVI για κάθε δέντρο (NDVI_4p). Η μέση τιμή προέκυψε από τις τιμές του NDVI στα τέσσερα πιο γειτονικά εικονοστοιχεία (pixels) του σημείου κοπής του δέντρου. Στο Πίνακα 3 φαίνονται τα βασικά περιγραφικά στατιστικά αποτελέσματα των μετρήσεων των δέντρων και του Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης.

	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέσος όρος	Τυπική Απόκλιση
Βιομάζα δέντρων (TWD)	1.7457	11.1952	4.9793333	3.3247766
Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης (NDVI_4p)	0.3730	0.4983	0.448364	0.0456958

Πίνακας 3: Βασικά στατιστικά στοιχεία μετρήσεων βιομάζας δέντρων και κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης της περιοχής μελέτης

Ακολούθησε η διερεύνηση της συσχέτισης της συνολικής βιομάζας της κόμης με τη μέση τιμή του Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης (NDVI) για τα έξι δέντρα Τραχείας Πεύκης, χρησιμοποιώντας ανάλυση παλλινδρόμησης στο στατιστικό πακέτο SPSS. Ως ανεξάρτητη μεταβλητή επιλέχθηκε ο δείκτης NDVI, ενώ ως εξαρτημένη επιλέχθηκε η συνολική βιομάζα κόμης (με τον κορμό) της Τραχείας Πεύκης.

Οι αλλομετρικές εξισώσεις που αναπτύχθηκαν είναι οι ακόλουθες:

$$E_{\text{Biomass}} = 79,340 - 1345,304 \cdot \text{NDVI}^2 + 2146,948 \cdot \text{NDVI}^3 \quad (42)$$

$$R^2 = 0.970$$

$$E_{\text{Biomass}} = 254,171 - 1217,204 \cdot \text{NDVI} + 1462,535 \cdot \text{NDVI}^2 \quad (43)$$

$$R^2 = 0.960$$

$$E_{\text{Biomass}} = -17,55 + 50,248 \cdot \text{NDVI} \quad (44)$$

$$R^2 = 0.477$$

όπου,

$N=6$

R^2 = συντελεστής προσδιορισμού

NDVI = Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης

E_Biomass = Εκτιμώμενη Βιομάζα Τραχείας Πεύκης μέσω του δείκτη NDVI (kg/m²)

Επόμενο μεθοδολογικό βήμα ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου στο πρόγραμμα επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων ERDAS Imagine 8.7 που θα περιελάμβανε την εξίσωση 42. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου μοντέλου σε όλη την εικόνα του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης είχε ως αποτέλεσμα την εκτίμηση βιομάζας μέσω δείκτη NDVI (Χάρτης 14). Δεδομένου ότι η εξίσωση 42 έχει τους περιορισμούς του δείγματος (Πίνακας 3), στο τελικό αποτέλεσμα (εκτιμώμενη βιομάζα) έχει δοθεί η τιμή μηδέν στις περιοχές που οι τιμές του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης (NDVI) είναι μικρότερες από 0.37 και μεγαλύτερες από 0.49.

Αντίστοιχα, από την δειγματοληψία των εικοσιπέντε (25) δειγματοληπτικών επιφανειών θάμνων, διαστάσεων 1x1m, έγινε εκτίμηση της βιομάζας ανά τετραγωνικό μέτρο (kg/m²) (βλ. παρ. 3.2.3 της παρούσας μελέτης). Στη συνέχεια, έγινε αναγωγή του εμβαδού στα 0.6m, προκειμένου ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης και η βιομάζα να έχουν την ίδια κλίμακα αναφοράς. Με τη βοήθεια του προγράμματος AutoCAD πραγματοποιήθηκε η ακριβής τοποθέτηση των δειγματοληπτικών επιφανειών (1x1m) σε κάθε μία από τις έξι δειγματοληπτικές επιφάνειες (20x20m). Ακολούθησε η εκτίμηση της μέσης τιμή του NDVI λαμβάνοντας υπόψη τα τέσσερα γειτονικά εικονοστοιχεία (pixels) της ακριβής θέσης κάθε δειγματοληπτικής επιφάνειας (1x1m).

Η διερεύνηση της συσχέτισης της συνολικής βιομάζας θάμνων στα 0.6m κάθε δειγματοληπτικής επιφάνειας θάμνων (1x1m) με τη μέση τιμή του Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης (NDVI) έγινε με τη χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 14 δεν υπάρχει κάποια συνάρτηση που μπορεί να περιγράψει ικανοποιητικά τη σχέση των δύο μεταβλητών (BiomassK, NDVI_4p).

Η μαθηματική συνάρτηση με τον μεγαλύτερο συντελεστή προσδιορισμού φαίνεται ακολούθως (εξίσωση 45). Παρατηρούμε λοιπόν ότι ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης δεν φαίνεται να αποτελεί στατιστικά σημαντική παράμετρο στην εκτίμηση της βιομάζας θάμνων.

$$\text{BiomassK} = 0,789 + 60,221 \cdot \text{NDVI} \quad (45)$$

$$R^2=0.248$$

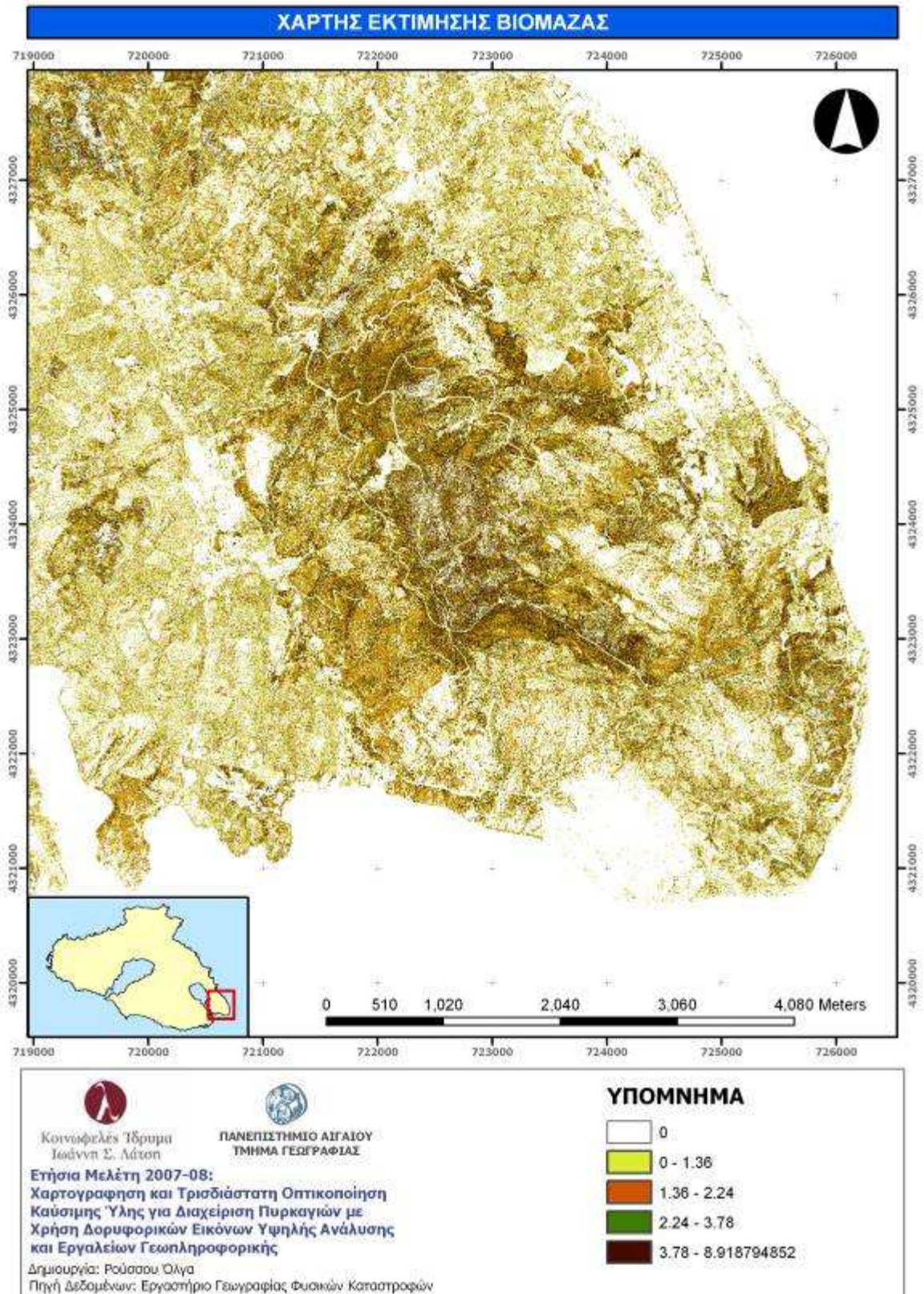
Όπου,

$N=25$

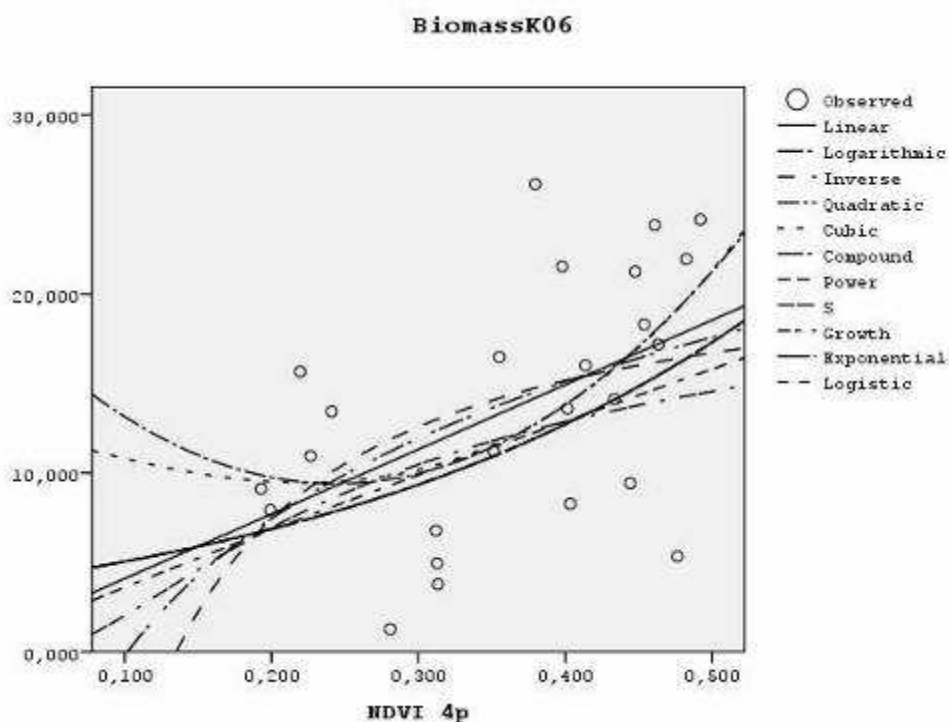
R^2 = συντελεστής προσδιορισμού

BiomassK = Βιομάζα θάμνων αναγόμενη στα 0.6m

NDVI = Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης



Χάρτης 14: Εκτίμηση βιομάζας μέσω του Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης



Σχήμα 14: Ανίχνευση συσχέτισης συνολικής βιομάζας θάμνων με δείκτη NDVI

3.3.2 Συμπεράσματα

Οι πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας αποτελούν σημαντική πηγή γεωπληροφοριών με ιδιαίτερα πολλαπλές και μεγαλύτερης λεπτομέρειας εφαρμογές στα δασικά οικοσυστήματα. Η βλάστηση είναι ένας βασικός δείκτης για τις περιβαλλοντικές συνθήκες ενός οικοσυστήματος. Οι αλλαγές στη βλάστηση είναι ένα χρήσιμο μέσο για την αναγνώριση αλλαγών σε άλλους περιβαλλοντικούς παράγοντες (ξηρασία, υποβάθμισης εδάφους κ.α). Η υγιής βλάστηση διαθέτει ένα είδος φασματικού προτύπου που δεν διαθέτει κανένα άλλο υλικό στη γήινη επιφάνεια, απορροφά ισχυρά την ερυθρή ακτινοβολία, ενώ ταυτόχρονα ανακλά ισχυρά στο κοντινό υπέρυθρο μέρος του φάσματος. Ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης NDVI βασίζεται σε αυτή τη διαφορά ανακλαστικότητας και μπορεί να υπολογιστεί από πολυφασματικούς αισθητήρες που διαθέτουν κανάλια καταγραφής στο ερυθρό και στο κοντινό υπέρυθρο.

Η φασματική απόκριση διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της βλάστησης ή /και το στάδιο ανάπτυξης του κάθε είδους βλάστησης. Διαφορετικοί τύποι βλάστησης εμφανίζουν χαρακτηριστική διακύμανση που οφείλεται σε παραμέτρους όπως το σχήμα και μέγεθος του φύλλου, το συνολικό σχήμα του φυτού και την περιεχόμενη υγρασία. Οι τιμές του δείκτη NDVI που αντιστοιχούν σε βλάστηση στην περιοχή μελέτης κυμαίνονται από 0.1 έως 0.7606. Στο Χάρτη 13 φαίνεται ότι ο δείκτης NDVI έχει πολύ μικρή διακύμανση ανάμεσα στο αραιό δάσος κωνοφόρων και στους θαμνότοπους.

Η χωρική ανάλυση της δορυφορικής εικόνας που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή του δείκτη NDVI ήταν τέτοια ώστε κάθε εικονοστοιχείο (pixel) να αντιστοιχεί σε επιφάνεια 0.6x0.6m. Μέσω του NDVI εκτιμήθηκε το ποσοστό βλάστησης σε κάθε εικονοστοιχείο. Από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πεδίο (6 κομμένα δέντρα Τραχείας Πεύκης) εκτιμήθηκε η βιομάζα του κάθε δέντρου και έγινε αναγωγή στα

0.6m. Η συσχέτιση της συνολικής βιομάζας δέντρου με τη μέση τιμή του NDVI από τα τέσσερα γειτονικά εικονοστοιχεία του σημείου κοπής των δέντρων έδειξε ότι γνωρίζοντας την τιμή του δείκτη NDVI μπορεί να εκτιμηθεί η βιομάζα των δέντρων κατά 97%, για $0,49 < NDVI < 0,37$. Έτσι, ο δείκτης NDVI είναι στατιστικά σημαντικός παράγοντας στην εκτίμηση της βιομάζας των δέντρων μέσω δορυφορικών εικόνων (εξίσωσης 42).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε είναι περιορισμένο ($N=6$), γεγονός που δεν επιτρέπει τον ισχυρισμό να χρησιμοποιηθεί η αλλομετρική σχέση επιχειρησιακά ως έχει. Η σχέση βιομάζας- NDVI επιδέχεται βελτιώσεις. Με τη βοήθεια του Χάρτη 14, κρίνεται αναγκαίο να σχεδιαστούν και να πραγματοποιηθούν επιπλέον άμεσα καταστρεπτικές δειγματοληψίες σε δέντρα Τραχείας Πεύκης προκειμένου να γίνει επαλήθευση της αλλομετρικής σχέσης και καθορισμός των ορίων του NDVI. Επιπρόσθετα, επιστημονικό ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η ανίχνευση συσχέτισης βιομάζας δέντρων Τραχείας Πεύκης με το μέσο όρο όλων των εικονοστοιχείων (pixels) που καλύπτει η κόμη του κάθε δέντρου και τα βήματα που θα ακολουθηθούν για τα σημεία που το δάσος είναι πυκνό και η κόμη του ενός δέντρου καλύπτεται κατά μεγάλο ποσοστό από την κόμη του άλλου δέντρου.

Περαιτέρω έρευνα θα πρέπει να γίνει για την εκτίμηση της βιομάζας θάμνων μέσω δορυφορικών εικόνων. Πιθανώς η συσχέτιση των αλλομετρικών εξισώσεων της εκτίμησης βιομάζας των θάμνων με την κάλυψη και το ύψος (εξισώσεις 30 και 40) σε συνδυασμό με το ποσοστό κάλυψης κόμης από τη δορυφορική εικόνα να συμβάλει θετικά προς αυτή την κατεύθυνση.

Παρά τους περιορισμούς που έχει ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης NDVI (όπως εποχή λήψης δορυφορικής εικόνας, αλλοίωση σήματος βλάστησης από το φόντο της κόμης, ατμοσφαιρικές επιδράσεις κ.α.), η προτεινόμενη μεθοδολογία αποτελεί ένα γρήγορο και αποτελεσματικό τρόπο εκτίμησης βιομάζας δέντρων, ιδιαίτερα όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμοι οικονομικοί πόροι, εξειδικευμένο προσωπικό και μεγάλα χρονικά περιθώρια για συστηματικές δειγματοληψίες. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες δασικές περιοχές της χώρας που υπάρχει μεγαλύτερος αριθμός δείγματος βιομάζας δέντρων και φυσικά γεωγραφικές συντεταγμένες του δέντρου πριν την κοπή του.

3.4 Συστήματα Μοντελοποίησης Καύσιμης Ύλης και Προσομοίωσης Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς

Τις τελευταίες δεκαετίες, δεδομένου ότι μία πυρκαγιά έχει καταστρεπτικά αποτελέσματα στο περιβάλλον, στην ανθρώπινη ζωή και στην ιδιοκτησία αγροτικών και αστικών περιοχών, δημιουργήθηκαν διάφορα μοντέλα καθορισμού των χρονικών και χωρικών μεταβολών της διάδοσης και συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς. Τα πολλαπλά αυτά μοντέλα διαφέρουν μεταξύ τους τόσο ως προς τις αρχές δημιουργίας τους (εμπειρικά, ημι-εμπειρικά, στατιστικά, φυσικά κ.α.) όσο και ως προς τις συνθήκες και δυνατότητες εφαρμογής τους. Τα πιο ευρέως διαδεδομένα και διεθνώς αποδεκτά μοντέλα, όπως τα BEHAVE και FARSITE, βασίζονται την πρότυπη εξίσωση πρόβλεψης διάδοσης πυρκαγιάς του Rothermel (Rothermel, 1972) και περιγράφουν την διάδοση και συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις της καύσιμης ύλης, της τοπογραφίας και των μετεωρολογικών συνθηκών.

3.4.1. BehavePlus v.3

Το σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς και μοντελοποίησης της καύσιμης ύλης BEHAVE είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα που αποτελείται από μία συλλογή μαθηματικών μοντέλων (αλγορίθμων) που περιγράφουν τη φωτιά και το περιβάλλον της και χρησιμοποιείται κυρίως για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς με σκοπό τη διαχείρισή της (Andrews, 1986; Rothermel, 1972, Rothermel, 1991). Το σύστημα *BehavePlus v.3*, ως βελτιωμένη εξέλιξη του BEHAVE, είναι ένα πρόγραμμα φιλικό προς το χρήστη το οποίο επιτρέπει τόσο τη δημιουργία μοντέλου καύσιμης ύλης για τον καλύτερο προσδιορισμό της συμπεριφοράς πυρκαγιάς σε μία *συγκεκριμένη θέση*, όσο και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς, λαμβάνοντας υπόψη την *καύσιμη ύλη*, την *τοπογραφία* και τις *μετεωρολογικές συνθήκες* (Andrews et al., 2005).

Το σύστημα BehavePlus v.3 δίνει την δυνατότητα επιλογής ανάμεσα στα αυθεντικά δεκατρία (13) πρότυπα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (Πίνακας 4) και τα σαράντα (40) πρόσφατα σχεδιασμένα πρότυπα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (Πίνακας 5). Το καθένα από αυτά τα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης (M.K.Y.) έχει σχεδιαστεί για να τυποποιήσει και να ποσοτικοποιήσει μία πληθώρα παραμέτρων της καύσιμης ύλης που απαντώνται ευρέως στις ΗΠΑ.

Τα χαρακτηριστικά της τοπογραφίας που συμβάλουν στην πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς είναι η έκθεση, η κλίση, το υψόμετρο και η διαμόρφωση του εδάφους. Διαφορετική συγκέντρωση καύσιμης ύλης παρατηρείται ανάλογα με την έκθεση ως προς τον ορίζοντα. Συγκεκριμένα η καύσιμη ύλη ξεραίνεται ταχύτερα στις νότιες εκθέσεις από ό,τι στις πλαγίες άλλων εκθέσεων, καθώς οι νότιες εκθέσεις δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία περισσότερο χρονικό διάστημα. Όταν η φωτιά κινείται σε τοπογραφική ανωφέρεια εξαπλώνεται με μεγάλη ταχύτητα, αφού λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στα κατώτερα τοπογραφικά σημεία, παρατηρείται ξήρανση της βλάστησης στα ανώτερα σημεία και συνεπώς διευκόλυνση της εξάπλωσης της φωτιάς. Όσο αυξάνει το υψόμετρο αυξάνει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μεταβάλλεται η διαμόρφωση της βλάστησης. Ακόμη, η έντονη διαμόρφωση του εδάφους (ράχες, στενά φαράγγια, κοιλάδες ανάμεσα σε κορυφογραμμές) μπορούν να δημιουργήσουν τοπικά επιτάχυνση της ταχύτητας του ανέμου με συνέπεια την πρόκληση άκρως επικίνδυνης συμπεριφοράς φωτιάς (Καλαμποκίδης κ.α., 2004).

M.K.Y.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	
1	Short grasses (30cm)	Ποολίβαδα
2	Timber (grass and understory)	Δασολίβαδα
3	Tall grass (76 cm)	Λιβάδια (υψηλή βλάστηση)
4	Chaparral (18 cm)	Θαμνώνες (αείφυλλα - σκληρόφυλλα)
5	Brush (61cm)	Θαμνολίβαδα (φυλλοβόλα)
6	Dormant brush, hardwood slash	Θαμνότοποι (ξηροφυτικοί)
7	Southern rough	Θαμνότοποι (μερικώς δασοσκεπείς)
8	Closed timber litter	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
9	Hardwood litter	Φυλλοβόλα δάση (ξηροτάπητας)
10	Timber (litter and understory)	Σύμπυκνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
11	Light logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μικρή ποσότητα)
12	Medium logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μέτρια ποσότητα)
13	Heavy logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μεγάλη ποσότητα)

Πίνακας 4: Τα M.K.Y. που αναπτύχθηκαν για το σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς BEHAVE (Andrews, 1986) και η προσαρμογή τους στις συνθήκες της ελληνικής βλάστησης (Kalabokidis, 2004).

M.K.Y.	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	
GR1, GR2, GR3, GR4, GR5, GR6, GR7, GR8, GR9	Nearly Pure Grass/Or Forb Type (Grass)	Ποολίβαδα
GS1, GS2, GS3, GS4	Mixture of grass and shrub up to 50 shrub coverage (Grass-Shrub)	Θαμνολίβαδα (τουλάχιστον 50% κάλυψη θάμνων)
SH1, SH2, SH3, SH4, SH5, SH6, SH7, SH8, SH9	Shrub cover at least 50 shrub coverage (Shrub)	Θαμνότοποι
TU1, TU2, TU3, TU4, TU5	Grass or shrubs mixed with litter from forest canopy (Timber-understory)	Σύμπυκνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
TL1, TL2, TL3, TL4, TL5, TL6, TL7, TL8, TL9	Dead and down woody fuel (litter) beneath a forest canopy (Timber-Litter)	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
SB1, SB2, SB3, SB4	Activity fuels (slash) or debris from wind damage (Slash – Blowdown)	Υπολείμματα υλοτομιών
NB1, NB2, NB3, NB8, NB9	Insufficient wildland fuel (Non-burnable)	Υλικά που δεν επιδέχονται καύση

Πίνακας 5: Τα πρότυπα M.K.Y. που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας το μοντέλο διάδοσης πυρκαγιάς του Rothermel (Scott and Burgan, 2005)

Οι μετεωρολογικές συνθήκες συντελούν σημαντικά στην έναρξη και εξάπλωση μιας πυρκαγιάς. Ο άνεμος είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που καθορίζει το ρυθμό εξέλιξης και την κατεύθυνση μιας πυρκαγιάς. Στο σύστημα BehavePlus v.3 το ύψος για μετρήσεις ανέμου που συνήθως χρησιμοποιείται είναι περίπου έξι (6) μέτρα πάνω από την επιφάνεια, προσαρμοσμένο στο ύψος της βλάστησης. Σε επιφανειακά καύσιμα οι περισσότερες πυρκαγιές καίνε σε χαμηλότερο από έξι μέτρα ύψος. Έτσι, επειδή η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται όσο κατεβαίνουμε προς την επιφάνεια των καυσίμων, λόγω τριβών, η ταχύτητα του ανέμου εκτιμάται για τα έξι μέτρα ύψος πρέπει να προσαρμοστεί για να δώσει σωστά αποτελέσματα πρόβλεψης της διάδοσης πυρκαγιάς. Τα νομογράμματα μπορεί να περιέχουν μια τέτοια διόρθωση που να μειώνει την ταχύτητα ανέμου στο απαιτούμενο ύψος, ανάλογα με το αν τα καύσιμα είναι εκτεθειμένα ή όχι (Δημητρακόπουλος και Δρίτσα, 2001).

Επιπρόσθετα, η θερμοκρασία του αέρα επηρεάζει μια φωτιά καθώς επιδρά στη σχετική υγρασία και την ατμοσφαιρική αστάθεια, ενώ η θερμοκρασία και η υγρασία της καύσιμης ύλης επηρεάζουν το χρόνο ανάφλεξης και καύσης. Επιπρόσθετα, οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με τις μέτριες βροχοπτώσεις δημιουργούν ξηρό κλίμα και ξηρασία που συνηγορούν στην έναρξη μιας πυρκαγιάς (Καλαμποκίδης κ.α., 2004).

Προβλέψεις με το μοντέλο πυρικής συμπεριφοράς μπορούν να γίνουν για συγκεκριμένο σημείο, χρησιμοποιώντας δεδομένα από παρατήρηση ή προγνώσεις καιρικών συνθηκών, παρατήρηση ή μέτρηση καύσιμης ύλης και τοπογραφίας. Κρίνεται σκόπιμο να σημειωθεί ότι το μοντέλο πυρικής συμπεριφοράς δίνει ιδιαίτερη βαρύτητα στα ξερά και τα χλωρά καύσιμα διαμέτρου < 0,64 cm, καθώς αυτά παίζουν καθοριστικό ρόλο στην μεταφορά της φωτιάς. Προβλέπει συμπεριφορά της φωτιάς στην περίμετρο της περιοχής που καίει, δηλαδή στο μέτωπο της πυρκαγιάς. Σχεδιάστηκε για πρόβλεψη μόνο επιφανειακής πυρκαγιάς και σε καμία περίπτωση για πυρκαγιά κόμης ή στροβιλισμούς φωτιάς. Επίσης, βασική παραδοχή του μοντέλου πυρικής συμπεριφοράς είναι η ομοιογένεια και η συνέχεια της καύσιμης ύλης. Γεγονός που σημαίνει ότι το μοντέλο θα υπολογίσει τη συμπεριφορά της φωτιάς σαν να είναι τα συστατικά του καυσίμου ομοιογενώς αναμιγμένα στο μοντέλο και ομοιογενώς καταναμημένα στο καύσιμο κατά μήκος του καθορισμένου βάθους.

Το σύστημα BehavePlus v.3 αποτελείται από «υποσυστήματα» που δίνουν τη δυνατότητα στους διαχειριστές μιας πυρκαγιάς, πέρα από τη δημιουργία τοπικών M.K.Y., να προβλέπουν την συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς και να μελετούν τις δυνατότητες κατάσβεσής της. Τα κυριότερα «υποσυστήματα» (modules) του BehavePlus v.3 είναι τα ακόλουθα:

- SURFACE: Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό παραμέτρων διάδοσης και έντασης μιας επιφανειακής πυρκαγιάς (όπως ταχύτητα διάδοσης, μήκος φλόγας, θερμική ένταση του μετώπου, θερμική ένταση αντίδρασης κ.α.)
- CROWN: Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό παραμέτρων που συμβάλουν στην εκτίμηση μετάβασης μιας επιφανειακής πυρκαγιάς σε επικόρυφη (λόγος θερμική ένταση του μετώπου προς κρίσιμη θερμική ένταση του μετώπου επιφανειακής πυρκαγιάς κ.α.)
- SAFETY: Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του μέγεθος αντιπυρικής ζώνης προστασίας και την εκτίμηση δυνάμεων καταστολής πυρκαγιάς
- SIZE: Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της καμένης έκτασης (επιφάνεια και περίμετρος φωτιάς η οποία ξεκινά από ένα σημείο και εξαπλώνεται σε ελλειπτικό σχήμα)
- CONTAIN: Χρησιμοποιείται για εκτιμήσεις των απαιτήσεων της συγκράτησης μιας πυρκαγιάς (ολική επιφάνεια πυρκαγιάς, το μήκος προς το πλάτος της έλλειψης, αποστάσεις διάνοιξης αντιπυρικών ζωνών κ.α.)

- SPOT: Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέγιστης απόστασης που μπορούν να πεταχτούν οι καύτρες για δημιουργία νέων εστιών φωτιάς από το μέτωπο της υπάρχουσας πυρκαγιάς
- MORTALITY: Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του ποσοστού θνησιμότητας των δέντρων σε μια πυρκαγιά ανάλογα με την ένταση και διεύθυνση του ανέμου
- IGNITE: Χρησιμοποιείται για την εκτίμηση πιθανότητας για ανάφλεξη από καμένα κλαδιά ή από κεραυνό.

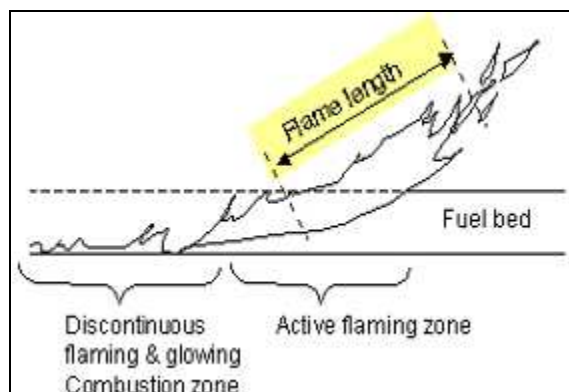
Τα υποσυστήματα αυτά μπορούν να τρέξουν ανεξάρτητα ή μπορούν να συνδέονται με τα αποτελέσματα του ενός να εισάγονται σαν δεδομένα (εισροές) στο επόμενο. Συνεπώς, το σύστημα BehavePlus v.3 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα πλήθος από εφαρμογές, όπως δημιουργία τοπικών μοντέλων καύσιμης ύλης, διαχείριση πυρκαγιών, εκτίμηση συμπεριφοράς μιας επιφανειακής πυρκαγιάς που βρίσκεται σε εξέλιξη, σχεδιασμό προδιαγεγραμμένου καψίματος και εκπαίδευση.

Η ακρίβεια των προβλέψεων συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς από το BehavePlus v.3 εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων που δίδονται σε αυτό. Στα δεδομένα αυτά βασίζονται οι υπολογισμοί του ημι-εμπειρικού μοντέλου διάδοσης επιφανειακών πυρκαγιών του Rothermel (Rothermel, 1972).

Οι βασικές παράμετροι μιας επιφανειακής πυρκαγιάς που συχνά υπολογίζονται είναι η ταχύτητα διάδοσης, η θερμική ένταση μετώπου, το μήκος της φλόγας, θερμική ένταση αντίδρασης, η έκταση και η περίμετρος της πυρκαγιάς μετά από 30 λεπτά από την εκδήλωσή της, καθώς και η μέγιστη δυνατή απόσταση μεταφοράς καυτρών από το μέτωπο της πυρκαγιάς. Η γνώση των παραπάνω παραμέτρων πριν, από και κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς συμβάλλει τόσο στην αντιμετώπιση των δυσκολιών ελέγχου της πυρκαγιάς (κατασκευή αντιπυρικής ζώνης, αποστολή ή όχι συνεργείων στο μέτωπο, απαιτήσεις σε προσωπικό και εξοπλισμό, νέες εστίες) όσο και στην εκτίμηση των προκαλούμενων συνεπειών στο οικοσύστημα (Καλαμποκίδης, 2004).

Ως *ταχύτητα διάδοσης (Rate of Spread)* ορίζεται η ταχύτητα με την οποία η πυρκαγιά διαδίδεται μέσω της επιφανειακής καύσιμης ύλης και μετρείται σε μέτρα ανά λεπτό (m/min). Η μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης (ROS_{max}) παρατηρείται μπροστά, στο μέτωπο της πυρκαγιάς, ενώ πλάγια, ή προς τα πίσω είναι η μικρότερη ταχύτητα (Pyne *et al.*, 1996). Η ταχύτητα διάδοσης διαφέρει ανάλογα με την ένταση του ανέμου, τον τύπο της καύσιμης ύλης, την περιεχόμενη υγρασία και με την κλίση του εδάφους.

Το *μήκος της φλόγας (Flame Length)* μίας επιφανειακής πυρκαγιάς, μετρείται κατά μήκος του άξονα της φλόγας στο μέτωπο της πυρκαγιάς και αποτελεί επίσης, ένα δείκτης της έντασης της φωτιάς (Σχήμα 15).



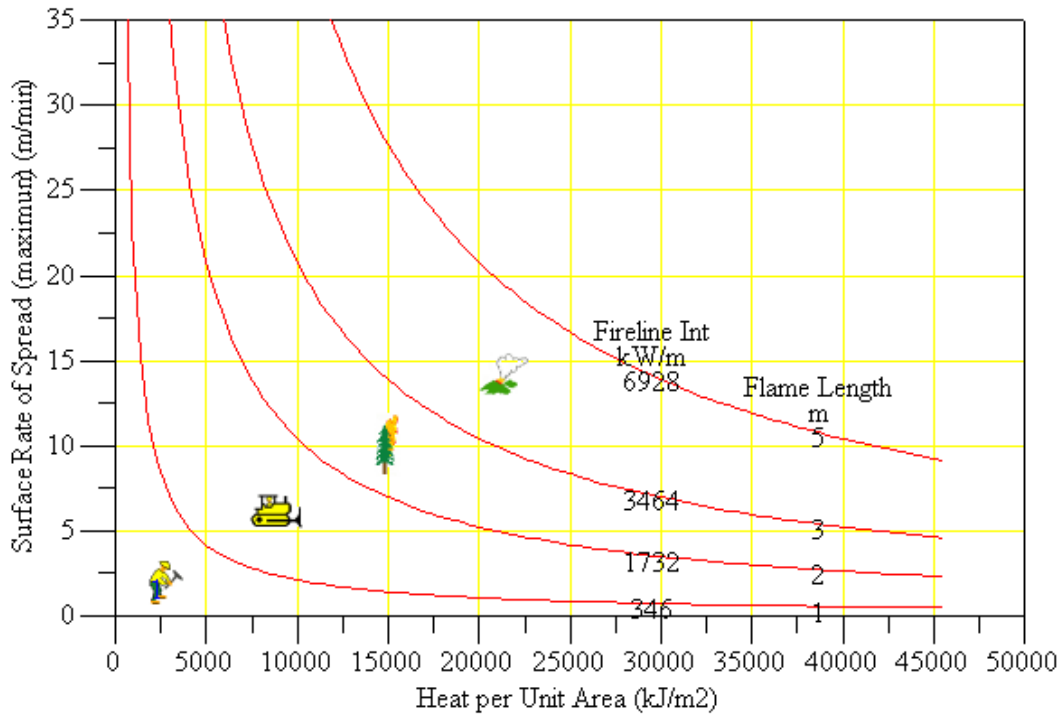
Σχήμα 15: Μήκος φλόγας (Andrews, 1986)

Η ένταση της φωτιάς αναφέρεται ως ο ρυθμός με τον οποίο εκλύεται θερμική ενέργεια και καταγράφεται σε μονάδες θερμότητας (cal) ή ισχύος (watt). Η *θερμική ένταση του μετώπου (Fireline Intensity)* που αναφέρεται και ως ένταση Byram, είναι το πιο κοινό και πιο χρήσιμο μέγεθος μέτρησης της έντασης μίας πυρκαγιάς και μετριέται σε kW/m. Εξαρτάται από τον τύπο της βλάστησης αλλά και από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή της πυρκαγιάς. Επίσης, εξαρτάται από την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας και την ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς και είναι ισοδύναμη με την θερμότητα που εκλύεται από μία μονάδα μήκους του μετώπου στη μονάδα του χρόνου (Chandler *et. al*, 1983).

Θερμική ένταση αντίδρασης (Reaction Intensity) είναι το μέτρο του ρυθμού απελευθέρωσης ενέργειας ανά μονάδα επιφανείας του μετώπου της φωτιάς. Μετράται σε kW/m² και επηρεάζεται από το μέγεθος των χαρακτηριστικών της καύσιμης ύλης, την πυκνότητα του στρώματος καύσιμης ύλης, την περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης, τη χημική σύνθεση και ιδιαίτερα τα οργανικά πτητικά υλικά που προσδιορίζουν τη θερμοχωρητικότητα του καυσίμου.

Η *εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας (Heat per Unit Area)* αναφέρεται στην θερμότητα που εκλύεται κατά τη διάρκεια της καύσης ανά μονάδα επιφάνειας και μετριέται σε kJ ανά τετραγωνικό μέτρο (kJ/m²). Η εκλυόμενη θερμότητα δεν εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, αλλά από τον τύπο της βλάστησης και την περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης.

Δεδομένου ότι οι ερμηνείες των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς δεν είναι εύκολο να κατανοηθούν, ιδιαίτερα όταν πολλά νούμερα εκθέτονται ταυτόχρονα σαν αποτελέσματα. Το *Διάγραμμα Πυρικών Χαρακτηριστικών (Fire Characteristic Chart)* αποτελεί μία μέθοδο που αναπτύχθηκε για να διευκολύνει την κατανόηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων αυτών (Rothermel and Andrews, 1982). Στο συγκεκριμένο διάγραμμα (Σχήμα 16), ο κάθετος άξονας παριστάνει την ταχύτητα διάδοσης, ο οριζόντιος τη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας και οι καμπύλες γραμμές παριστάνουν το μήκος της φλόγας και την ένταση της φωτιάς. Έτσι, από το διάγραμμα γίνεται μια χρήσιμη εκτίμηση της σφοδρότητας της πυρκαγιάς και των ενεργειών καταστολής της πυρκαγιάς (Πίνακας 6) βάσει των σημειώσεων του F.A. Albini (Pyne *et al.*, 1996).



Σχήμα 16: Διάγραμμα Πυρικών Χαρακτηριστικών (Rothermel and Andrews, 1982)

Μήκος Φλόγας (m)	Θερμική Ένταση Μετώπου (kW/m)	Τρόποι Καταστολής
<1	<350	Η πυρκαγιά μπορεί να αντιμετωπιστεί με άμεση επέμβαση, κατά μέτωπο ή πλευρικά, χρησιμοποιώντας ανθρώπινο δυναμικό με εργαλεία
1 – 2	350 – 1750	Η πυρκαγιά είναι αρκετά έντονη, για άμεση επέμβαση από ανθρώπινο συνεργείο. Εξοπλισμός όπως μηχανήματα, οχήματα και αεροσκάφη μπορεί να είναι αποτελεσματικά
2 – 3	1750 – 3500	Ισχυρής έντασης πυρκαγιά με πιθανά προβλήματα στο να τεθεί υπό έλεγχο, όπως μεταφορά στην κόμη των δένδρων, αναζωπυρώσεις κλπ. Οι άμεσες μέθοδοι καθίστανται αναποτελεσματικές και πρέπει να ληφθούν έμμεσα μέτρα καταστολής και χρήση εναέριων μέσων
>3	>3500	Είναι πιθανές πυρκαγιές κόμης μεγάλης έντασης και δύσκολα τίθενται υπό έλεγχο

Πίνακας 6: Αντιστοίχιση των τιμών του μήκους της φλόγας και της θερμικής έντασης του μετώπου με ενέργειες καταστολής μίας πυρκαγιάς

3.4.1.1 Μοντελοποίηση Καύσιμης Ύλης

Σε γενικές γραμμές, η μοντελοποίηση της καύσιμης ύλης είναι μια διαδικασία η οποία απαιτεί τόσο επιστημονική κατάρτιση όσο και σωστή κρίση του ερευνητή. Για τη επιλογή ενός Μ.Κ.Υ. που να είναι αντιπροσωπευτικό των συμπλεγμάτων βλάστησης της περιοχής ενδιαφέροντος, το πρόγραμμα BehavePlus v.3 προσφέρει τις εξής επιλογές:

- αντιστοίχιση των συμπλεγμάτων καύσιμης με ένα από τα 13 ή 40 πρότυπα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης
- τροποποίηση ενός από τα 13 ή 40 πρότυπα Μ.Κ.Υ, αναπροσαρμόζοντας ορισμένες παραμέτρους της καύσιμη ύλης στο πρότυπο Μ.Κ.Υ. που ανασύρεται από το σύστημα
- εισαγωγή καινούργιων στοιχείων καύσιμης ύλης και δημιουργία καινούργιου αντιπροσωπευτικού Μ.Κ.Υ.

Στην περίπτωση που ο χρήστης επιθυμεί τη δημιουργία τοπικού Μ.Κ.Υ. που να αντιπροσωπεύει βέλτιστα την καύσιμη ύλη της περιοχής ενδιαφέροντος, το σύστημα BehavePlus v.3 διαθέτει το “υποσύστημα FuelModeling” που δίνει εκτός των άλλων τη δυνατότητα έλεγχου της πυρικής συμπεριφοράς αυτού πριν χρησιμοποιηθεί στην πρόβλεψη συμπεριφοράς επιφανειακής πυρκαγιάς. Απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η μέτρηση των χαρακτηριστικών της καύσιμης ύλης (βιομάζα νεκρής και ζωντανής καύσιμης ύλης ανά κατηγορία, λόγος επιφάνειας προς όγκο καύσιμης ύλης κ.α), τα οποία δεν είναι συνήθως άμεσα διαθέσιμα και για τη συλλογή τους απαιτείται συστηματική δειγματοληψία, μια διαδικασία εξαιρετικά επίπονη, χρονοβόρα και υψηλού κόστους.

Συγκεκριμένα, στο υποσύστημα “FuelModeling” χρειάζεται να εισαχθούν τα ακόλουθα στοιχεία (Εικόνα 1), τα οποία συναρμολογούν το Μοντέλο Καύσιμης Ύλης:

- Ορισμός δυναμικού ή στατικού μοντέλου.
- Ολικό φορτίο νεκρής καύσιμης ύλης χρονικής υστέρησης 1 ώρας (1HR)
- Ολικό φορτίο νεκρής καύσιμης ύλης χρονικής υστέρησης 10 ωρών (10HR)
- Ολικό φορτίο νεκρής καύσιμης ύλης χρονικής υστέρησης 100 ωρών (100HR)
- Ολικό φορτίο ζωντανής χορτολιβαδικής βλάστησης
- Ολικό φορτίο ζωντανής καύσιμης ύλης θάμνων
- Ολικό βάθος καύσιμης ύλης
- Αντιπροσωπευτική τιμή κλάσματος συνολικής επιφάνειας καύσιμης ύλης χρονικής υστέρησης 1 ώρας προς τον όγκο αυτής (SA/V 1HR)
- Αντιπροσωπευτική τιμή κλάσματος συνολικής επιφάνειας προς τον όγκο της χορτολιβαδικής βλάστησης
- Αντιπροσωπευτική τιμή κλάσματος συνολικής επιφάνειας προς τον όγκο της ζωντανής καύσιμης ύλης θάμνων
- Βάθος στρώματος καύσιμης ύλης
- Αντιπροσωπευτική τιμή της υγρασίας σβησίματος της καύσιμης ύλης
- Αντιπροσωπευτική τιμή της θερμογόνου ικανότητας της νεκρής καύσιμης ύλης
- Αντιπροσωπευτική τιμή της θερμογόνου ικανότητας της ζωντανής καύσιμης ύλης

Όλο το ζωντανό ή νεκρό οργανικό βλασθητικό υλικό που υπάρχει είτε στο έδαφος (όπως φυλλόστρωμα, βελόνες, κλαδιά, κορμοί, χόρτα, θάμνοι, δενδρύλλια και δέντρα), είτε πάνω στα δέντρα (όπως κλαδιά, φύλλωμα, όρθια νεκρά δέντρα) που προκαλεί ή υφίσταται ανάφλεξη και καίγεται χαρακτηρίζεται ως *καύσιμη ύλη*. Επίσης, η ποσότητα της καύσιμης ύλης που είναι διαθέσιμη για καύση σε μία δεδομένη πυρκαγιά, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την περιεχόμενη υγρασία της (Pyne *et al.*, 1996). Η *περιεχόμενη υγρασία* είναι το ποσό του νερού που περιέχεται στην καύσιμη ύλη, εκφράζεται σαν ποσοστό επί του ξηρού της βάρους και είναι ιδιαίτερα σημαντική για όλες τις παραμέτρους της συμπεριφορά μίας πυρκαγιάς. Η χωρητικότητα υγρασίας ποικίλλει για τη νεκρή και ζωντανή καύσιμη ύλη. Η νεκρή μπορεί να περιέχει υγρασία μέχρι 30% (πέρα από την οποία τα κύτταρα δεν μπορούν να κρατήσουν το πρόσθετο νερό), ενώ η περιεκτικότητα σε υγρασία της ζωντανής μπορεί να φθάσει και 300%. Όσο πιο χαμηλή είναι η περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης, τόσο πιο εύκολα αρχίζει και διαδίδεται μία πυρκαγιά. Στη ζωντανή καύσιμη ύλη η περιεχόμενη υγρασία μεταβάλλεται κυρίως εποχιακά, ανάλογα με τα στάδια ανάπτυξης του φυτού, λόγω βιολογικών διεργασιών. Διαφέρει τόσο στο χρόνο, στο χώρο, όσο και στα διάφορα είδη. Στη νεκρή καύσιμη ύλη η περιεχόμενη υγρασία μεταβάλλεται κυρίως μέσα στην ημέρα, ανάλογα με τη θερμοκρασία του αέρα, τον άνεμο, τη σχετική υγρασία κ.α. Η νεκρή καύσιμη ύλη χαρακτηρίζεται ως “υγροσκοπική”. Αυτό σημαίνει ότι αποβάλλει ή απορροφά υγρασία από την ατμόσφαιρα, μέχρι να έρθει σε ισορροπία η περιεχόμενη με την υγρασία του αέρα. Το μέγεθος της μεταβολής εξαρτάται επίσης και από τη σύνθεση των υλικών (βελόνες, φύλλα, χόρτα, κλαδιά), το μέγεθος και το σχήμα της καύσιμης ύλης, αλλά και από την τοπογραφία της περιοχής, που καθορίζει το μικροκλίμα και την ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται. Η νεκρή καύσιμη ύλη μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ανάλογα με το χρόνο που χρειάζεται ώστε να προσαρμοστεί στις διάφορες περιβαλλοντικές αλλαγές. Όταν συμβαίνει μία αλλαγή, η περιεχόμενη υγρασία μετακινείται σε καινούριο σημείο ισορροπίας. Το πόσο γρήγορα η καύσιμη ύλη χάνει ή αποκτά υγρασία σε αντίδραση ακραίων συνθηκών υγρασίας ή ξηρασίας θέτει το χρόνο αντίδρασής τους.

Η *χρονική υστέρηση* (*time lag*) είναι μία έκφραση του ρυθμού με τον οποίο μία δεδομένη καύσιμη ύλη προσεγγίζει το σημείο ισορροπίας της περιεχόμενης υγρασίας. Η χρονική υστέρηση που μεσολαβεί, καθορίζεται σαν το χρόνο που απαιτείται ώστε η νεκρή καύσιμη ύλη να χάσει περίπου το 63% της διαφοράς μεταξύ της αρχικής περιεχόμενης υγρασίας και της περιεχόμενης υγρασίας στο σημείο ισορροπίας, σε σταθερές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας του αέρα. Η διάρκεια αυτών των χρονικών περιόδων είναι ένα χαρακτηριστικό της καύσιμης ύλης. Η χρονική υστέρηση μπορεί να εκφραστεί σε λεπτά, ώρες ή μέρες, αλλά για μεγαλύτερη σαφήνεια χρησιμοποιούνται οι ώρες (Pyne *et al.*, 1996). Το μέσο διάστημα της χρονικής υστέρησης διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος και άλλα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης. Το εθνικό σύστημα Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιών των Ηνωμένων Πολιτειών (NFDRS) έχει διαχωρίσει την αντίδραση της περιεχόμενης υγρασίας σε τάξεις χρονικής υστέρησης της 1, 10, 100 και 1000 ωρών (Burgan *et al.*, 1998). Για διευκόλυνση των επιστημόνων, έχει γίνει μία άμεση αντιστοίχιση της διαμέτρου της καύσιμης ύλης και της χρονικής υστέρησης (T_L):

- 1-hr $T_L = 0 - 0,64$ cm
- 10-hr = 0,64 – 2,54 cm
- 100-hr $T_L = 2,54 - 7,62$ cm
- 1000-hr $T_L > 7,62$ cm.

Modules: SURFACE

Description		
Fuel/Vegetation, Surface/Understory		
		Initialize from a Fuel Model
Fuel Model Type		
1-h Fuel Load	tonne/ha	
10-h Fuel Load	tonne/ha	
100-h Fuel Load	tonne/ha	
Live Herbaceous Fuel Load	tonne/ha	
Live Woody Fuel Load	tonne/ha	
1-h Surface Area/Vol Ratio	m ² /m ³	
Live Herb Surface Area/Vol Ratio	m ² /m ³	
Live Woody Surface Area/Vol Ratio	m ² /m ³	
Fuel Bed Depth	m	
Dead Fuel Moisture of Extinction	%	
Dead Fuel Heat Content	kJ/kg	
Live Fuel Heat Content	kJ/kg	
Fuel Moisture		
Moisture Scenario		
Weather		
Midflame Wind Speed (upslope)	km/h	
Terrain		
Slope Steepness	%	

Εικόνα 1: Το υποσύστημα μοντελοποίησης καύσιμης ύλης στο BehavePlus

Το υποσύστημα “FuelModeling” δίνει τη δυνατότητα διαχωρισμού του μοντέλου σε δυναμικό ή στατικό. Όταν οι καταγραφές/ μετρήσεις γίνονται κατά τη διάρκεια της αυξητικής περιόδου των φυτών (που στην Ελλάδα είναι άνοιξη και αρχές καλοκαιριού) επιβάλλεται η καθιέρωση του μοντέλου ως δυναμικό. Διότι τις καλοκαιρινές περιόδους η χορτολιβαδική βλάστηση ξεραίνεται αλλάζοντας βάρος ανά επιφάνεια, αλλά και ένα μέρος της σε συνάρτηση με τον χρόνο μεταφέρεται από την κλάση της ζωντανής στη νεκρή καύσιμη ύλη. Και αυτή η συνάρτηση περιέχεται στο υποσύστημα του BehavePlus v.3. Καθιερώνεται το μοντέλο ως στατικό, όταν οι εποχιακές μεταβολές των τιμών των χαρακτηριστικών της καύσιμης ύλης παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις και άρα θεωρούνται σταθερές. Όταν απαιτείται ακρίβεια στις εκτιμήσεις της καύσιμης ύλης, οι μετρήσεις πρέπει να γίνουν κατά την καλοκαιρινή περίοδο.

Το φορτίο της καύσιμης ύλης περιλαμβάνει το ολικό ξηρό βάρος της νεκρής καύσιμης ύλης σε τρεις κλάσεις (1Hr - διαμέτρου <0,64cm, 10Hr - διαμέτρου 0,64 -2,54cm, 100Hr – διαμέτρου <7,62cm) και της ζωντανής καύσιμης ύλης διαμέτρου <0,64 cm (χόρτα, φύλλα και χλωρά κλαδιά). Καταγράφεται σε τόνους ανά εκτάριο (tons/ha). Εξαιρετική σημασία έχει η περιεχόμενη υγρασία στα λεπτά νεκρά καύσιμα (1Hr), αφού αυτά είναι τα κυρίως υπεύθυνα για την εξάπλωση μιας πυρκαγιάς. Για τα χλωρά καύσιμα, πιο σημαντικό είναι το ποσό υγρασίας που περιέχεται στα φυλλώματα. Η εκτίμηση της υγρασίας των χλωρών καυσίμων μπορεί να γίνει είτε δειγματοληπτικά, μετρώντας την με ξήρανση και ζύγισμα είτε από μία καταγραφή από έναν κοντινό σταθμό μέτρησης. Η ποσότητα της καύσιμης ύλης αποτελεί σημαντικό παράγοντα που ελέγχει τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς τόσο από άποψη εξάπλωσης όσο και εκλυόμενης θερμότητας.

Το μέσο βάθος στρώματος καύσιμης ύλης (Fuel Bed Depth) ορίζεται ως η μέση κάθετη απόσταση από τη βάση του στρώματος της καύσιμης ύλης ως το κατάλληλο ύψος στο οποίο η πυκνότητα του φορτίου αρχίζει να αυξάνεται γρήγορα. Για περιπτώσεις πευκοβελόνων πιο κατάλληλο θεωρείται το μέγιστο πάχος του στρώματος, ενώ για θάμνους ή υπολείμματα υλοτομίας το 70 % του μέγιστου πάχους δίνει μια λογική εκτίμηση για το βάθος (Burgan and Rothermel, 1984). Καταγράφεται σε μέτρα (m). Αυξάνοντας το βάθος στρώματος καύσιμης ύλης μειώνεται το κλάσμα συσσώρευσης, κάνοντας το ΜΚΥ πιο ευαίσθητο στον άνεμο και την κλίση. Γενικότερα, μεταβολές στο βάθος στρώματος καύσιμης ύλης φέρουν αλλαγές στην ταχύτητα διάδοσης και μεταβολή στο μήκος φλόγας.

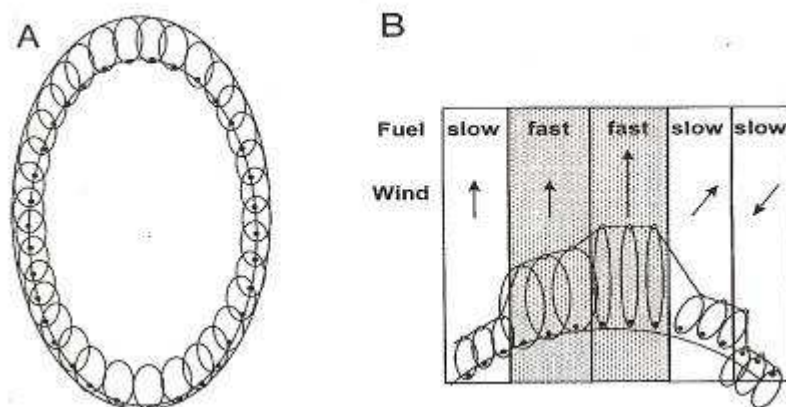
Το κλάσμα SA/V (surface-area-to-volume ratio) αποτελεί τον λόγο της ολικής επιφάνειας προς τον ολικό όγκο της καύσιμης ύλης, ανά είδος αυτής. Το σύστημα BehavePlus v.3 απαιτεί εκτιμήσεις του λόγου αυτού από την κλάση 1Hr νεκρής καύσιμης ύλης, από την ζωντανή χορτολιβαδική βλάστηση και από τα φυλλώματα και τρυφερά ζωντανά κλαδιά των θάμνων. Φυσικά είναι δύσκολο, αν όχι ακατόρθωτο, να μετρηθεί η ολική επιφάνεια και ο ολικός όγκος όλων των θάμνων, χόρτων και λεπτών πεσμένων νεκρών κλαδιών διαμέτρου 0-0,64cm μιας περιοχής. Έτσι, για κάθε κατηγορία καύσιμης ύλης γίνεται δειγματοληψία και μικρή ποσότητα αναλύεται εργαστηριακά. Ο όγκος προσδιορίζεται από την ανύψωση της στήλης του ύδατος με καταβύθιση σε ογκομετρικό κύλινδρο. Η επιφάνεια υπολογίζεται με τους εξής τρόπους: α) γεωμετρικά (επιφάνεια κυλίνδρου ή κώνου), β) με τη βοήθεια αποτύπωσης της περιφέρειας του φύλλου πάνω σε βαθμονομημένο χαρτί (millimetre) για τα φυλλώματα και την χορτολιβαδική βλάστηση. Η εκτίμηση του λόγου SA/V για τους θάμνους είναι λίγο πιο πολύπλοκη. Συγκεκριμένα, εκτιμάται η συνολική επιφάνεια και ο συνολικός όγκος από κάθε είδος θάμνων, από τα φυλλώματα και τα λεπτά κλαδιά, με υπολογισμό από κάποιο δείγμα φύλλων και τρυφερών κλαδιών, γνωστού βάρους, της επιφάνειας και όγκου τους (καθίζηση και αποτύπωση). Η ολική επιφάνεια και ο ολικός όγκος του φυλλώματος και των κλαδιών, ανά είδος βλάστησης, υπολογίζεται στη συνέχεια με τη βοήθεια απλών αναλογιών. Γενικά, όσο αυξάνει η τιμή του λόγου SA/V, τόσο τα υλικά γίνονται πιο λεπτής υφής και είναι πιο εύφλεκτα. Καταγράφεται σε m^2/m^3 ή cm^2/cm^3 .

Υγρασία σβησίματος καύσιμης ύλης είναι η περιεχόμενη υγρασία πέρα από την οποία η φωτιά δεν εξαπλώνεται ομοιόμορφα με μέτωπο φλογών. Η υγρασία αυτή επηρεάζει τόσο την ένταση όσο και την προβλεπόμενη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Η ένταση της φωτιάς είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλώνει η διαφορά μεταξύ της υγρασίας σβησίματος και της περιεχόμενης υγρασίας της καύσιμης ύλης. Αυξάνοντας την υγρασία σβησίματος ενός καυσίμου παράγεται ένα «θερμότερο» μοντέλο καύσιμης ύλης αφού αυξάνει το ποσό υγρασίας της καύσιμης ύλης με το οποίο προβλέπεται ότι θα σταματήσει η φωτιά.

Η θερμογόνοτητα των καυσίμων εκφράζει το ποσό της θερμότητας που εκλύεται από την καύση ανά μονάδα βάρους τους. Η θερμογόνοτητα των υλικών μπορεί να υπολογιστεί όταν δεσμευτεί και μετρηθεί η παραγόμενη θερμότητα. Οι μετρήσεις αυτές γίνονται με ειδικά όργανα που λέγονται θερμιδόμετρα. Καταγράφεται σε kJ/kg. Σε γενικές γραμμές, η θερμογόνοτητα του ξύλου, αυξάνει όσο αυξάνονται τα ποσοστά των πτητικών ουσιών που περιέχονται στο ξύλο. Ακόμη, επηρεάζει άμεσα όλα τα αποτελέσματα συμπεριφοράς πυρκαγιάς, αφού όσο αυξάνεται η θερμογόνοτητα των καυσίμων τόσο η φωτιά γίνεται πιο έντονη.

3.4.2. FARSITE

Το *FARSITE* (Fire Area Simulator) είναι ένα από τα κύρια συστήματα προσομοίωσης της φωτιάς που αναπτύχθηκε την τελευταία δεκαετία για να περιγράψει τη εξάπλωση και τη συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών στο χώρο. Το μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς *FARSITE* υπολογίζει ένταση πυρκαγιάς και ταχύτητα εξάπλωσης για πολυάριθμα σημεία κατά μήκος του τοπίου χρησιμοποιώντας το μοντέλο πυρικής συμπεριφοράς του Rothermel (1972), ενώ η εξέλιξη της φωτιάς χωρικά προσομοιώνεται ως ελλειπτικό κύμα διάδοσης σύμφωνα με την Αρχή Huygens. Η Αρχή του Huygens ουσιαστικά δηλώνει ότι ένα κύμα μπορεί να μεταδοθεί από πολλά σημεία στην άκρη του, τα οποία συμπεριφέρονται ως ανεξάρτητες πηγές μικρότερων κυμάτων (Σχήμα 17) (Finney, 1998). Το πρόγραμμα *FARSITE* ενώνει όλα αυτά τα σημεία στην άκρη των μικρών κυμάτων για να καθορίσει το μέτωπο της πυρκαγιάς. Αναφορικά με τις επικόρυφες πυρκαγιές, το *FARSITE* συνδυάζει το μοντέλο του Rothermel (1972;1991) με τα κριτήρια πυρκαγιάς κόμης του Van Wangner (1977;1993) για την προσομοίωση μετάβασης επιφανειακής πυρκαγιάς σε επικόρυφη και χρησιμοποιεί το μοντέλο του Albin (1979) για την προσομοίωση της απόστασης που πετάγονται οι καύτρες (Finney and Andrews, 1999)



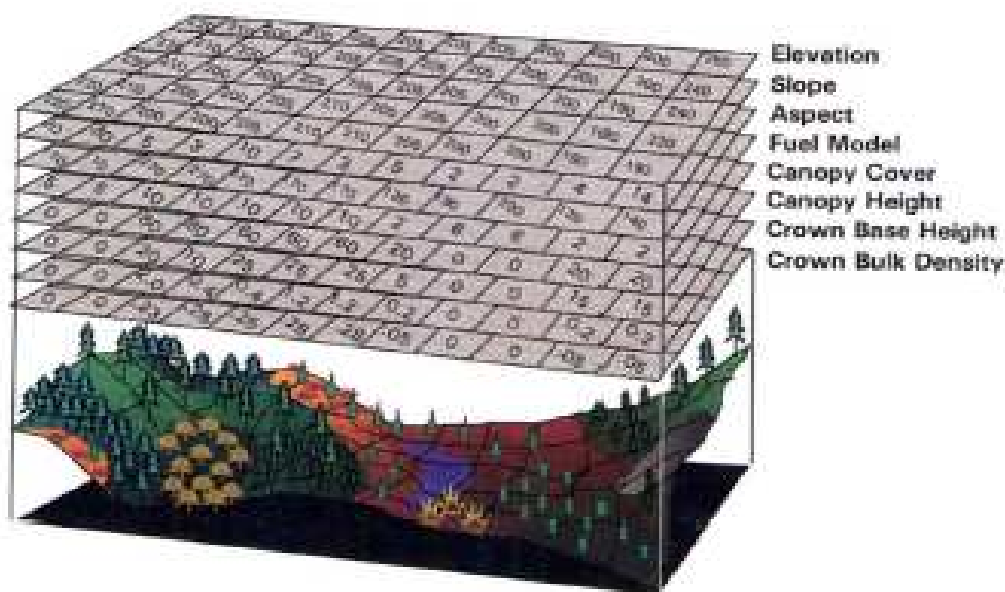
Σχήμα 17: Απεικόνιση της αρχής του Huygens χρησιμοποιώντας μικρά ελλειπτικά κύματα: (α) σε σταθερές συνθήκες χρησιμοποιούνται μικρά κύματα σταθερού σχήματος και μεγέθους για να διατηρηθεί το ελλειπτικό σχήμα της φωτιάς στο χρόνο, (β) σε μεταβαλλόμενες συνθήκες φαίνεται η εξάρτηση του μεγέθους του μικρού κύματος από το μοντέλο καύσιμης ύλης και την επιρροή που ασκεί το διάνυσμα άνεμος-κλίση στο σχήμα και τον προσανατολισμό του κύματος (Finney 1998)

Απαιτούμενα δεδομένα για την προσομοίωση πυρκαγιάς στο χωροχρονικό μοντέλο *FARSITE* είναι οι παράγοντες που συγκροτούν το τρίγωνο της φωτιάς (τοπογραφία, χαρακτηριστικά καύσιμης ύλης και καιρικές συνθήκες). Τα μοντέλα καύσιμης ύλης και η τοπογραφία επιβάλλεται να εισέρχονται στο σύστημα ως χωρικά δεδομένα, ενώ οι μετεωρολογικές συνθήκες (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, βροχόπτωση, νεφοκάλυψη κ.α) ως ποσοτικές τιμές σε τακτά χρονικά διαστήματα. Τα χωρικά δεδομένα θα πρέπει να είναι σε μορφή ASCII, μέσω του προγράμματος ArcGIS και να έχουν το ίδιο ακριβώς μέγεθος (ίδιο αριθμό γραμμών και στηλών) ώστε να επικαλύπτονται πλήρως.

Τα χωρικά δεδομένα τύπου raster που χρησιμοποιούνται στο πρόγραμμα *FARSITE* είναι υψόμετρο (elevation), κλίση (slope), προσανατολισμός - έκθεση (aspect), καύσιμη ύλη (fuels), κάλυψη κόμης (canopy cover), ύψος κόμης (canopy height), ύψος έναρξης της ζωντανής κόμης (crown base height) και πυκνότητα όγκου κόμης (crown build density) (Σχήμα 18). Τα πρώτα πέντε χωρικά δεδομένα είναι απαραίτητα για την προσομοίωση επιφανειακής πυρκαγιάς. Τα επιπλέον τρία χωρικά δεδομένα

αφορούν χαρακτηριστικά κόμης δέντρων και απαιτούνται μόνο στην περίπτωση που μελετάται η χωρική προσομοίωση επικόρυφης πυρκαγιάς.

Τα αποτελέσματα προσομοίωσης απεικονίζουν λεπτομερώς τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς και των επιπτώσεών της (περίμετρος της φωτιάς σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, ταχύτητα διάδοσης, καμένη έκταση κ.α.) και εξάγονται ως γεωγραφικά δεδομένα (vector) είτε σε μορφή πινάκων (Finney, 1998; Finney 2004). Η υποστήριξη λοιπόν των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) είναι απαραίτητη τόσο κατά εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων προσομοίωσης όσο και στην περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 18: Θεματικές επιφάνειες που απαιτούνται για προσομοίωση στο FARSITE (Finney, 1998)

Οι απαιτούμενες πληροφορίες για τις παραμέτρους τοπογραφίας εξάγονται από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους με τη βοήθεια του προγράμματος ArcMap. Μεταβολές στην τοπογραφία μπορούν να επιφέρουν δραστικές αλλαγές στη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς. Το υψόμετρο καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το είδος της βλάστησης, καθώς όσο αυξάνει το υψόμετρο αυξάνει η ένταση της ακτινοβολίας και μειώνεται η θερμοκρασία του αέρα. Η έκθεση ή προσανατολισμός της πλαγιάς προς τον ορίζοντα συμμετέχει σε μεγάλο βαθμό στη διαμόρφωση της θερμοκρασίας και της υγρασίας της καύσιμης ύλης. Συγκεκριμένα, η καύσιμη ύλη ξεραίνεται ταχύτερα στις νότιες εκθέσεις από ό,τι στις πλαγιές διαφορετικού προσανατολισμού, καθώς οι νότιες εκθέσεις δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία για περισσότερο χρονικό διάστημα. Η φωτιά κινείται συνήθως σε τοπογραφική ανωφέρεια, εκτός αν πνέουν ισχυροί αντίθετοι άνεμοι, με αποτέλεσμα να εξαπλώνεται με μεγάλη ταχύτητα, αφού λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στα κατώτερα τοπογραφικά σημεία, παρατηρείται ξήρανση της βλάστησης στα ανώτερα σημεία και συνεπώς διευκόλυνση της εξάπλωσης τη φωτιάς.

Αναφορικά με την καύσιμη ύλη εισάγονται χωρικά δεδομένα των μοντέλων καύσιμης ύλης που αντιπροσωπεύουν καλύτερα τα συμπλέγματα βλάστησης της περιοχής μελέτης. Τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης μπορούν να εισαχθούν στο μοντέλο χρησιμοποιώντας είτε ένα από τα πρότυπα μοντέλα καύσιμης ύλης (Πίνακας 4 και 5) είτε κάποιο δημιουργημένο τοπικό M.K.Y. (Custom Fuel Model). Το σύστημα FARSITE είναι ενσωματωμένο στο πρόγραμμα Behave Plus, στο σημείο που αφορά την καύσιμη ύλη.

Η γνώση της κάλυψης κόμης είναι απαραίτητη στον υπολογισμό παραγόντων σκίασης και ελάττωσης ταχύτητας ανέμου. Κάλυψη κόμης είναι το οριζόντιο ποσοστό της γης που καλύπτεται με κόμη δέντρων. Η μονάδες κάλυψης (coverage units) μπορεί να είναι κατηγορίες 1-4 ή ποσοστιαίες μονάδες (%). Οι κατηγορίες θα πρέπει να διαβαθμίζονται ως εξής:

- | | |
|-----------|------------|
| 1: 1-20% | 4: 81-100% |
| 2: 21-50% | 0 ή 99: 0% |
| 3: 50-80% | |

Το ύψος της κόμης είναι προαιρετικό χωρικό δεδομένο που χρησιμοποιείται για να υπολογίσει την ελάττωση του ανέμου σε ύψος περίπου 6μ από την επιφάνεια του εδάφους, την απόσταση πετάγματος καύτρων και τα χαρακτηριστικά της επικόρυφης πυρκαγιάς. Το ύψος έναρξης της ζωντανής κόμης είναι προαιρετικό χωρικό δεδομένο σημαντικό για τον καθορισμό της μετάβασης από επιφανειακή σε επικόρυφη δασική πυρκαγιά. Επίσης η πυκνότητα όγκου κόμης που αποτελεί προαιρετικό χωρικό δεδομένο είναι κρίσιμη παράμετρος στον καθορισμό των χαρακτηριστικών διάδοσης των πυρκαγιών κόμης.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα χωρίζονται σε δύο αρχεία (.txt). Το ένα αρχείο περιλαμβάνει δεδομένα θερμοκρασίας, υγρασίας και βροχόπτωσης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των αλλαγών στη νεκρή καύσιμη ύλη. Το άλλο αρχείο περιλαμβάνει δεδομένα ταχύτητας- διεύθυνσης ανέμου και νεφοκάλυψης που χρησιμοποιούνται στην γενικότερη πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πυρκαγιάς (βλ. επίσης παρ. 3.4.1).

Το πρόγραμμα FARSITE αναπτύχθηκε αρχικά για να υποστηρίξει τη διαχείριση φυσικών προδιαγεγραμμένων πυρκαγιών στις Η.Π.Α. και στη συνέχεια εφαρμόστηκε τόσο στο σχεδιασμό όσο και στις επιχειρησιακές φάσεις αντιμετώπισης και κατάσβεσης πυρκαγιών. Το σύστημα FARSITE έχει σχεδιαστεί κυρίως για:

- Προσομοίωση πυρκαγιών που έχουν συμβεί στο παρελθόν
- Προσομοίωση ενεργών πυρκαγιών
- Προσομοίωση πιθανών πυρκαγιών

Η προσομοίωση παρελθόντων πυρκαγιών θα αποκαλύψει την σύγκλιση ή απόκλιση από τα πραγματικά όρια εξάπλωσης της κάθε πυρκαγιάς, χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα εισερχόμενα δεδομένα. Η προσομοίωση τέτοιων πυρκαγιών είναι κρίσιμη στην ανάπτυξη εμπιστοσύνης στο πρόγραμμα FARSITE, ώστε η εφαρμογή του σε ενεργές πυρκαγιές να φέρει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Η προσομοίωση ενεργών πυρκαγιών μέσω του προγράμματος μπορεί να γίνει είτε για βραχυχρόνιες είτε για μακροχρόνιες προβολές. Σενάρια εξάπλωσης και συμπεριφοράς πυρκαγιάς μπορούν να αναπτυχθούν λαμβάνοντας υπόψη τις βραχυχρόνιες ή μακροχρόνιες καιρικές προβλέψεις. Οι βραχυχρόνιες προβολές θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην καθημερινή εκτίμηση προετοιμασία των καθημερινών αναλύσεων μιας πυρκαγιάς. Οι βραχυχρόνιες και μακροχρόνιες προβολές θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό ενεργειών παρακολούθησης της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς και στην ανάθεση προτεραιοτήτων σε περίπτωση πολλαπλών ταυτόχρονων πυρκαγιών. Οι μακροχρόνιες προβολές χρησιμοποιώντας ακραία καιρικά φαινόμενα θα μπορούν να βοηθήσουν στον καθορισμό της τρωτότητας πυρκαγιάς και της έκτασης των συνεπειών της.

Η προσομοίωση πιθανών πυρκαγιών μέσω του προγράμματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη σύγκριση εναλλακτικών στρατηγικών διαχείρισης πυρκαγιών και την εξειδικευμένη εκπαίδευση του προσωπικού κάτω από τα ποικίλα σενάρια, όπως

πολλαπλά σημεία ανάφλεξης, συνθήκες έντονης ξηρασίας και υψηλής ευφλεκτικότητας καύσιμης ύλης, σχεδιασμό αντιπυρικών ζωνών κ.α.

Επιπρόσθετα, στο πρόγραμμα FARSITE μπορεί να γίνει προσομοίωση της καταστολής μιας πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας διάφορες επίγειες και εναέριες τακτικές προσέγγισης και κατάσβεσης της πυρκαγιάς (Ground and Aerial Attack). Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής άμεσης, έμμεσης ή παράλληλης επίγειας τακτικής χρησιμοποιώντας, φυσικά, δεδομένα από το μέτωπο της πυρκαγιάς, το ύψος φλόγας και το είδος των δυνάμεων που απαιτείται ανάλογα με τις συνθήκες.

3.5 Μοντέλα Καύσιμης Ύλης Περιοχής Μελέτης

Τα φυσικά συμπλέγματα της δασικής καύσιμης ύλης παρουσιάζουν μεγάλη χωρική και χρονική ανομοιογένεια και ασυνέχεια και συνεπώς είναι εξαιρετικά δύσκολο να μετρηθούν οι φυσικές και χημικές παράμετροί τους με μεθόδους απογραφής ή και εκτεταμένης δειγματοληψίας. Η πλέον χρησιμοποιούμενη παγκοσμίως μέθοδος για την αποτίμηση της δασικής καύσιμης ύλης είναι η δημιουργία αντιπροσωπευτικών μοντέλων καύσιμης ύλης (Δημητρακόπουλος κ.α. 2001).

Τα μοντέλα καύσιμης ύλης προέρχονται από την ταξινόμηση των ειδών βλάστησης σύμφωνα με τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες κατά την καύση και χρησιμοποιούνται για να ταξινομηθεί η βλάστηση που είναι επιρρεπής στη φωτιά. Τα μοντέλα καύσιμης ύλης αν και τυποποιούν μια πληθώρα πολύπλοκων και δύσκολων να μετρηθούν παραμέτρων φωτιάς παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της εύκολης και γρήγορης χρήσης σε πολλές εφαρμογές αντιπυρικής προστασίας (προληπτικό σχεδιασμό, πραγματικές επιχειρήσεις καταστολής κ.α.).

Αρχικά, για την περιοχή μελέτης (Χερσόνησο Αμαλής, Ν. Λέσβου) κάθε τύπος κάλυψης γης ήρθε σε αντιστοιχία με ένα από τα νέα σαράντα (40) πρότυπα μοντέλων καύσιμης ύλης των Scott & Burgan (Χάρτης 10, Πίνακας 4). Η αντιστοιχία έγινε με βάση τη βλάστηση που κυριαρχεί σε κάθε μοντέλο (κωνοφόρα, πλατύφυλλα, θάμνοι, χορτολίβαδα), αλλά και κάποια χαρακτηριστικά των μοντέλων, όπως είναι το εκτιμώμενο συνολικό φορτίο, το βάθος της καύσιμης ύλης κτλ. Ακολουθώντας παρουσιάζεται η αντιστοίχιση και μια σύντομη περιγραφή των μοντέλων καύσιμης ύλης.

Ελαιώνες– Μοντέλο TU1:

Μοντέλο, μικτής βλάστησης, ξηρού κλίματος με χαμηλό φορτίο. Δυναμικό Μ.Κ.Υ.. Ο κύριος φορέας της φωτιάς είναι χαμηλού φορτίου χόρτα και/ή θάμνοι με κάποια υπολείμματα. Η ταχύτητα διάδοσης και το μήκος φλόγας είναι χαμηλά.



Αραιό δάσος κωνοφόρων – Μοντέλο TU4:

Νανοφυές ή καχεκτικό δάσος κωνοφόρων με υπόροφο. Ο πρωταρχικός φορέας της φωτιάς σε αυτό το μοντέλο είναι χαμηλά σε ύψος κωνοφόρα δέντρα με υπόροφο. Η ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς είναι μέτρια όπως και το μήκος της φλόγας.



Δάσος κωνοφόρων – Μοντέλο TU5:

Θάμνοι και δένδρα ξηρού κλίματος, πολύ υψηλού φορτίου. Ο κύριος φορέας της φωτιάς στο μοντέλο TU5 είναι μεγάλου μεγέθους δασικά υπολείμματα με υπόροφο θάμνων ή δενδρυλλίων. Η ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς είναι μέτρια όπως και το μήκος της φλόγας.



Θαμνότοποι – Μοντέλο SH2:

Θάμνοι ξηρού κλίματος μεσαίου φορτίου. Ο κύριος φορέας της φωτιάς στο μοντέλο SH2 είναι ξυλώδεις θάμνοι και υπολείμματα. Το φορτίο της καύσιμης ύλης είναι μέτριο με βάθος περίπου 30 εκατοστά, χωρίς παρουσία χορτολιβαδικής βλάστησης. Η ταχύτητα διάδοσης και το μήκος της φλόγας είναι χαμηλά.



Χορτολίβαδα – Μοντέλο GR2:

Χορτολιβαδική βλάστηση ξηρού κλίματος, χαμηλού φορτίου. Δυναμικό Μ.Κ.Υ.. Ο βασικός φορέας της φωτιάς εδώ είναι χόρτα και επίσης μπορεί να υπάρχουν μικρές ποσότητες λεπτής νεκρής καύσιμης ύλης. Αν υπάρχουν θάμνοι δεν επηρεάζουν τη συμπεριφορά της φωτιάς.



Επιπλέον, μεταξύ των μοντέλων υπάρχουν και τα μοντέλα καύσιμης ύλης που δεν επιδέχονται καύση (NoBurnable:NB), καθώς στα μοντέλα αυτά δεν υφίσταται φορτίο καύσιμης ύλης και συνεπώς διάδοση της φωτιάς, όπως:

Καλλιέργειες – Μοντέλο NB3:

Γεωργικές εκτάσεις σε μη εύφλεκτες συνθήκες. Για παράδειγμα, αρδευόμενες ετήσιες καλλιέργειες, καθαρισμένοι ή οργωμένοι οπωρώνες κ.ά. Σε περιπτώσεις που οι καλλιέργειες έχουν αφεθεί σε εύφλεκτες συνθήκες (ετήσιες καλλιέργειες που ξεράθηκαν πριν τη συγκομιδή, ανεπτυγμένα χόρτα και πόες μέσα σε οπωρώνες και αμπέλια) θα πρέπει να χρησιμοποιείται άλλο μοντέλο.



Αστικές περιοχές – Μοντέλο NB1:

Αποτελείται από αστικές και ημιαστικές περιοχές. Για να θεωρείται NB1 μία περιοχή, δεν πρέπει να υποστηρίζει διάδοση δασικής πυρκαγιάς. Σε μερικές περιπτώσεις περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί NB1 μπορεί να υποστούν ζημιές λόγω δασικής πυρκαγιάς, παρόλα αυτά, η ανάφλεξη των κτιρίων γίνεται είτε από κτίριο σε κτίριο, είτε από κάποιο φλεγόμενο κλαδί, κανένα από τα οποία δεν είναι κατηγοριοποιημένα, βάσει των μοντέλων καύσιμης ύλης.



Γυμνό έδαφος – Μοντέλο NB9:

Εκτάσεις γης απαλλαγμένες από βλάστηση, ικανή να υποστηρίξει διάδοση πυρκαγιάς. Τέτοιες περιοχές μπορεί να περιλαμβάνουν άγονες εκτάσεις με πολύ λίγη βλάστηση, λατομεία, θίνες, βραχώδεις σχηματισμούς, ακτές κ.α.



Η μοντελοποίηση της καύσιμης ύλης είναι μια πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία που απαιτεί λεπτομερή ταξινόμηση της καύσιμης ύλης και μέτρηση των διαφόρων φυσικοχημικών ιδιοτήτων που την χαρακτηρίζουν στο πεδίο, ποσοτική εκτίμηση και μεθοδικότητα προκειμένου να μελετηθεί σε βάθος (Keane *et al.*, 2001). Τα δεκατρία (13) πρότυπα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης και τα σαράντα (40) πρόσφατα πρότυπα Μ.Κ.Υ., σχεδιάστηκαν για να αναπαραστήσουν ένα ευρύ φάσμα συμπλεγμάτων καύσιμης ύλης στις Η.Π.Α., όπου και χρησιμοποιούνται με επιτυχία. Επειδή όμως τα μοντέλα αυτά δεν δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα αναφορικά με την συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς σε ένα μεσογειακού τύπου οικοσύστημα, δημιουργήθηκε η ανάγκη τροποποίησης ορισμένων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών σε υπάρχοντα μοντέλα ή και εξ' ολοκλήρου δημιουργία νέων τοπικών Μ.Κ.Υ. που να ανταποκρίνονται καλύτερα στα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης (ετερογενής και συμπαγής βλάστηση, υψηλό φορτίο ενεργής καύσιμης ύλης κ.α.).

Τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται για τη δημιουργία του Μ.Κ.Υ. στο BehavePlus φαίνονται στην Εικόνα 1 και περιγράφονται αναλυτικότερα στην παράγραφο 3.4.1 της παρούσας μελέτης. Τα χαρακτηριστικά που ποικίλουν σε κάθε μοντέλο είναι κυρίως:

- Το φορτίο της καύσιμης ύλης σε κάθε κλάση (tons/ha)
- Το ολικό βάθος καύσιμης ύλης (m)
- Η αντιπροσωπευτική τιμή κλάσματος συνολικής επιφάνειας καύσιμης ύλης προς τον όγκο αυτής σε κάθε κλάση (m^2/m^3)
- Η αντιπροσωπευτική τιμή της θερμογόνου ικανότητας της καύσιμης ύλης (KJ/Kgr)
- Η αντιπροσωπευτική τιμή της υγρασίας σβησίματος της καύσιμης ύλης (%)

Από τα πέντε χαρακτηριστικά που απαιτούνται τα δύο πρώτα έχουν μετρηθεί στο πεδίο και τα άλλα τρία έχουν εκτιμηθεί από τη σχετική βιβλιογραφία (επιστημονικές αναφορές και δημοσιεύσεις). Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στις δημοσιεύσεις που αναφέρονται σε ιδιότητες χαρακτηριστικών ειδών βλάστησης που απαντώνται στην περιοχή μελέτης και σε έρευνες που διεξήχθησαν στη Μεσόγειο.

Για την περιοχή μελέτης αναπτύχθηκε ένα τοπικό Μοντέλο Καύσιμης Ύλης που σχετίζεται με τους θαμνότοπους της περιοχής μελέτης και περιλαμβάνουν κυρίως τα είδη πουρνάρι (*Quercus infectoria*, *Quercus coccifera*), ρείκι (*Erica Malipolliflora*), και λαδανιές (*Cistus spp.*). Το ύψος των θάμνων κυμαίνεται από 8-92cm. Στη συνέχεια, το τοπικό Μ.Κ.Υ θάμνων θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς πυρκαγιάς χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα BehavePlus v.3.

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη δημιουργία Τοπικών Μοντέλων Καύσιμης Ύλης για την περιοχή μελέτης αποτελεί η χρησιμοποίηση των μετρήσεων των χαρακτηριστικών της καύσιμης ύλης που συλλέχθηκαν σε συγκεκριμένες δειγματοληπτικές επιφάνειες (βλ. παρ. 3.2.3, Χάρτης 12). Βάση των διαθέσιμων δεδομένων, η συνολική ζωντανή βιομάζα είναι 8,26 ton/ha, το φορτίο του ξηροτάπητα αντιστοιχεί σε 10,52 ton/ha, το φορτίο της νεκρής καύσιμης ύλης χρονικής υστέρησης 1 ώρας είναι 3,187 ton/ha, το φορτίο της νεκρής καύσιμης ύλης χρονικής υστέρησης 10 ωρών είναι 0,78 ton/ha και το βάθος της καύσιμης ύλης είναι 0.45m.

Ο λόγος επιφάνεια καύσιμης ύλης προς όγκο αυτής (Surface-area-to volume, SA/V) διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ευφλεκτικότητα της καύσιμης ύλης. Καύσιμα με μεγάλο κλάσμα SA/V αναφλέγονται πιο εύκολα από εκείνα τα καύσιμα που έχουν μικρή τιμή κλάσματος SA/V. Σε φρεσκοκοπεία στο έδαφος καύσιμα, χλωρά φυλλώδη και ξυλώδη, αυξάνοντας το κλάσμα επιφάνεια καύσιμης ύλης προς όγκο της μίας ώρας (1-h SA/V), θα αυξηθεί η ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς και το μήκος της φλόγας, αυξάνοντας την ευαισθησία του μοντέλου καύσιμης ύλης στον άνεμο, αλλά όχι στην κλίση. Παρόλο που σε ένα Μ.Κ.Υ. περιέχονται διάφορες τάξεις μεγέθους του καυσίμου δηλαδή διαφορετικά για κάθε τάξη κλάσματα SA/V, το μοντέλο πυρικής συμπεριφοράς του προγράμματος BehavePlus v.3, στην μαθηματική του έκφραση, απαιτεί μόνο μια τιμή για το κλάσμα επιφάνειας προς όγκο που να παριστάνει όσο το δυνατό πιο αντιπροσωπευτικά την πολυπλοκότητα του καυσίμου (1-h SA/V, Live Herbaceous SA/V, Live Woody SA/V). Όπως είναι γνωστό, η διάδοση της φωτιάς εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τα μικρά καύσιμα. Έτσι, η μέθοδος υπολογισμού του αντιπροσωπευτικού κλάσματος SA/V μετράει την σπουδαιότητα κάθε τάξης μεγέθους από το εμβαδόν της επιφάνειάς του, δίνοντας έμφαση στα μικρότερα καύσιμα. Δεδομένου ότι η ποώδης βλάστηση είναι απειροελάχιστη και στους δύο τύπους καύσιμης ύλης που μελετάμε (αείφυλλοι σκληρόφυλλοι θάμνοι, δάσος Τραχείας Πεύκης) δόθηκε έμφαση στην εκτίμηση της αντιπροσωπευτικής τιμής του κλάσματος επιφάνεια καύσιμης ύλης μίας ώρας προς όγκο (1-h SA/V) και του κλάσματος επιφάνεια ξυλώδους καύσιμης ύλης προς όγκο (Live Woody SA/V).

Το Μοντέλο Καύσιμης Ύλης των αείφυλλων σκληρόφυλλων θάμνων (SH_KRAT) πλησιάζει στα πρότυπα M.K.Y. SH2 (Scott and Burgan, 2005), M.K.Y. 4 και 5 (Burgan and Rothermel, 1984). Αντίστοιχα, τα αμερικάνικα πρότυπα M.K.Y TU5 (Scott and Burgan, 2005) και M.K.Y 8, 9 και 10 (Burgan and Rothermel, 1984) είναι πολύ κοντά στον τύπο βλάστησης του δάσους Τραχείας Πεύκης (PB_KRAT). Οι αντιπροσωπευτικές τιμές του κλάσματος επιφάνειας καύσιμης ύλης ανά όγκο ανά τάξη μεγέθους βλάστησης στα πρότυπα M.K.Y. παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Από τις τιμές των πρότυπων M.K.Y. των θάμνων του προγράμματος BehavePlus v.3 παρατηρείται ότι η τιμή του κλάσματος επιφάνειας της ξυλώδους καύσιμης ύλης προς τον όγκο της (Live Woody SA/V) είναι κατά 12-15% μικρότερη από την τιμή του κλάσματος επιφάνειας της καύσιμης ύλης μίας ώρας προς τον όγκο της (1-h SA/V) στην περίπτωση των θάμνων. Στους Πίνακες 8 και 9 απεικονίζονται οι τιμές του κλάσματος SA/V για ορισμένα από τα είδη βλάστησης (*Quercus coccifera*, *Pistacia lentiscus*, *Cistus salvaefolius*, *Pinus brutia*) που απαντώνται στην περιοχή μελέτης τόσο συνολικά όσο και ανά τάξη μεγέθους (Dimitrakopoulos, 2001; Dimitrakopoulos and Panov, 2001).

M.K.Y.	1-h SA/V (m ² /m ³)	Live Woody SA/V (m ² /m ³)	Υγρασία Σβησίματος (%)	Θερμοχωρητικότητα
4	6562	4921	20	18622
5	6562	4921	20	18622
SH2	6562	5249	15	18622
8	6562	-	30	18622
9	8202	-	25	18622
10	6256	4921	25	18622
TU5	4921	2461	25	18622

Πίνακας 7: Αντιπροσωπευτικές τιμές λόγου SA/V, υγρασίας σβησίματος και θερμοχωρητικότητας των πρότυπων M.K.Y της Αμερικής (Andrews et al., 2004)

Είδη βλάστησης	Λόγος επιφάνεια καύσιμης ύλης ανά όγκο (SA/V) (m ² /m ³)	Θερμοχωρητικότητα (KJ/Kgr)
<i>Cistus salvaefolius</i> (φύλλα)	4449	18654
<i>Cistus salvaefolius</i> (κλαδιά)	2228	19046
<i>Pistacia lentiscus</i> (φύλλα)	3532	20264
<i>Pistacia lentiscus</i> (κλαδιά)	606	1816
<i>Quercus coccifera</i> (φύλλα)	4141	19253
<i>Quercus coccifera</i> (κλαδιά)	854	18582
<i>Pinus brutia</i> (πευκοβελόνες)	5554	20625

Πίνακας 8: Αντιπροσωπευτικές τιμές λόγου SA/V και θερμοχωρητικότητας για ορισμένα μεσογειακά είδη βλάστησης (Dimitrakopoulos and Panov, 2001)

Τάξη μεγέθους καύσιμης ύλης	Είδος βλάστησης	Λόγος επιφάνεια καύσιμης ύλης ανά όγκο (SA/V) (m ² /m ³)
Φύλλα	<i>Cistus salvaefolius</i>)	4449
	<i>Pistacia lentiscus</i> (φύλλα)	3532
	<i>Quercus coccifera</i> (φύλλα)	4141
	<i>Pinus brutia</i> (πευκοβελόνες)	5554
Κλαδάκια διαμέτρου <0.6 cm	<i>Cistus salvaefolius</i> (νεκρά)	2346
	<i>Cistus salvaefolius</i> (ζωντανά)	2301
	<i>Quercus coccifera</i> (νεκρά)	1423
	<i>Quercus coccifera</i> (ζωντανά)	1656
	<i>Pistacia lentiscus</i> (νεκρά)	1279
	<i>Pistacia lentiscus</i> (ζωντανά)	1158
Κλαδάκια διαμέτρου 0.6 – 2.5 cm	<i>Cistus salvaefolius</i> (ζωντανά)	809
	<i>Quercus coccifera</i> (νεκρά)	447
	<i>Quercus coccifera</i> (ζωντανά)	291

Πίνακα 9: Αντιπροσωπευτικές τιμές λόγου SA/V ανά τάξη μεγέθους για ορισμένα μεσογειακά είδη βλάστησης (Dimitrakopoulos, 2001)

Από τα στοιχεία των πινάκων 7, 8 και 9 εκτιμήθηκε ο μέσος όρος του λόγου επιφάνειας καύσιμης ύλης ανά όγκο ανά τάξη καύσιμης ύλης. Έτσι για το μοντέλο των αείφυλλων σκληρόφυλλων θάμνων της περιοχής μελέτης (SH_KRAT) ορίστηκε ως αντιπροσωπευτική τιμή του λόγου 1-h SA/V τα 7000 m²/m³. Για τον υπολογισμό του λόγου επιφάνειας της ξυλώδους καύσιμης ύλης των θάμνων προς τον όγκο αυτής (Live Woody SA/V) ακολουθήθηκε η παραδοχή του προγράμματος BehavePlus.

Η υγρασία σβησίματος της καύσιμης ύλης είναι η περιεχόμενη υγρασία πέρα από την οποία η φωτιά δεν εξαπλώνεται και αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό του βάθους της καύσιμης ύλης (βλ. παρ. 3.4.1). Κάθε Μοντέλο Καύσιμης Ύλης έχει μια ιδιαίτερη υγρασία σβησίματος ή ασφαλείας, η οποία εξαρτάται τόσο από τη χημική σύνθεση του συγκεκριμένου καυσίμου όσο και από τις ιδιότητες του καυσίμου πριν πλησιάσει η φωτιά. Κατά συνέπεια, η υγρασία σβησίματος δεν μπορεί να είναι μια μοναδική τιμή αλλά ένα εύρος τιμών για κάθε τύπο καυσίμου, το οποίο μπορεί να καθοριστεί εμπειρικά. Στα αμερικάνικα πρότυπα M.K.Y. η υγρασία σβησίματος για τους θάμνους κυμαίνεται από 15-20% και από 25-30% για τα δάση δέντρων. Τα M.K.Y. που αναπτύχθηκαν στην Ισπανία, M53: δάσος κωνοφόρων με λεπτά επιφανειακά καύσιμα και M58: δάσος κωνοφόρων με μεσαίου ύψους συνεχόμενους θαμνώνες, τα οποία προσεγγίζουν περισσότερο τις ελληνικές συνθήκες, οι τιμές της υγρασίας σβησίματος είναι 16% για το M.K.Y. M53 και 31% για το M.K.Y. M58. Σύμφωνα με τους Gill *et al.* (1978) βρέθηκε με γραμμική παλινδρόμηση του ρυθμού ανάφλεξης με την περιεχόμενη υγρασία ότι η τιμή της περιεχόμενης υγρασίας είναι 35% όταν ο ρυθμός ανάφλεξης είναι μηδέν. Ακόμη, η Andrews (1986) υποστήριξε ότι ο δασικός ξηροτάπητας σπάνια ενισχύει την εξάπλωση πυρκαγιάς, όταν η περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης είναι μέχρι 30%. Λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική βιβλιογραφία,

επιλέγεται ως αντιπροσωπευτική τιμή της υγρασίας σβησίματος και των δύο μοντέλων αυτή των 30%.

Η θερμοχωρητικότητα της καύσιμης ύλης εκφράζει το ποσό της θερμότητας που ελευθερώνεται από την καύση ενός γραμμαρίου καύσιμης ύλης. Όσο αυξάνει η τιμή της θερμοχωρητικότητας του καυσίμου, η ανάφλεξη των καυσίμων γίνεται πιο εύκολα και η πυρκαγιά γίνεται πιο έντονη. Αποτελεί μία παράμετρο που επηρεάζει άμεσα όλα τα αποτελέσματα συμπεριφοράς της πυρκαγιάς και συνεπώς την καταστολή της (δυσκολία στον έλεγχο, μεγαλύτεροι χρόνοι καταστολής πυρκαγιάς). Από τη βιβλιογραφία παρατηρούμε ότι η θερμοχωρητικότητα ή θερμογόνοος ικανότητα για όλα τα Μ.Κ.Υ της Αμερικής είναι 18622 KJ/Kgr (Πίνακας 7) και για ορισμένα μεσογειακά είδη αυξομειώνεται από 18582 μέχρι 20625 KJ/Kgr (Πίνακας 8). Έτσι για τη δημιουργία τοπικών Μ.Κ.Υ. προτείνεται να χρησιμοποιηθεί μία μέση τιμή της θερμοχωρητικότητας ανεξάρτητα από την εποχή. Η τιμή 19400 KJ/Kgr θεωρήθηκε ως η πλέον κατάλληλη για τα τοπικά μοντέλα της περιοχής μελέτης. Για τη δημιουργία μοντέλων καύσιμης ύλης που περιέχουν όλους τους τύπους βλάστησης που απαντώνται στη Λεκάνη της Μεσογείου θα μπορούσε να προταθεί ως αντιπροσωπευτική τιμή θερμοχωρητικότητας ζωντανής και νεκρής καύσιμης ύλης τα 20000 KJ/Kgr.

Η δημιουργία των τοπικών Μοντέλων Καύσιμης Ύλης πραγματοποιήθηκε στο υποσύστημα μοντελοποίησης της καύσιμης ύλης (fuel modeling module) του προγράμματος BehavePlus v.3. Το μοντέλο που χαρακτηρίζει τους αείφυλλους σκληρόφυλλους θάμνους (μακκία βλάστηση) της περιοχής μελέτης ονομάστηκε SH_K. Αναπτύχθηκαν τρεις μορφές του συγκεκριμένου Μ.Κ.Υ., ανάλογα με την ποσότητα του ξηροτάπητα που περιλαμβάνεται στο φορτίο της καύσιμης ύλης χρονικής υστέρησης μίας ώρας. Το Μ.Κ.Υ. SH_K1 που δεν περιλαμβάνει το ξηροτάπητα, το Μ.Κ.Υ. SH_K2 που περιλαμβάνει τη μισή ποσότητα του ξηροτάπητα και το Μ.Κ.Υ. SH_K3 που περιλαμβάνει όλη την ποσότητα ξηροτάπητα.

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των Τοπικών Μοντέλων Καύσιμης Ύλης και τη γενικότερη σύγκριση των τοπικών Μ.Κ.Υ. με τα πρότυπα αντίστοιχα Μ.Κ.Υ. της Αμερικής αναπτύχθηκαν στο πρόγραμμα BehavePlus v.3 σενάρια υγρασίας της νεκρής και της ζωντανής καύσιμης ύλης. Τα σενάρια της ζωντανής καύσιμης ύλης διαχωρίζονται από της νεκρής, ώστε η περιεχόμενη υγρασία της ζωντανής και της νεκρής καύσιμης ύλης να μπορεί να μεταβάλλεται ανεξάρτητα.

Για τις συνθήκες της Λέσβου, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν τρία (3) διαφορετικά σενάρια υγρασίας για τη ζωντανή και τη νεκρή καύσιμη, καθένα από τα οποία αντιπροσωπεύει τις Μέσες Χείριστες Συνθήκες (M1), τις Μέτριες Συνθήκες (M2) και τις Μέσες Βέλτιστες Συνθήκες (M3) κατά τη διάρκεια της αντιπυρικής περιόδου (Πίνακας 10 και 11).

Τάξη μεγέθους καύσιμης ύλης	M1	M2	M3
1-hr Timelag	5	8	11
10-hr Timelag	6	9	12
100-hr Timelag	7	10	13

Πίνακας 10: Τιμές περιεχόμενης υγρασίας της νεκρής καύσιμης ύλης (%)

Ζωντανή Καύσιμη Ύλη	M1	M2	M3
Χορτολιβαδική	30	30	30
Ξυλώδης	70	100	130

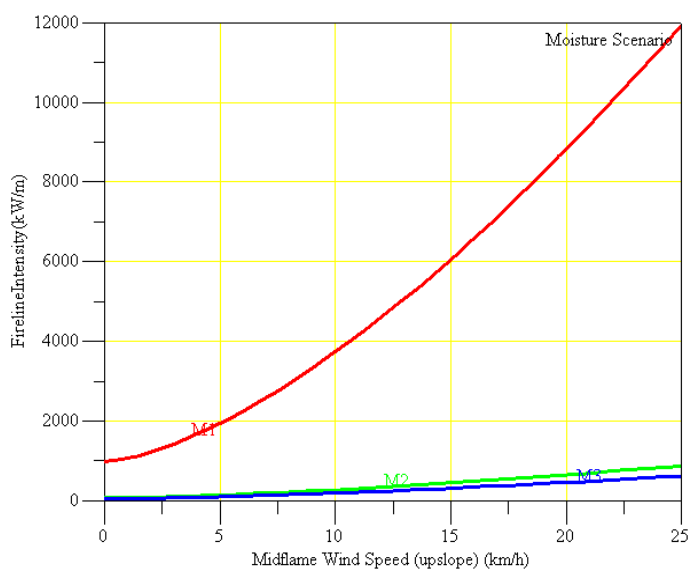
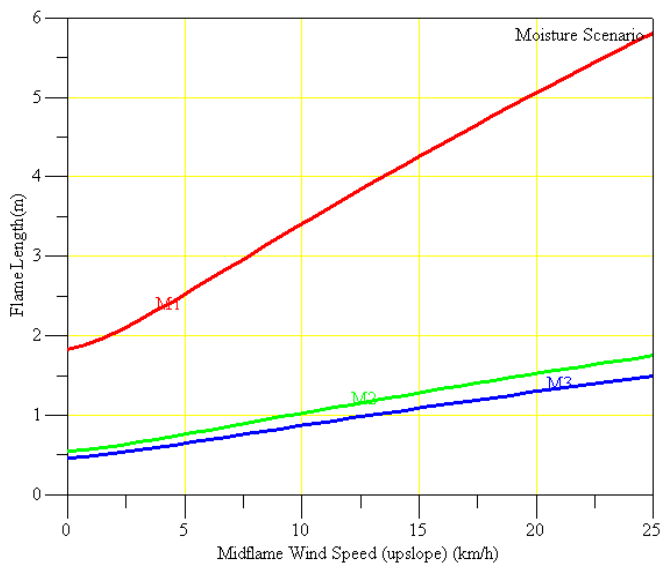
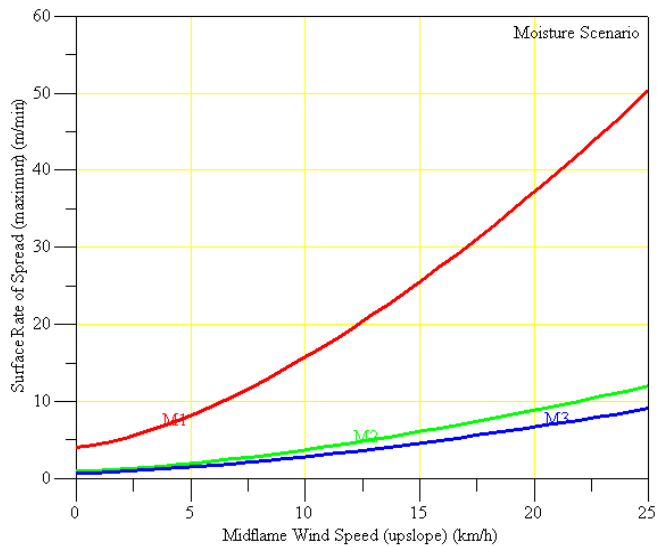
Πίνακας 11: Τιμές περιεχόμενης υγρασίας της ζωντανής καύσιμης ύλης (%)

Για την εκτίμηση των παραμέτρων συμπεριφοράς πυρκαγιάς στην περιοχή μελέτης, όπου η θαμνώδης βλάστηση ανταποκρίνεται στις τρεις μορφές του τοπικού Μ.Κ.Υ. SH_K1, SH_K2 και SH_K3 χρησιμοποιούμε τα προαναφερόμενα σενάρια υγρασίας της καύσιμης ύλης, κλίση 50% και άνεμο που κυμαίνεται από 0-25 km/h (0-4bf). Στον Πίνακα 12 απεικονίζονται τα αποτελέσματα του προγράμματος BehavePlus v.3 της εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (Heat per Unit) για τα μοντέλα SH_K1, SH_K2 και SH_K3 στα τρία σενάρια υγρασίας. Όπως έχει αναφερθεί στην παρ. 3.4.1 η εκλυόμενη θερμότητα δεν εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς, αλλά από τον τύπο της βλάστησης και την περιεχόμενη υγρασία της καύσιμης ύλης.

M.K.Y.	ΣΕΝΑΡΙΟ ΥΓΡΑΣΙΑΣ	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΑΝΕΜΟΥ (Km/h)			
		0	10	15	25
SH_K1	M1	14246	14246	14246	14246
	M2	4409	4409	4409	4409
	M3	4104	4104	4104	4104
SH_K2	M1	24720	24720	24720	24720
	M2	21835	21835	21835	21835
	M3	20414	20414	20414	20414
SH_K3	M1	33284	33284	33284	33284
	M2	29003	29003	29003	29003
	M3	26694	26694	26694	26694

Πίνακας 12: Τιμές εκλυόμενης θερμότητας ανά μονάδα επιφάνειας (KJ/m²) για τα Μ.Κ.Υ. SH_K1, SH_K2 και SH_K3 στα τρία σενάρια υγρασίας της

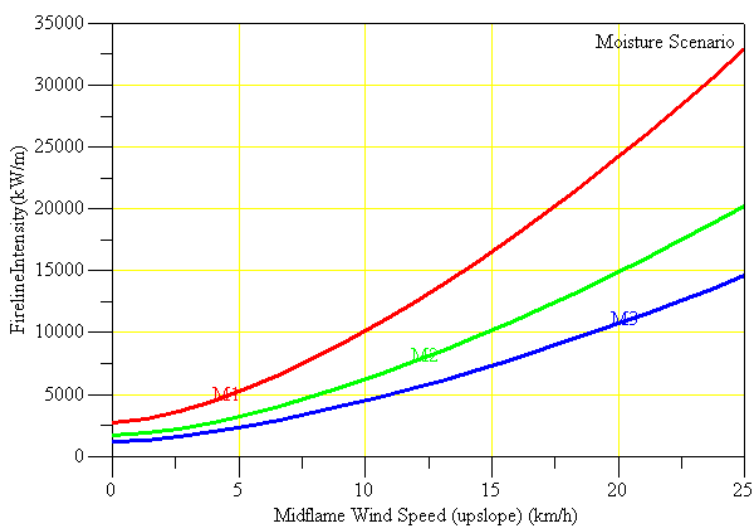
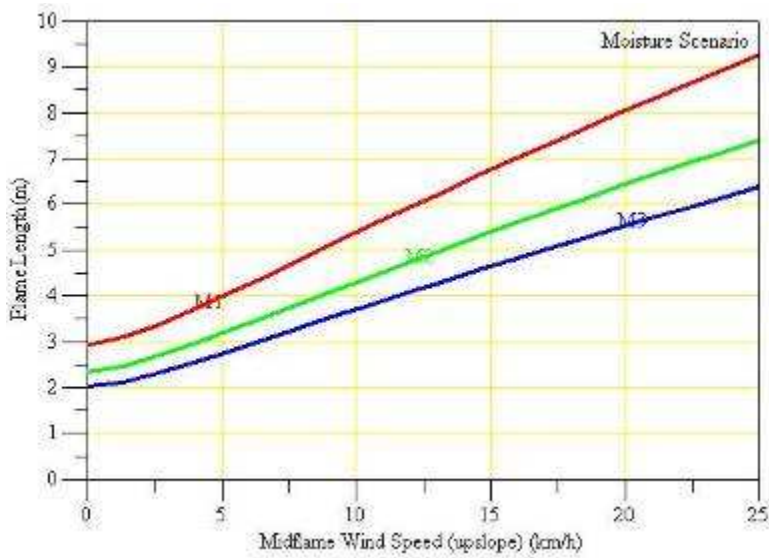
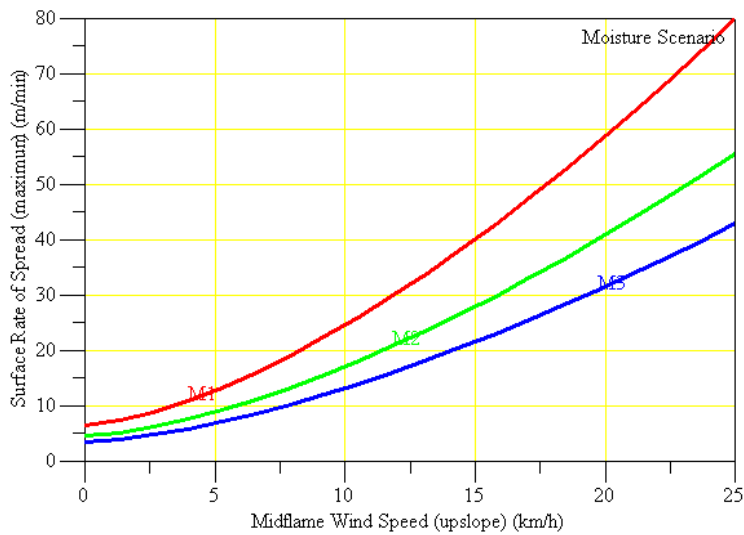
Η μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης (Rate of Spread - m/min), του μήκους της φλόγας (Flame Length - m) και της θερμικής έντασης του μετώπου (Fireline Intensity -KW/m) με τον άνεμο (km/h) για τα τρία σενάρια υγρασίας της ζωντανής και νεκρής καύσιμης ύλης του Μ.Κ.Υ SH_K1 παρουσιάζονται στο Σχήμα 19, του μοντέλου SH_K2 στο Σχήμα 20 και του Μ.Κ.Υ. SH_K3 στο Σχήμα 21 αντίστοιχα. Είναι ολοφάνερο ότι η συμπεριφορά της πυρκαγιάς αλλάζει σημαντικά όταν επικρατούν οι μέσες χειρისტες συνθήκες (M1) κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Η αύξηση της ταχύτητας διάδοσης οδηγεί σε αύξηση του μήκους φλόγας και συνεπώς αύξηση της θερμικής έντασης του μετώπου. Η μικρή μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην εξέλιξη της πυρκαγιάς και στην δυσκολία αντιμετώπισής της, πόσο περισσότερο αν εξαπλωθεί και σε άλλους τύπους βλάστησης (πχ. Πευκοδάση).



Surface Rate of Spread
 Ταχύτητα διάδοσης
Flame Length
 Μήκος φλόγας
Fireline Intensity
 Θερμική ένταση μετώπου
Midflame Wind Speed
 Ταχύτητα ανέμου (ύψος-6μ)

ΣΕΝΑΡΙΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ
 M1 – Μέσες Χαίρισες
 M2 – Μεσαίες
 M3 – Μέσες Βέλιπτες

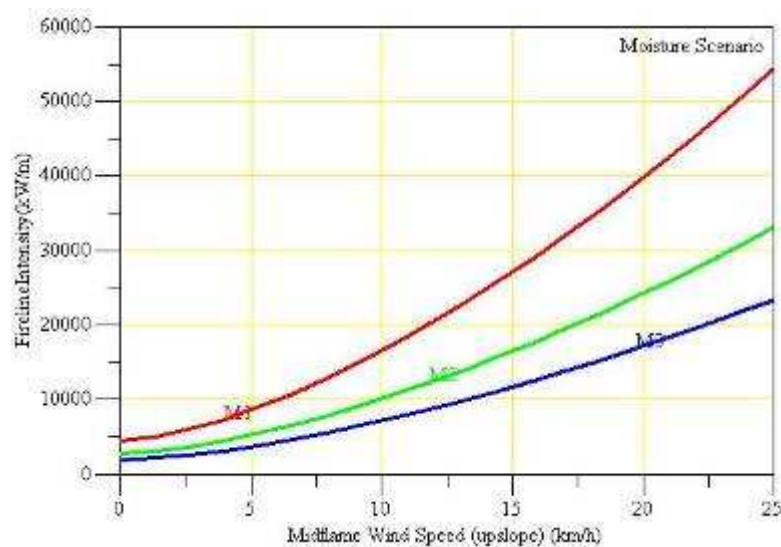
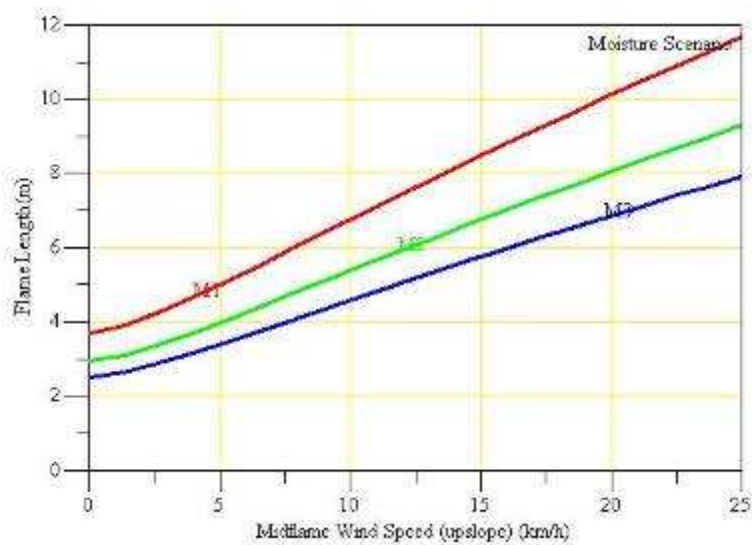
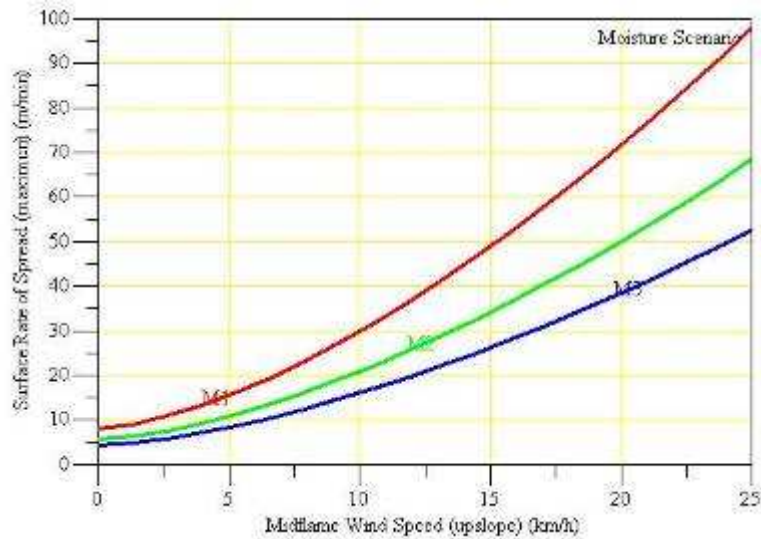
Σχήμα 19: Διαγράμματα μεταβολής ταχύτητας διάδοσης, μήκους φλόγας και θερμικής έντασης πυρκαγιάς του M.K.Y. SH_K1 με τον άνεμο στα τρία σενάρια υγρασίας



Surface Rate of Spread
 Ταχύτητα διάδοσης
Flame Length
 Μήκος φλόγας
Fireline Intensity
 Θερμική ένταση μετώπου
Midflame Wind Speed
 Ταχύτητα ανέμου (ύψος~6μ)

ΣΕΝΑΡΙΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ
 M1 – Μέσες Χείριστες
 M2 – Μισαίσις
 M3 – Μέσες Βέλτιστες

Σχήμα 20: Διαγράμματα μεταβολής ταχύτητας διάδοσης, μήκους φλόγας και θερμικής έντασης πυρκαγιάς του M.K.Y. SH_K2 με τον άνεμο στα τρία σενάρια υγρασίας

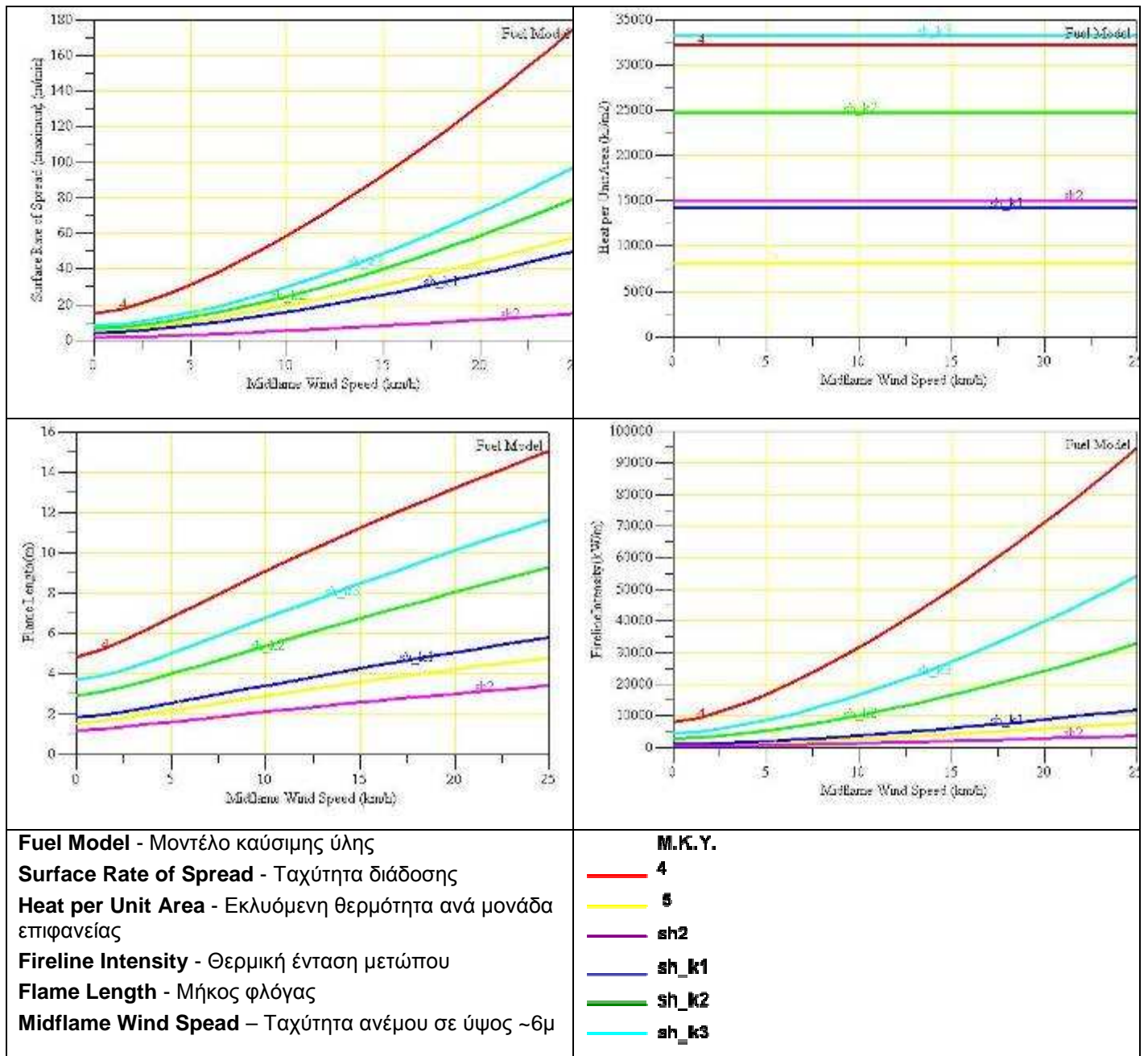


Surface Rate of Spread
 Ταχύτητα διάδοσης
Flame Length
 Μήκος φλόγας
Fireline Intensity
 Θερμική ένταση μετώπου
Midflame Wind Speed
 Ταχύτητα ανέμου (ύψος-6μ)

ΣΕΝΑΡΙΑ ΥΓΡΑΣΙΑΣ
 M1 – Μέσος Χαρίσιες
 M2 – Μεσαίες
 M3 – Μέσος Βέλισιες

Σχήμα 21: Διαγράμματα μεταβολής ταχύτητας διάδοσης, μήκους φλόγας και θερμικής έντασης πυρκαγιάς του M.K.Y. SH_K3 με τον άνεμο στα τρία σενάρια υγρασίας

Ακολούθησε με τη βοήθεια του συστήματος πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς BehavePlus v.3 η σύγκριση των παραμέτρων συμπεριφοράς πυρκαγιάς του νέου τοπικού Μ.Κ.Υ. (στις διάφορες μορφές του SH_K1, SH_K2, SH_K3) με τα αντίστοιχα πρότυπα Μ.Κ.Υ. της Αμερικής (4, 5, SH2), εφαρμόζοντας το σενάριο υγρασίας της καύσιμης ύλης M1:Μέσες χείριστες συνθήκες για τη Λέσβο κατά τη διάρκεια της αντιπυρικής περιόδου (Πίνακας 10 και 11), μέση κλίση 50% και άνεμο που κυμαίνεται 0-25 km/h. Για κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης υπολογίστηκαν οι κρίσιμοι παράμετροι συμπεριφοράς (ταχύτητα διάδοσης, μήκος φλόγας, θερμική ένταση μετώπου, θερμότητα ανά μονάδα επιφανεΐας) μιας ενδεχόμενης πυρκαγιάς (Σχήμα 22).



Σχήμα 22: Αποτελέσματα προγράμματος BehavePlus v.3 από τη σύγκριση του τοπικού Μ.Κ.Υ με τα πρότυπα Μ. Κ.Υ. θάμνων της Αμερικής

Το τοπικό μοντέλο θάμνων (SH_K) περιλαμβάνει αείφυλλους σκληρόφυλλους θάμνους χωρίς παρουσία χορτολιβαδικής βλάστησης, με κάλυψη θάμνων 90%, ύψος περίπου 60cm και χαρακτηρίζεται από μεσαίο έως υψηλό φορτίο καύσιμης ύλης ανάλογα με τη μορφή του μοντέλου. Ο κύριος φορέας της φωτιάς στο μοντέλο SH_K είναι οι θάμνοι και το υπόστρωμα (ξηροτάπητας). Με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος BehavePlus v.3 παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά του μοντέλου SH_K (sh_k1, sh_k2, sh_k3) βρίσκεται ανάμεσα στη συμπεριφορά των M.K.Y. 4 και 5 της Αμερικής (Σχήμα 22). Η φωτιά στο μοντέλο sh_k1 δεν είναι πολύ έντονη γιατί τα επιφανειακά καύσιμα δεν έχουν μεγάλο φορτίο καθώς δεν υπολογίζεται το φορτίο του ξηροτάπητα, και τα φυλλώματα των νέων θάμνων δεν είναι ιδιαίτερα εύφλεκτα. Η συμπεριφορά της φωτιάς στο μοντέλο sh_k2 είναι πιο έντονη από ότι στο μοντέλο sh_k1, καθώς η ποσότητα της καύσιμης διαθέτει αρκετό νεκρό υλικό που συμβάλει στην ταχύτερη εξάπλωση της πυρκαγιάς. Αντίστοιχα, το μοντέλο sh_k3 χαρακτηρίζεται από υψηλό φορτίο καύσιμης της, καθώς περιλαμβάνει μεγάλο φορτίο ξηροτάπητα. Χαρακτηριστικά η εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή το M.K.Y. 4 και οι τιμές της παραμένουν σταθερές για κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης, καθώς επηρεάζεται μόνο από την ποσότητα της διαθέσιμης καύσιμης ύλης. Ας σημειωθεί ότι τα ξερά καύσιμα διαμέτρου <0.64cm διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην μεταφορά της φωτιάς και λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψη στο μοντέλο πυρικής συμπεριφοράς. Η συμπεριφορά της φωτιάς είναι πολύ πιο έντονη στο μοντέλο sh_k3 σε σχέση με τα sh_k1 και sh_k2. Σε όλες τις μορφές του μοντέλου, η αύξηση της ταχύτητας διάδοσης οδηγεί σε αύξηση του μήκους φλόγας και συνεπώς αύξηση της θερμικής έντασης του μετώπου. Η ευφλεκτικότητα του μοντέλου SH_K οφείλεται στη συνέχεια της χημικά εύφλεκτης καύσιμης ύλης και στην χαμηλή περιεκτικότητά της σε υγρασία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Η ταχύτητα διάδοσης και το μήκος της φλόγας είναι μεσαίου έως υψηλού μεγέθους, ανάλογα με το συνολικό φορτίο της περιεχόμενης υγρασίας νεκρής καύσιμης ύλης μίας ώρας και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι αναφορικά με τους θάμνους δεν μπορεί κανένα από τα M.K.Y. της Αμερικής (4, 5, sh2) να μπορέσει να ερμηνεύσει τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς όσο τα τοπικά μοντέλα. Κρίνεται λοιπόν αναγκαίο να δημιουργηθούν μοντέλα καύσιμης ύλης που να ανταποκρίνονται στις συνθήκες της χώρας μας προκειμένου να μπορεί να γίνει αξιόπιστη εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς και καταστολή αυτής.

3.6 Προσομοίωση Συμπεριφοράς και Χωρικής Εξάπλωσης Πυρκαγιάς

Στη Θέση Κουρτερή Χαραμίδα του Δήμου Μυτιλήνης εκδηλώθηκε πυρκαγιά το βράδυ της 19^{ης} Ιουλίου 2006, η εξολοκλήρου κατάσβεση και καταστολή της οποίας έγινε την 24^η Ιουλίου 2006 (Πίνακας 13). Σύμφωνα με την έκθεση αυτοψίας της πυρκαγιάς που συντάχθηκε από τη Δασική Υπηρεσία Λέσβου η καταστροφική πυρκαγιά έκαψε περίπου 6708 στρέμματα δασική έκτασης και για την κατάσβεσή της χρησιμοποιήθηκαν 173 δασοπυροσβέστες, 29 πυροσβεστικά οχήματα και 12 αεροσκάφη. Ως σημείο πιθανής εκκίνησης της πυρκαγιάς εκτιμήθηκε κατά προσέγγιση αυτό με συντεταγμένες Χ: 721520 και Υ: 4325040.

3.6.1 Προσομοίωση Πυρκαγιάς με το Πρόγραμμα BehavePlus v.3

Το πρόγραμμα BehavePlus v.3 (βλ. παρ. 3.4.1) χρησιμοποιεί πραγματικά δεδομένα για να προβλέψει τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς σε ένα σημείο στο χώρο και το χρόνο. Τα δεδομένα που απαιτούνται για τη στατική προσομοίωση της πυρκαγιάς της 19^{ης} Ιουλίου 2006 αφορούν τις μετεωρολογικές συνθήκες, την καύσιμη ύλη και την τοπογραφία.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα των ημερών της πυρκαγιάς (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, θερμοκρασία, σχετική υγρασία, περιεχόμενη υγρασία καύσιμης ύλης) συλλέχθηκαν από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.) και τον Αυτόματο Τηλεμετρικό Μετεωρολογικό Σταθμό του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Σύμφωνα με τα δεδομένα της Ε.Μ.Υ. τη στιγμή της έναρξης της πυρκαγιάς στην περιοχή επικρατούσε άπνοια. Η σχετική υγρασία ήταν 57%, ενώ η θερμοκρασία δεν ξεπερνούσε τους 23°C. Η φωτιά έφτασε την κύρια εξάπλωσή της σε δεκαπέντε ώρες. Έτσι το μεσημέρι της 20^{ης} Ιουλίου (15:00) ο άνεμος έπνεε με ταχύτητα 17km/h, η υγρασία είχε μειωθεί στο 23% και η θερμοκρασία ήταν 32 °C. Στις 19:00 το απόγευμα της 20^{ης} Ιουλίου η πυρκαγιά έφτασε τη μέγιστη εξάπλωσή της, με την ταχύτητα του ανέμου να έχει ενταθεί στα 22km/h, τη θερμοκρασία του αέρα να είναι στους 27 °C και την υγρασία στο 51%. Η φωτιά συνέχισε να εξαπλώνεται μέχρι την 22^η Ιουλίου όπου τέθηκε υπό έλεγχο από τη δασική υπηρεσία στις 06:30 το πρωί (Πίνακας 13). Βασική παραδοχή είναι ότι ο άνεμος κινείται σε ανωφέρεια (διεύθυνση ανέμου 0°). Σύμφωνα με τα δεδομένα της θερμοκρασίας και της υγρασίας βγαίνει το συμπέρασμα ότι η πυρκαγιά δεν προκλήθηκε από φυσικά αίτια και πιθανώς να οφείλεται σε εμπρησμό.

Χρονοδιάγραμμα Πυρκαγιάς			Μετεωρολογικές Συνθήκες		
	Ημερομηνία	Ώρα	Θερμοκρασία (°C)	Υγρασία (%)	Άνεμος (km/h)
Έναρξη	19/07/2006	23:55	23	57	0
Κύρια Εξάπλωση	20/07/2006	15:00	32	23	17
Μέγιστη Εξάπλωση	20/07/2006	19:00	27	51	22
Έλεγχος	22/07/2006	06:30	22	69	9
Καταστολή	24/07/2004	07:30	22	43	9

Πίνακας 13: Χρονοδιάγραμμα και μετεωρολογικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της 19^{ης} Ιουλίου 2006 πυρκαγιάς στη Χαραμίδα, Ν. Λέσβου

Τα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης που περιγράφουν τη βλάστηση της ευρύτερης περιοχής που εκδηλώθηκε η πυρκαγιά είναι (βλ. παρ. 3.5, Χάρτης 10, Scott and Burgan, 2005):

- Μοντέλο SH2 – Θαμνότοποι
- Μοντέλο GR2 – Χορτολίβαδα
- Μοντέλο TU1 – Ελαιώνες
- Μοντέλο TU4 – Αραιό δάσος κωνοφόρων
- Μοντέλο TU5 – Δάσος Κωνοφόρων
- Μοντέλο NB1 – Αστικές Περιοχές
- Μοντέλο NB3 – Καλλιέργειες

Απαραίτητα στοιχεία για την προσομοίωση της πυρικής συμπεριφοράς είναι εκτός των άλλων η περιεχόμενη υγρασία της νεκρής και της ζωντανής καύσιμης ύλης ανά τάξη μεγέθους (χρονικής υστέρησης 1 ώρας, 10 ωρών, 100 ωρών). Για τις συγκεκριμένες μέρες της πυρκαγιάς οι συγκεκριμένες παράμετροι της καύσιμης ύλης είχαν ως εξής:

- Περιεχόμενη υγρασία νεκρής καύσιμης ύλης

1-hr T_L : 4%

10-hr T_L : 5%

100-hr T_L : 10%

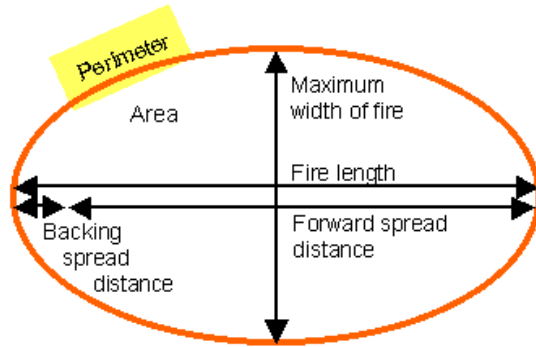
- Περιεχόμενη υγρασία Ζωντανής καύσιμης ύλης

χορτολιβαδικής: 70%

ξυλώδους: 70%

Αξίζει να σημειωθεί ότι το πρόγραμμα BehavePlus v.3, ως δισδιάστατο μοντέλο, έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς μόνο όταν δύο από τα εισερχόμενα δεδομένα μεταβάλλονται (παιρνουν πάνω από μία τιμές). Συνεπώς, στην περίπτωση της πυρκαγιάς της 19^{ης} Ιουλίου 2006, η τοπογραφία ορίζεται με την μέση τιμή (50%).

Εισάγοντας τα παραπάνω δεδομένα στα Υποσυστήματα “SURFACE” του προγράμματος έγινε υπολογισμός των παραμέτρων διάδοσης και έντασης της επιφανειακής πυρκαγιάς (όπως ταχύτητα διάδοσης, μήκος φλόγας, θερμική ένταση του μετώπου, θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας). Στη συνέχεια, επιλέγοντας το υποσύστημα “SIZE” του προγράμματος, το οποίο αντλεί τα απαιτούμενα δεδομένα από το υποσύστημα SURFACE (ταχύτητα ανέμου και ταχύτητα διάδοσης) υπολογίστηκε η περίμετρος (perimeter) και η απόσταση εξάπλωσης της πυρκαγιάς (forward spread distance). Οι δύο αυτές παράμετροι βασίζονται στο ελλειπτικό μοντέλο του σχήματος της φωτιάς (Σχήμα 23). Περίμετρος πυρκαγιάς είναι η απόσταση του ορίου εξάπλωσης της πυρκαγιάς σε μέτρα (m), το οποίο είναι παράλληλο με την κύρια κατεύθυνση της εξάπλωσης της πυρκαγιάς. Η απόσταση εξάπλωσης της πυρκαγιάς είναι η απόσταση θα διανύσει η φωτιά με βάση την ταχύτητα εξάπλωσης. Ως μέγιστος χρόνος μέτρησης της εξάπλωσης της πυρκαγιάς στο πρόγραμμα BehavePlus v.3 ορίζονται οι 8 ώρες αρχικά από τη στιγμή που εκδηλώθηκε η πυρκαγιά, και στη συνέχεια από κάθε σημείο που μετρήθηκε το μέγεθος και η ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς.



Σχήμα 23: Περίμετρος και απόσταση εξάπλωσης της πυρκαγιάς (Andrews, 2004)

Τα αποτελέσματα του προγράμματος απεικονίζονται είτε σε μορφή πινάκων είτε σε μορφή διαγραμμάτων. Στους πίνακες 14,15 και 16 απεικονίζονται τα αποτελέσματα του υποσυστήματος SURFACE και συγκεκριμένα οι παράμετροι συμπεριφοράς της πυρκαγιάς με άνεμο 0, 17 και 22 km/h αντίστοιχα. Στους πίνακες 17 και 18 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του υποσυστήματος "SIZE" και συγκεκριμένα η περίμετρος και η απόσταση εξάπλωσης της πυρκαγιάς στο σημείο έναρξης πυρκαγιάς (M.K.Y. TU5 - δάσος κωνοφόρων) και στο σημείο κύριας εξάπλωσης της πυρκαγιάς (όλα τα M.K.Y.).

M.K.Y.	Ταχύτητα Διάδοσης (km/h)	Θερμότητα ανά Μονάδα Επιφανείας (kJ/m ²)	Θερμική Ένταση του Μετώπου (kW/m)	Μήκος φλόγας (m)
Χορτολίβαδα	4.1	2829	195	0.9
Θαμνότοποι	1.6	15746	411	1.2
Ελαιώνες	0.6	4874	49	0.5
Αραιό δάσος κωνοφόρων	2.6	13552	583	1.4
Δάσος Κωνοφόρων	2.1	32185	1116	2.0

Πίνακας 14: Χαρακτηριστικά φωτιάς στο σημείο έναρξης (άνεμος 0km/h)

M.K.Y.	Ταχύτητα Διάδοσης (m/min)	Θερμότητα ανά Μονάδα Επιφανείας (kJ/m ²)	Θερμική Ένταση του Μετώπου (kW/m)	Μήκος φλόγας (m)
Χορτολίβαδα	33	2829	1554	2.3
Θαμνότοποι	9.9	15746	2589	2.9
Ελαιώνες	3.9	4874	315	1.1
Αραιό δάσος κωνοφόρων	18.7	13552	4218	3.6
Δάσος Κωνοφόρων	10.6	32185	5699	4.1

Πίνακας 15: Χαρακτηριστικά φωτιάς στο σημείο κύριας εξάπλωσης (άνεμος 17km/h)

M.K.Y.	Ταχύτητα Διάδοσης (km/h)	Θερμότητα ανά Μονάδα Επιφανείας (kJ/m ²)	Θερμική Ένταση του Μετώπου (kW/m)	Μήκος φλόγας (m)
Χορτολίβαδα	35.4	2829	1669	2.4
Θαμνότοποι	13.4	15746	3528	3.3
Ελαιώνες	5.2	4874	426	1.3
Αραιό δάσος κωνοφόρων	27	13552	6100	4.3
Δάσος Κωνοφόρων	13.6	32185	7319	4.6

Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά φωτιάς στο σημείο μέγιστης εξάπλωσης (άνεμος 22km/h)

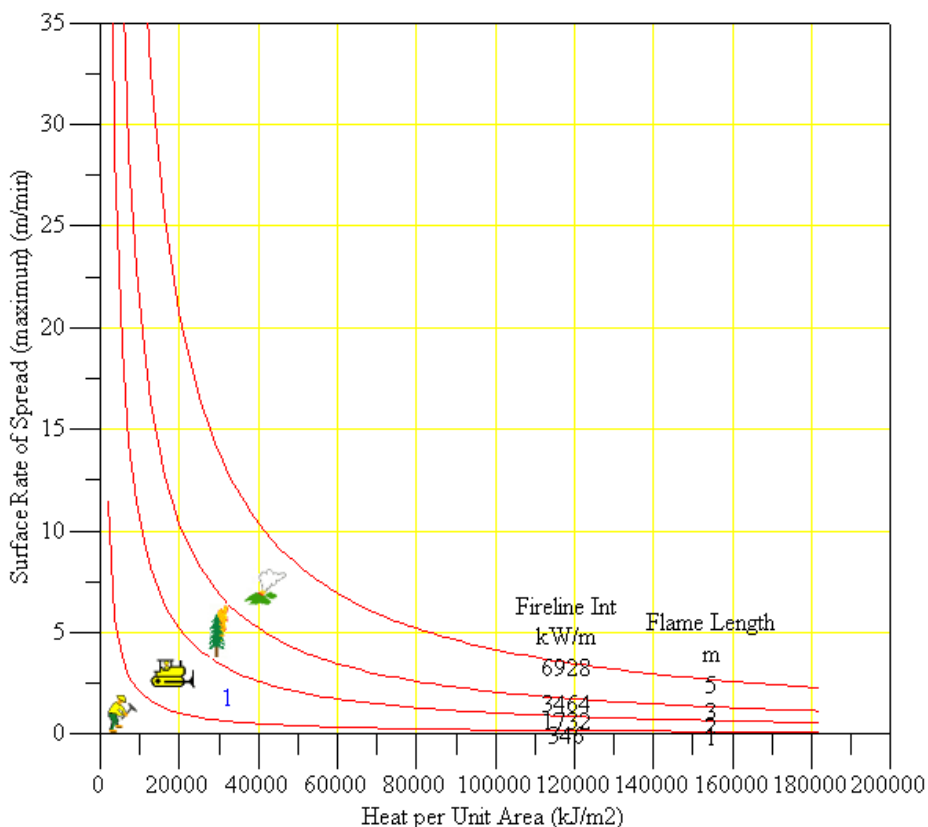
Χρόνος (h)	Περίμετρος (m)	Απόσταση Εξάπλωσης Πυρκαγιάς (m/h)
1	354	124,8
2	709	249,6
3	1063	374,4
4	1418	499,1
5	1772	623,9
6	2127	748,7
7	2481	873,5
8	2836	998,3

Πίνακας 17: Περίμετρος και απόσταση εξάπλωσης φωτιάς σε δάσος κωνοφόρων για άνεμο 0km/h

Χρόνος (σε ώρες)	M.K.Y.				
	Χορτολίβαδα	Θαμνότοποι	Ελαιώνες	Αραιό Δάσος Κωνοφόρων	Δάσος Κωνοφόρων
1	1977,5	592,0	232,4	1120,4	637,4
2	3955,0	1183,9	464,8	2240,8	1274,9
3	5932,5	1775,9	697,3	3361,2	1912,3
4	7910,0	2367,9	929,7	4481,6	2549,8
5	9887,5	2959,8	1162,1	5602,0	3187,2
6	11865,0	3551,8	1394,5	6722,5	3824,7
7	13842,5	4143,8	1627,0	7842,9	4462,1
8	15820,0	4735,7	1859,4	8963,3	5099,6

Πίνακας 18: Απόσταση εξάπλωσης φωτιάς (m/h) για άνεμο 17 km/h

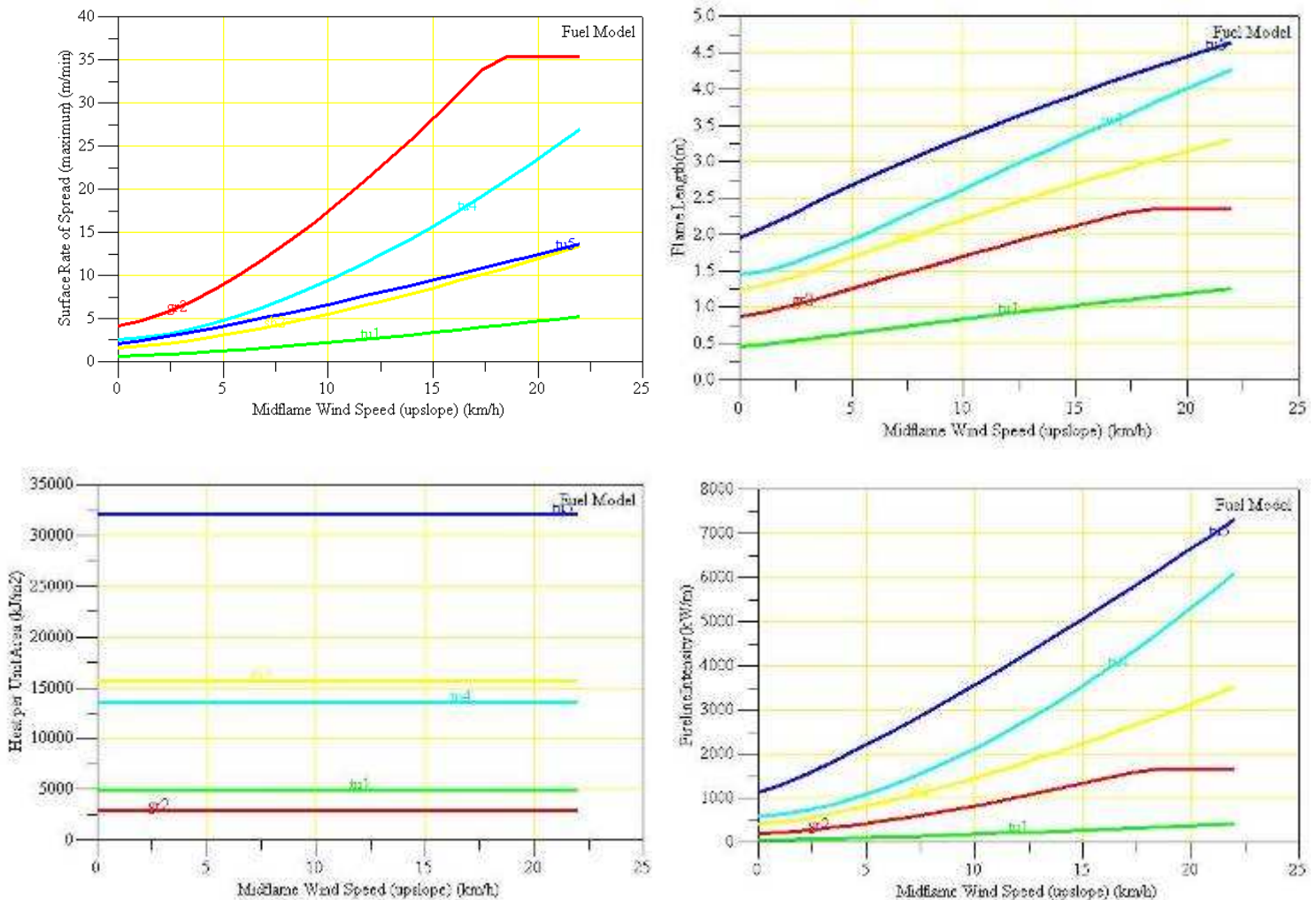
Ας σημειωθεί, ότι το Μοντέλο Καύσιμης Ύλης που κυριαρχεί το σημείο εκδήλωσης της 19^{ης} Ιουλίου 2006 πυρκαγιάς είναι δάσος κωνοφόρων, ύψους 6-12m. Από τον Πίνακα 14 παρατηρούμε ότι τη στιγμή έναρξης της πυρκαγιάς, με συνθήκες άπνοιας, το ύψος της φλόγας υπολογίζεται στα 2m, γεγονός που δείχνει ότι οι επίγειες δυνάμεις με δυσκολία θα μπορούσαν να επτέμβουν στην καταστολή της (Σχήμα 24). Παρόλο αυτά όμως η πυρκαγιά βρισκόταν υπό έλεγχο μέχρι τις πρωινές ώρες της 20^{ης} Ιουλίου 2006.



Σχήμα 24: Διάγραμμα πυρικών χαρακτηριστικών στο σημείο έναρξης πυρκαγιάς

Με βάση τα αποτελέσματα του προγράμματος BehavePlus v.3 (Σχήμα 25, Πίνακες 14, 15 και 16) παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας διάδοσης της πυρκαγιάς εξαιτίας της αύξησης της έντασης του ανέμου κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οπότε για κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης, η αύξηση της ταχύτητας διάδοσης οδηγεί σε αύξηση του μήκους φλόγας και συνεπώς αύξηση της θερμικής έντασης του μετώπου. Τα χορτολίβαδα έχουν σχετικά μικρή ποσότητα καύσιμης ύλης δίνοντας πυρκαγιές μικρής θερμικής έντασης, αλλά μεγάλης ταχύτητας διάδοσης. Στους ελαιώνες παρατηρείται η μικρότερη ταχύτητα διάδοσης λόγω της μικρής ποσότητας διαθέσιμης καύσιμης ύλης. Οι συγκεκριμένες εκτάσεις καλλιεργούνται εντατικά που σημαίνει ότι καθαρίζονται συχνά από σπασμένα κλαδιά και χόρτα, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη μη συσσώρευση ποσότητας νεκρής καύσιμης ύλης. Οι θαμνότοποι παρουσιάζουν υψηλή ευφλεκτικότητα που οφείλεται στη μεγάλη πυκνότητα και συνέχεια της καύσιμης ύλης, όπως και στη χαμηλή περιεκτικότητά τους σε υγρασία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Η θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας επηρεάζεται μόνο από την ποσότητα της διαθέσιμης καύσιμης ύλης και για το λόγο αυτό είναι σταθερή για κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης, ανεξαρτήτως της μεταβολής του ανέμου. Είναι λογικό η μεγαλύτερη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας να εμφανίζεται στο δάσος κωνοφόρων, καθώς υπάρχει συσσώρευση μεγάλη ποσότητας και εύφλεκτης καύσιμης ύλης (ξητροτάπητας και υπόροφος θάμνων). Οι θάμνοι κατανέμονται οριζόντια και κάθετα και σε περίπτωση πυρκαγιάς δίνουν γρήγορη ανάφλεξη και

πλήρη καύση. Επίσης, από τους Πίνακες 17 και 18 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η ένταση του ανέμου, αυξάνεται η ταχύτητα διάδοσης και συνεπώς αυξάνεται και η απόσταση της εξάπλωσης της φωτιάς ανά ώρα ακολουθώντας και τις διαφορές που παρουσιάζονται σε κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης.



Fuel Model - Μοντέλο καύσιμης ύλης

Surface Rate of Spread - Ταχύτητα διάδοσης

Heat per Unit Area - Εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας

Fireline Intensity - Θερμική ένταση μετώπου

Flame Length - Μήκος φλόγας

Midflame Wind Speed – Ταχύτητα ανέμου σε ύψος ~6μ

MLKY

tu5 - Δάσος Κωνοφόρων

gr2 - Χορτολιβάδα

Tu4 - Αραιό Δάσος Κωνοφόρων

sh2 - Θαμνότοποι

tu1 - Ελαιώνες

Σχήμα 25: Οι παράμετροι συμπεριφοράς πυρκαγιάς σε μορφή διαγραμμάτων

Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόσταση εξάπλωσης της φωτιάς που παρουσιάζεται στον Πίνακα 16 δεν ανταποκρίνεται στην πραγματική απόσταση, αποτελεί περίπτωση υπερεκτίμησης. Αυτό συμβαίνει επειδή στο μοντέλο πυρικής συμπεριφοράς έχουν χρησιμοποιηθεί μέσες επικρατέστερες τιμές των παραμέτρων της καύσιμης ύλης, των καιρικών και τοπογραφικών συνθηκών και δεν έχουν ληφθεί υπόψη σημαντικά παράγοντες όπως η κίνηση του ανέμου σε κατωφέρεια κατά τις νυχτερινές ώρες και η μεταβολή της περιεχόμενης υγρασίας νεκρής καύσιμης ύλης. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι το πρόγραμμα BehavePlus v.3 κάνει πρόβλεψη της συμπεριφοράς για ένα σημείο στο χώρο και το χρόνο, στατική προσομοίωση.

Συνεπώς προκειμένου να έχουμε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για την εξέλιξη μιας πυρκαγιάς θα πρέπει να εισάγονται τα δεδομένα που ισχύουν σε κάθε σημείο σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα και αντίστοιχα να εκτιμώνται οι παράμετροι της συμπεριφοράς πυρκαγιάς. Βέβαια κάτι τέτοιο δεν είναι ιδιαίτερα εφικτό όταν μια πυρκαγιά καίει πολλές μέρες και οι συνθήκες τοπογραφίας, καύσιμης ύλης και μετεωρολογίας μεταβάλλονται. Όμως, το πρόγραμμα BehavePlus v.3 αποτελεί ένα από τα πολυτιμότερα εργαλεία πρόβλεψης της συμπεριφοράς της φωτιάς τόσο σε πραγματικές επιχειρήσεις καταστολής όσο και στην εκπαίδευση προσωπικού.

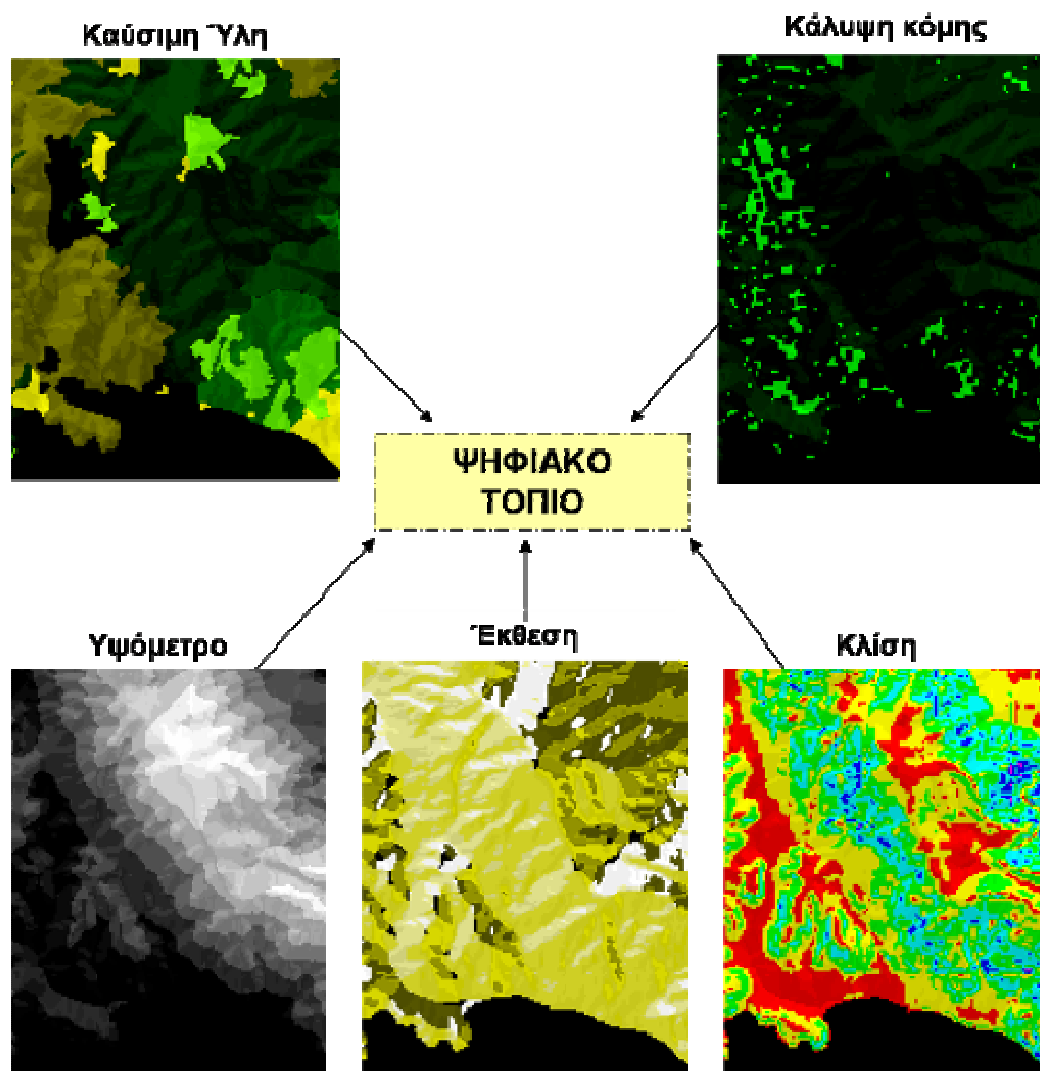
3.6.2 Προσομοίωση Πυρκαγιάς με το Πρόγραμμα FARSITE

Το σύστημα FARSITE επιλέχθηκε για την προσομοίωση της χωρικής εξάπλωσης της πυρκαγιάς που εκδηλώθηκε, όπως προαναφέρθηκε, το βράδυ της 19^{ης} Ιουλίου 2006 στην περιοχή της Χερσονήσου Αμαλής στη Λέσβο, χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα τοπογραφίας, καύσιμης ύλης και μετεωρολογίας (Πίνακας 13, παρ. 3.6).

Τα πέντε χωρικά δεδομένα που απαιτούνται για τη δημιουργία του τοπίου της περιοχής εκδήλωσης πυρκαγιάς παρουσιάζονται στην Εικόνα 2. Το μοντέλο εξάπλωσης πυρκαγιάς FARSITE υπολογίζει ένταση πυρκαγιάς και ταχύτητα εξάπλωσης για πολυάριθμα σημεία κατά μήκος του τοπίου. Συνεπώς απαιτεί τα εισερχόμενα χωρικά δεδομένα να έχουν: α) ίδια ακρίβεια (σημείο αναφοράς, προβολή και μονάδες), β) ταυτόσημη ανάλυση (κάθε μέγεθος κελιού θα πρέπει να είναι ίδιο σε όλα τα χωρικά δεδομένα) και γ) όμοια έκταση (οι γωνίες της ορθογώνιας χωρικής περιοχής θα πρέπει να είναι οι ίδιες), ώστε να επικαλύπτονται πλήρως. Για το λόγο αυτό, δημιουργήθηκε μία περιοχή η οποία χρησιμοποιήθηκε ως πρότυπο για τη δημιουργία πέντε χωρικών δεδομένων που να έχουν την ίδια ακρίβεια, ανάλυση και έκταση. Η συγκεκριμένη περιοχή επιλέχθηκε με σκοπό να περιλαμβάνει το πιθανό σημείο έναρξης της πυρκαγιάς της 19^{ης} Ιουλίου 2006.

Συγκεκριμένα, τα τρία πρώτα επίπεδα χωρικής πληροφορίας εξήχθησαν από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της Κρατήγης με τη βοήθεια του προγράμματος ArcMap (Χάρτες 2, 3 και 4). Τα Μοντέλα Καύσιμης Ύλης που αντιπροσωπεύουν τα συμπλέγματα βλάστησης της περιοχής μελέτης αντιστοιχήθηκαν με τα πρότυπα Μ.Κ.Υ. της Αμερικής (Χάρτης 8, βλ. παρ. 3.5). Για τα Μ.Κ.Υ. που δεν επιδέχονται καύση (αρδευόμενες καλλιέργειες, αστικές περιοχές, γυμνό έδαφος) ορίστηκαν με την τιμή 99. Επιπλέον, λόγω έλλειψης διαθέσιμων χωρικών δεδομένων και γενικότερα δεδομένων από εργασίες πεδίου, η χωρική πληροφορία της κάλυψης κόμης προήλθε από την επεξεργασία της δορυφορικής εικόνας QuickBird χωρικής ανάλυσης 2.8m. Με χρήση του προγράμματος ERDAS IMAGINE 8.7 και χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές (μη-επιβλεπόμενη ταξινόμηση, ερμηνεία εικόνας και στατιστική ανάλυση γειτονικών εικονοστοιχείων) προκειμένου να γίνει διαχωρισμός των εικονοστοιχείων που αντιστοιχούν σε δέντρα και αυτών που δεν αντιστοιχούν, να καθοριστεί η κάλυψη και στη συνέχεια να κατηγοριοποιηθεί ως εξής:

Κατηγορία	Ποσοστό κάλυψης κόμης
0 ή 99	0%
1	1-20%
2	21-50%
3	50-80%
4	81-100%



Εικόνα 2: Τα βασικά χωρικά δεδομένα που απαιτούνται για τη συγκρότηση του ψηφιακού τοπίου

Σε γενικές γραμμές κρίνεται απαραίτητη η υποστήριξη των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών για τη δημιουργία, μετατροπή και διαχείριση των χωρικών δεδομένων που προϋποθέτει το πρόγραμμα. Η χωρική ανάλυση όλων των δεδομένων ορίστηκε στα 30m.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα τις μέρες της πυρκαγιάς (19-24 Ιουλίου 2006) συλλέχθηκαν από τα αρχεία του Μετεωρολογικού Σταθμού του Αεροδρομίου Μυτιλήνης και του Αυτόματου Τηλεμετρικού Μετεωρολογικού Σταθμού του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Και οι δύο μετεωρολογικοί σταθμοί είναι εγκατεστημένοι σχετικά κοντά στο σημείο εκδήλωσης πυρκαγιάς, οπότε οι μετρήσεις είναι αξιόπιστες.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα ενσωματώθηκαν στο σύστημα FARSITE με δύο τρόπους. Αρχικά συμπληρώθηκε το αρχείο με τα ακόλουθα πεδία: μήνας, ημέρα, βροχόπτωση, ώρα στην οποία καταγράφεται η χαμηλότερη θερμοκρασία, ώρα στην οποία καταγράφεται η μέγιστη θερμοκρασία, η ελάχιστη θερμοκρασία, η μέγιστη θερμοκρασία, η μέγιστη και η ελάχιστη υγρασία και το υψόμετρο. Τα δεδομένα αυτού του αρχείου (.wtr) θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για να παρεμβάλουν (interpolate) την θερμοκρασία και την υγρασία ανάμεσα στη μέγιστη και την ελάχιστη

της κάθε ημέρας. Τα δεδομένα αυτά επίσης υπερεκτείνονται (extrapolate) σε διαφορετικά υψόμετρα χρησιμοποιώντας το υψόμετρο του εδάφους. Το δεύτερο αρχείο περιλαμβάνει πληροφορίες για τον άνεμο που μεταβάλλεται στο χώρο και το χρόνο. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που συμπληρώθηκαν από τα διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα, ανά ώρα, είναι: μήνας, ημέρα, ώρα, ταχύτητα ανέμου, διεύθυνση ανέμου και κάλυψη νεφών.

Στη συνέχεια καθορίστηκαν οι περιεχόμενες υγρασίες ζωντανής και νεκρής καύσιμης ύλης ανά Μοντέλο Καύσιμης Ύλης στην αρχή της προσομοίωσης, ως εξής:

- Περιεχόμενη υγρασία νεκρής καύσιμης ύλης

1-hr T_L : 4%

10-hr T_L : 5%

100-hr T_L : 10%

- Περιεχόμενη υγρασία Ζωντανής καύσιμης ύλης

χορτολιβαδικής: 70%

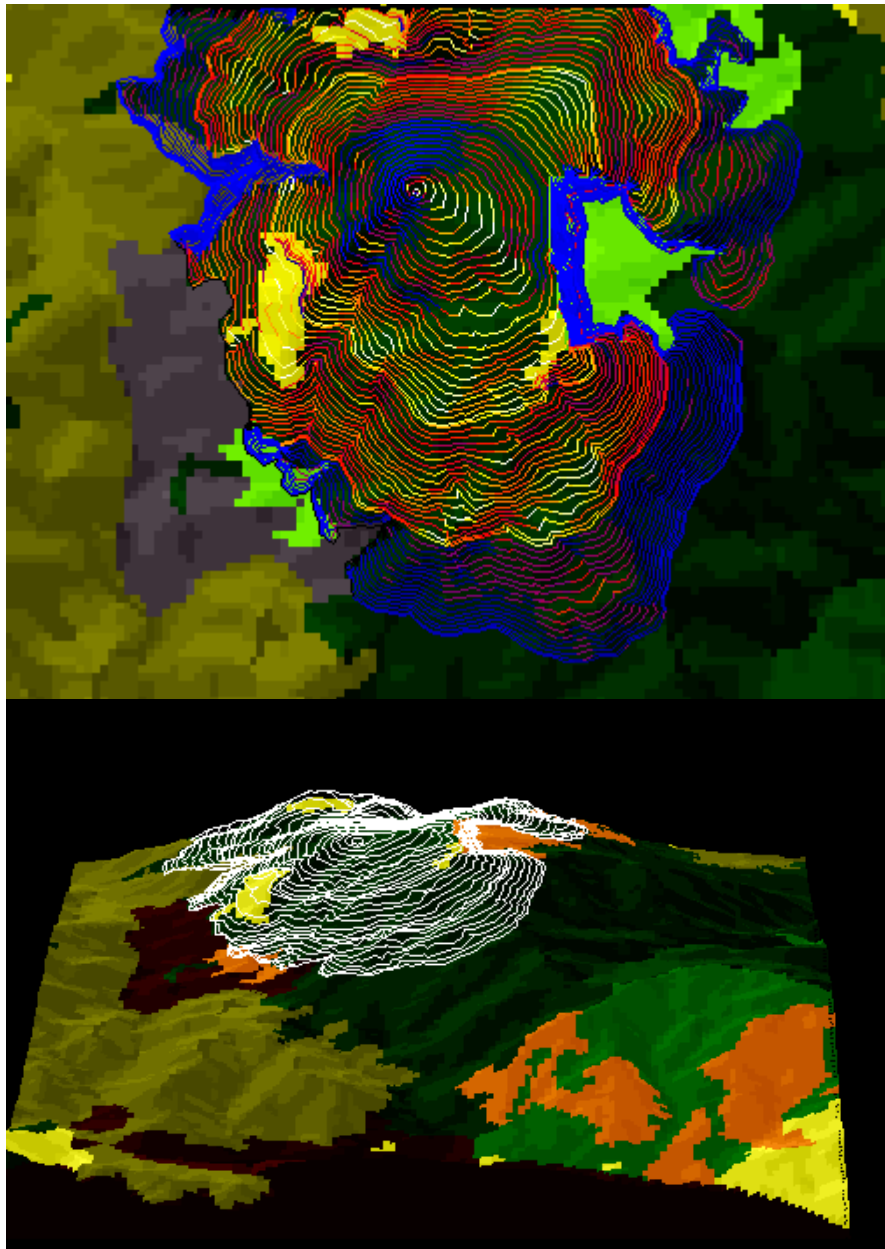
ξυλώδους: 70%

Στις συγκεκριμένες τιμές βασίζεται η διαδικασία υπολογισμού της συγκεκριμένης ανά τοποθεσία νεκρής καύσιμης ύλης σε κάθε βήμα της προσομοίωσης.

Επόμενο βήμα αποτελεί ο καθορισμός των παραμέτρων του μοντέλου που ρυθμίζουν τη χωρική και χρονική ανάλυση της προσομοίωσης (χρονικό βήμα, οπτικό βήμα, ανάλυση περιμέτρου και απόστασης εξάπλωσης). Χρονικό βήμα (timestep) είναι η μέγιστο χρονικό διάστημα που οι συνθήκες σε ένα ορισμένο σημείο θεωρούνται ως σταθερές έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η προβολή του μετώπου πυρκαγιάς. Στην περίπτωση της πυρκαγιάς που μελετάμε, ορίστηκε ως χρονικό βήμα τα 30min, οπτικό βήμα οι 2hr, ανάλυση της περιμέτρου τα 60m και ανάλυση απόστασης εξάπλωσης τα 30m.

Τέλος, για την προσομοίωση της πυρκαγιάς καθορίστηκε η διάρκειά της προσομοίωσης εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς (από 19/7 στις 23:50 έως 23/7 στις 23:30) και το σημείο ανάφλεξης. Από τη Δασική Υπηρεσία Λέσβου εκτιμήθηκε κατά προσέγγιση ότι η πυρκαγιά εκδηλώθηκε στο σημείο με συντεταγμένες X: 721520 και Y: 4325040.

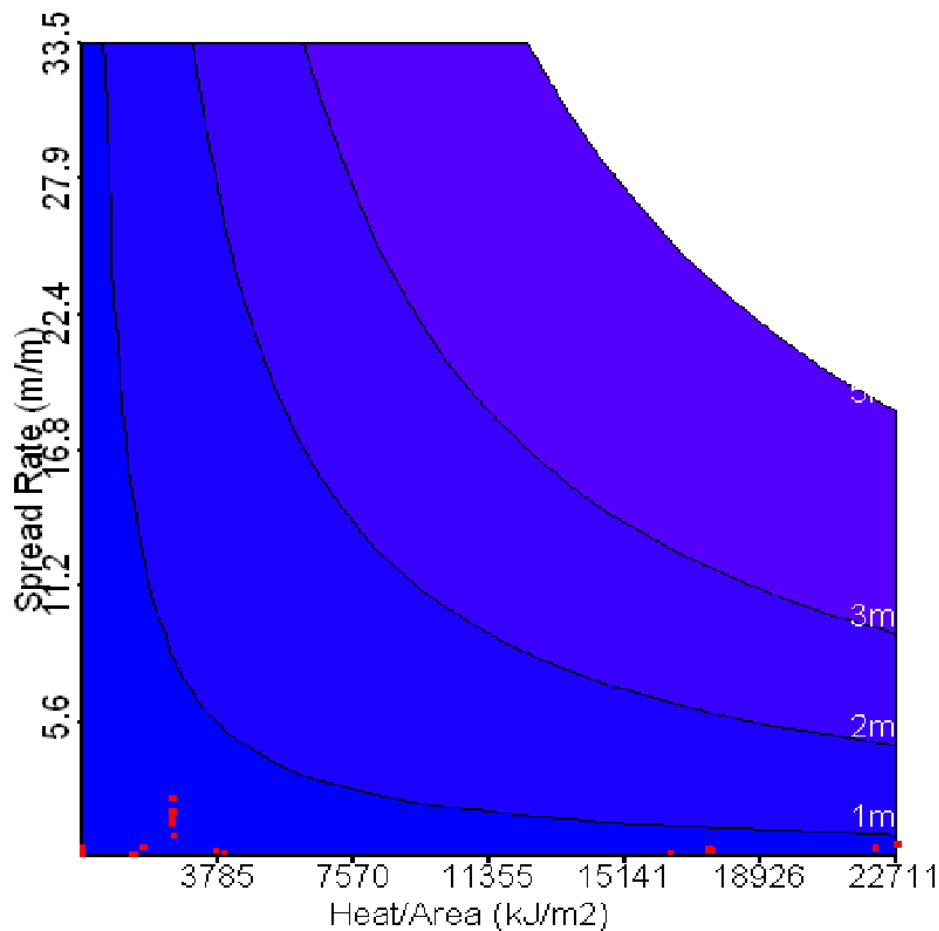
Τα αποτελέσματα προσομοίωσης της χωρικής εξάπλωσης πυρκαγιάς έχουν ποικίλες μορφές. Μπορεί να είναι χωρικά δεδομένα των παραμέτρων της φωτιάς (ταχύτητα διάδοσης, θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας, θερμική ένταση του μετώπου) τύπου vector ή raster είτε διαγράμματα δεδομένων σε σχέση με το χρόνο (καμένη έκταση, περίμετρος πυρκαγιάς, διάγραμμα πυρικών χαρακτηριστικών κ.α.) είτε πίνακες. Στην Εικόνα 3 απεικονίζεται η περίμετρος της φωτιάς ανά δύο ώρες για την διάρκεια προσομοίωσης που έχει οριστεί. Ενδεικτικά τα αριθμητικά αποτελέσματα για την περίμετρο και την καμένη έκταση παρουσιάζονται στον Πίνακα 19, ενώ αναλυτικά καταγράφονται στο Παράρτημα.



Εικόνα 3: Απεικόνιση της περιμέτρου της φωτιάς με οπτικό βήμα δύο ωρών δισδιάστατα (πάνω) και τρισδιάστατα (κάτω)

Area Table (ha)				Perimeter Table (km)			
03 18:00	07/23 17:30	354.5	367.3	03 19:00	07/23 18:30	10.2	10.5
03 18:30	07/23 18:00	354.5	367.3	03 19:30	07/23 19:00	10.2	10.5
03 19:00	07/23 18:30	354.5	367.3	03 20:00	07/23 19:30	10.2	10.5
03 19:30	07/23 19:00	354.5	367.3	03 20:30	07/23 20:00	10.2	10.5
03 20:00	07/23 19:30	354.5	367.3	03 21:00	07/23 20:30	10.2	10.5
03 20:30	07/23 20:00	354.5	367.3	03 21:30	07/23 21:00	10.2	10.5
03 21:00	07/23 20:30	354.5	367.3	03 22:00	07/23 21:30	10.2	10.5
03 21:30	07/23 21:00	354.5	367.3	03 22:30	07/23 22:00	10.2	10.5
03 22:00	07/23 21:30	354.5	367.3	03 23:00	07/23 22:30	10.2	10.5
03 22:30	07/23 22:00	354.5	367.3	03 23:30	07/23 23:00	10.2	10.5
03 23:00	07/23 22:30	354.5	367.3	04 00:00	07/23 23:30	10.2	10.5
03 23:30	07/23 23:00	354.5	367.3				
04 00:00	07/23 23:30	354.5	367.3				

Πίνακας 19: Παρουσίαση αποτελεσμάτων FARSITE για περίμετρο και καμένη έκταση



Σχήμα 26: Διάγραμμα πυρικών χαρακτηριστικών προσομοίωσης πυρκαγιάς

Με τη χρήση του προγράμματος FARSITE ολοκληρώθηκε η προσομοίωση της χωρικής εξάπλωσης της καταστρεπτικής πυρκαγιάς που εκδηλώθηκε στην περιοχή της Κρατήγου στις 19 Ιουλίου 2006. Σημαντικό βήμα αποτελεί το γεγονός ότι μπόρεσαν τα απαραίτητα χωρικά δεδομένα να εισέλθουν στην απαιτούμενη από το

πρόγραμμα μορφή και να γίνει η προσομοίωση. Βέβαια με χωρική ανάλυση μικρότερη από 30x30m, τα εισερχόμενα δεδομένα θα είναι πιο λεπτομερή και θα πλησιάζουν περισσότερο προς την πραγματικότητα. Ιδιαίτερη βαρύτητα θα πρέπει να δοθεί μελλοντικά στην συλλογή δεδομένων πεδίου όσον αφορά το ποσοστό κάλυψης κόμης. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης με τα πραγματικά όρια εξάπλωσης της πυρκαγιάς, παρατηρήθηκε ότι κατά στην προσομοίωση η πυρκαγιά εξαπλώθηκε σε μικρότερη έκταση και είχε μικρότερη ένταση. Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο, καθώς κατά την προσομοίωση δεν λήφθηκε υπόψη, λόγω έλλειψης χωρικών ψηφιακών δεδομένων, η μετάβαση της επιφανειακής πυρκαγιάς και πυρκαγιά κόμης, όπως επίσης και το πέταγμα των καυτρών που με τη σειρά τους οδηγούν σε μεγαλύτερη εξάπλωση πυρκαγιάς. Πιθανώς, τέλος, η δημιουργία Τοπικού Μοντέλου Τραχείας Πεύκης με υπόροφο να συμβάλει στην καλύτερη προσομοίωση της πυρκαγιάς.

3.7 Τρισδιάστατη Οπτικοποίηση

Η οπτικοποίηση είναι ένας ευρέως διαδεδομένος σήμερα τρόπος παρουσίασης τρισδιάστατων πληροφοριών σε διάφορους τομείς επιστήμης και τεχνολογίας (τοπογραφία, οδοποιία, αρχιτεκτονική, χωροταξία και ιατρική). Ιδιαίτερα στη χαρτογραφία, ένας από τους βασικούς στόχους της είναι η καλύτερη κατανόηση, από τον άνθρωπο, του φυσικού ανάγλυφου. Η οπτικοποίηση διευκολύνει την αντίληψη της μορφολογίας του, ενώ παρουσιάζει το σημαντικό πλεονέκτημα να συνδυάζει την δυνατότητα άντλησης όλων των πληροφοριών (ποσοτικές, ποιοτικές, θεματικές) που μπορούν να εξαχθούν από έναν δισδιάστατο χάρτη με την ρεαλιστική αναπαράσταση της περιοχής που απεικονίζεται. Η οπτικοποίηση του ανάγλυφου χρησιμοποιείται επίσης στην ανάλυση τοπίου, το αντικείμενο της οποίας είναι ακριβώς η ανάλυση, η αξιολόγηση, ο σχεδιασμός και η διαχείριση του οπτικού περιβάλλοντος (Τσουχλαράκη, 1996).

Η τρισδιάστατη απεικόνιση αποτελεί χρήσιμο εργαλείο της γεωπληροφορικής και επικεντρώνεται στην τρισδιάστατη προβολή των χωρικών δεδομένων και γεωγραφικών πληροφοριών, επιδιώκοντας το αποτέλεσμα της αναπαράστασης να ταιριάζει με τη μορφή που έχει ο αναγνώστης/ χρήστης στο μυαλό του για το φαινόμενο στο οποίο αναφέρονται τα δεδομένα. Η διαπίστωση αυτή είναι ουσιαστικής σημασίας, γιατί δίνει κατευθύνσεις και προσανατολισμούς τόσο στην έρευνα όσο και στις εφαρμογές της επιστημονικής οπτικοποίησης.

Θεμελιώδη ρόλο στη δημιουργία των οπτικών αναπαραστάσεων παίζουν οι οπτικές μεταβλητές, δηλαδή οι μεταβολές των στοιχειωδών γραφικών στοιχείων που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τα δεδομένα, ή με άλλα λόγια να συμβολίσουν χαρακτηριστικά ή/και ιδιότητες του φαινομένου στο οποίο αναφέρονται τα δεδομένα. Οι οπτικές μεταβλητές εξακολουθούν με διάφορες προσθήκες να αποτελούν το θεμελιακό στοιχείο στο οποίο μπορεί να στηριχτεί οποιοδήποτε σύστημα δημιουργίας συμβόλων ή γραφικών (Morrison, 1984, MacEahren, 1994, Green, 1998).

Για να προσδιοριστεί η κατάλληλη τεχνική γεω-οπτικοποίησης (δηλ. οπτικοποίησης γεωγραφικών δεδομένων) πρέπει ο μελετητής να εξετάζει τον σκοπό της οπτικοποίησης, τον όγκο, τη μορφή και την ποιότητα της διαθέσιμης πληροφορίας, και να επιλέξει την κατάλληλη κλίμακα. Στην παρούσα μελέτη, επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα 3D Visual Nature Studio2 (3D_VNS2) για την τρισδιάστατη γεω-οπτικοποίηση μιας περιοχής ενδιαφέροντος στη Χερσόνησο Αμαλίας. Το 3D_VNS2 θεωρείται ένα ικανοποιητικό φωτο-ρεαλιστικό πακέτο λογισμικού για την απεικόνιση, το οποίο παρουσιάζει τις εξής ειδικές ιδιότητες: α) ενοποίηση με γεω-αναφερόμενα δεδομένα GIS, β) ευελιξία της εύρεσης του τύπου των χρήσεων γης χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη ecosystem & environment, γ) χρήση των αρχείων διανυσματικού ή κυψελιδωτού τύπου (raster ή vector) για την οριοθέτηση των περιοχών των χρήσεων γης και δ) ικανότητα τόσο της κίνησης όσο και της χρονολογικής σειράς.

3.7.1 Μεθοδολογία

Στο πλαίσιο της μελέτης, αρχικά, έλαβε χώρα μια έντονη προσπάθεια κατανόησης και χρησιμοποίησης των λειτουργιών του λογισμικού προγράμματος 3D Visual Nature Studio2 (3D_VNS2). Στη συνέχεια, έγινε επιλογή των επιπέδων πληροφορίας που θα απεικονίζονταν τρισδιάστατα, εξαιτίας της μεγάλης υπολογιστικής ισχύς που απαιτεί η διαδικασία. Ακολούθησε κατάλληλη επεξεργασία των διαθέσιμων γεωγραφικών πληροφοριών προκειμένου να μετατραπούν σε αντίστοιχες μορφές που απαιτεί το πρόγραμμα. Όλες οι παράμετροι του λογισμικού ρυθμίστηκαν στο μέγιστο βαθμό τους ώστε το αποτέλεσμα να αποδίδει όσο το δυνατόν καλύτερα την

βλάστηση και τη γεωμορφολογία της περιοχής. Αυτές οι διαδικασίες από τη φύση τους, είναι χρονοβόρες, αφού το λογισμικό ουσιαστικά δημιουργεί σε κάθε καρτέ, όλο το μοντέλο από την αρχή ώστε να ταιριάζει στις συγκεκριμένες ρυθμίσεις (εναλλαγή φως-σκοτάδι, αλλαγή κάμερας κ.ά.).

Το λογισμικό 3D Visual Nature Studio2 (3D_VNS2) που χρησιμοποιήθηκε για την τρισδιάστατη οπτικοποίηση χρήσεων γης και θάμνων θεωρείται ως το πιο κατάλληλο για την επεξεργασία τρισδιάστατων επιφανειών και καλύπτει ένα μεγάλο εύρος απαιτήσεων από το χρήστη:

α) *Κάμερες*: Ο χρήστης έχει στη διάθεσή του τρεις (3) κάμερες οι οποίες επιτρέπουν την επισκόπηση διαφορετικών γωνιών της τρισδιάστατης επιφάνειας. Η κύρια κάμερα (main camera) που βρίσκεται στη μέση του νοτίου τμήματος της επιφάνειας και καλύπτει την επιφάνεια από νότο προς βορρά, η κάμερα σκηνής (overhead) που δίνει τη συνολική εικόνα της περιοχής και η πλανημετρική (planimetric) που δίνει μία πανοραμική όψη, απεικονίζοντας στο βέλτιστο βαθμό σχέσεις χωρικής εγγύτητας αλλά δεν μπορεί να αποδώσει τη γεωμορφολογία του εδάφους (παρουσιάζει την περιοχή σα χάρτη). Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εστιάσει περισσότερο ή να αλλάξει τη γωνία θέασης, αλλάζοντας το ύψος και τη θέση της κύριας κάμερας (Εικόνα 4) .

β) *Τρισδιάστατα μοντέλα*: Το λογισμικό δίνει επιπλέον τη δυνατότητα επεξεργασίας της υψής του τρισδιάστατου μοντέλου, διαθέτοντας πλούσιες βιβλιοθήκες από τύπους εδαφών, περιβάλλοντος κλπ. Η επιλογή της υψής είναι μία υποκειμενική επιλογή και συνήθως εξαρτάται από το σκοπό της απεικόνισης και τις προτιμήσεις του χρήστη.

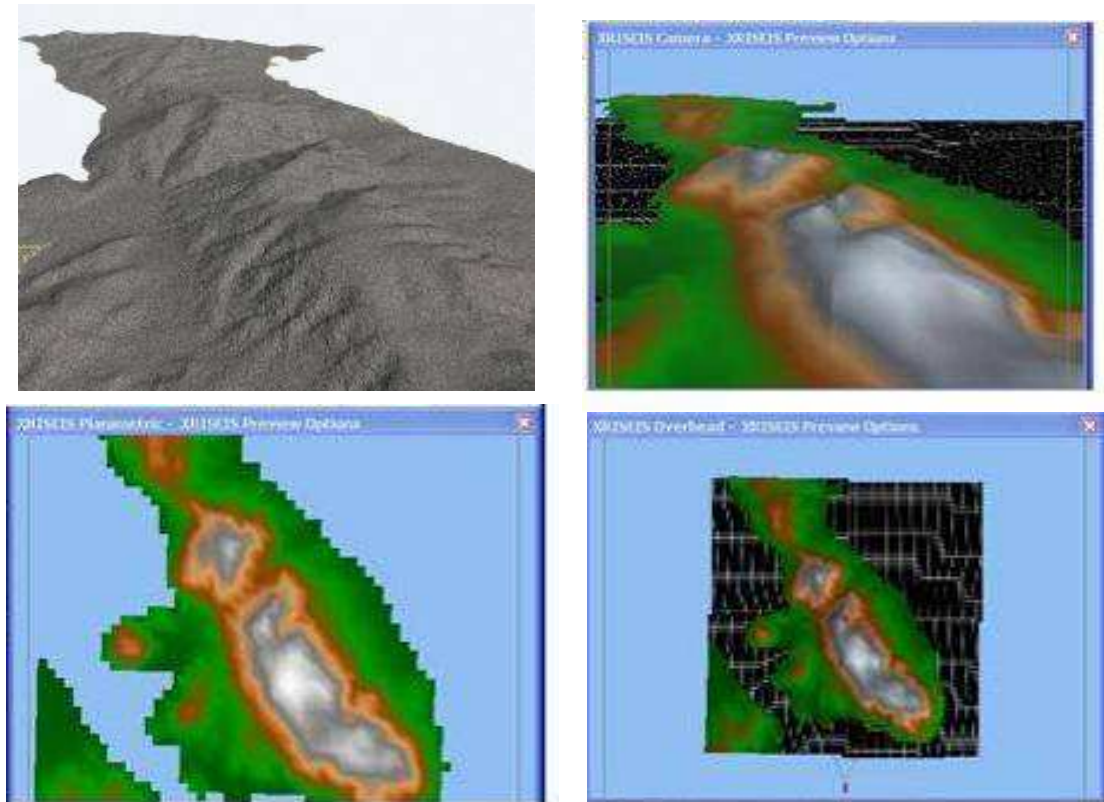
γ) *Ψηφιακό Μοντέλου Εδάφους (DEM)*: Το λογισμικό δίνει για το ψηφιακό μοντέλο εδάφους τη διχρωματική παλέτα από το πράσινο ως το καφέ, με δυνατότητες αλλαγής της παλέτας αλλά και του χρωματικού τόνου (hue) και κορεσμού (saturation). Δίνεται και η δυνατότητα για δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους.

δ) *επιπλέον λειτουργίες*: Η ένταση της φωτεινότητας, η ύπαρξη ή η απουσία συννεφιάς, η ύπαρξη νερού στο περιβάλλον του τρισδιάστατου μοντέλου είναι επιπλέον λειτουργίες που περιλαμβάνει το 3D_VNS2 (Visual Nature Studio, 2007).

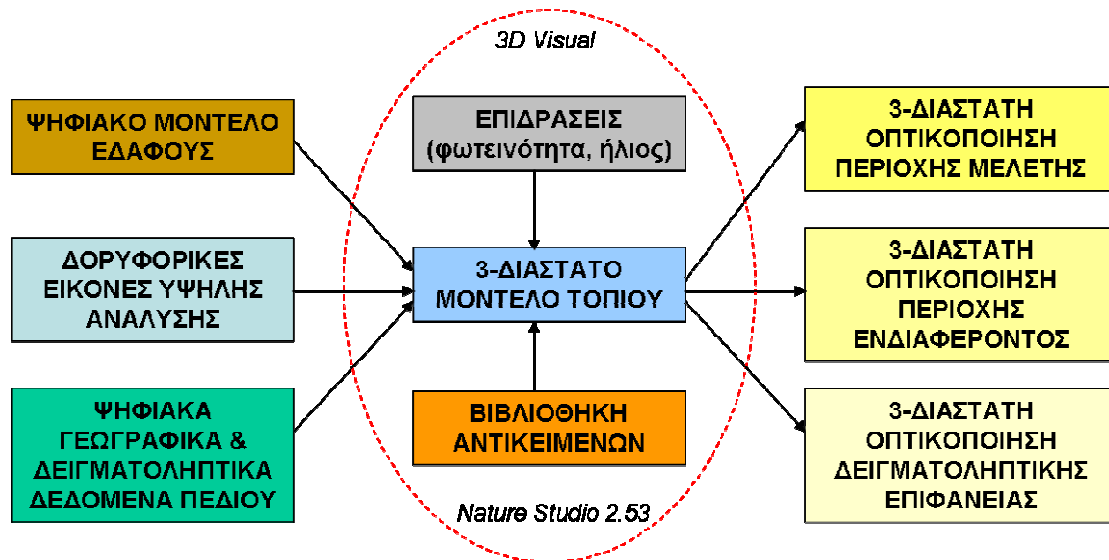
Συγκεκριμένα, η τρισδιάστατη γεω-οπτικοποίηση έλαβε χώρα σε τρεις χωρικές κλίμακες, προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος άντλησης των πληροφοριών που δίδει μια εργασία οπτικοποίησης:

- 1) περιοχή μελέτης (όλη η Χερσόνησος Αμαλής)
- 2) περιοχή ενδιαφέροντος (κορυφή Κουρτερή – 600 στρ. έκταση)
- 3) περιοχές δειγματοληψίας θάμνων (6x400 m²)

Τα μεθοδολογικά βήματα που ακολουθήθηκαν φαίνονται στο Σχήμα 27.



Εικόνα 4: Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους της περιοχής μελέτης από τις τρεις κάμερες του προγράμματος 3D_VNS2.

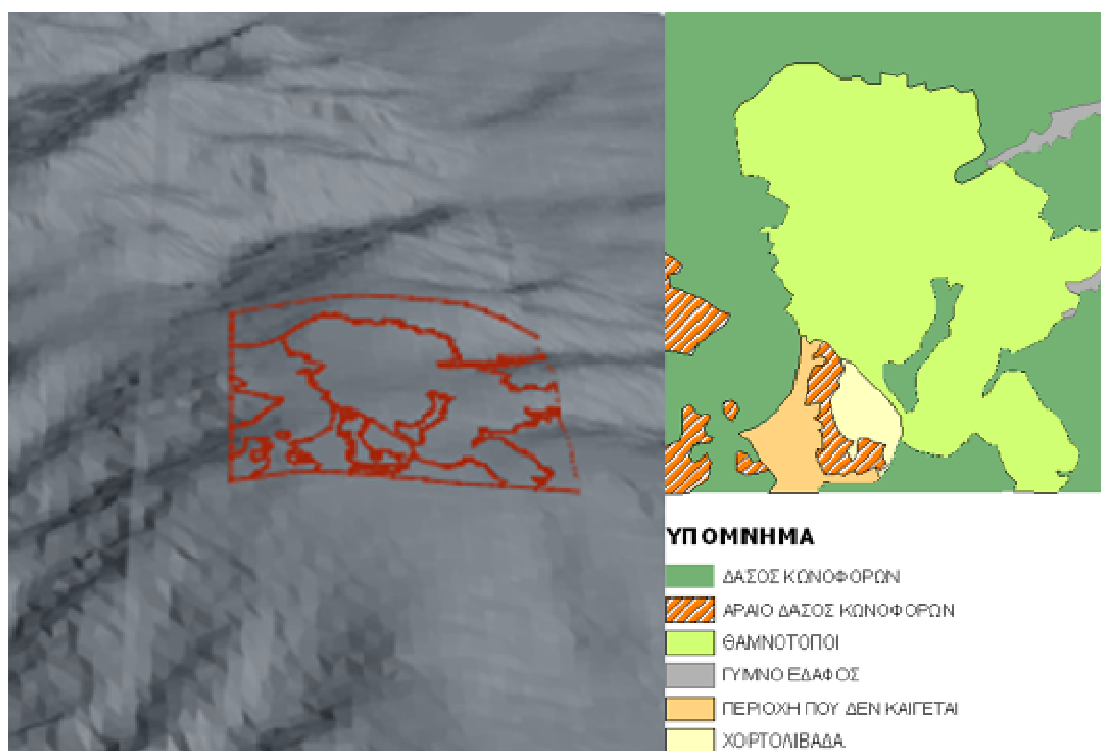


Σχήμα 27: Μεθοδολογία τρισδιάστατης απεικόνισης γεωγραφικών δεδομένων σε τρεις διαφορετικές κλίμακες.

Για την τρισδιάστατη οπτικοποίηση σε κλίμακα περιοχής μελέτης (Χερσόνησος Αμαλής) επιλέχθηκαν να απεικονιστούν το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης, τα μοντέλα καύσιμης ύλης, που προέκυψαν από ταξινόμηση δορυφορικής εικόνας χωρικής ανάλυσης 2.8 m και το οδικό δίκτυο. Τα μοντέλα καύσιμης ύλης και οι δρόμοι επιμερίστηκαν σε ξεχωριστά αρχεία (τύπου vector) και στην συνέχεια έγινε

αλλαγή του συστήματος αναφοράς τους από το ΕΓΣΑ '87 στο WGS 1984 Zone 35N για την καλύτερη επεξεργασία των δεδομένων. Ακολούθησε μετατροπή και ενοποίηση των δεδομένων και στη συνέχεια επιλογή οπτικής μεταβλητής για κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη του προγράμματος 3D_VNS2 (Environment, Ecosystems). Για την πιο ρεαλιστική απεικόνιση χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά χαρακτηριστικά της βλάστησης, όπως μέγιστο και ελάχιστο ύψος δέντρων, θάμνων, πυκνότητα, φυλλοτάπητα κ.α.

Για την τρισδιάστατη οπτικοποίηση σε κλίμακα περιοχής ενδιαφέροντος (κορυφή Κουρτερή, Χερσόνησος Αμαλής) επιλέχθηκαν να απεικονιστούν το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης και τα μοντέλα καύσιμης ύλης ή χρήσεις γης, σε μορφή vector, που προέκυψαν από ταξινόμηση διαζευγμένης δορυφορικής εικόνας χωρικής ανάλυσης 0.6 m (Η ψηφιοποίηση πραγματοποιήθηκε σε κλίμακα 1:1.000). Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους ανάλυσης 20x20 m χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του τοπίου ως το βασικό επίπεδο οπτικοποίησης (Εικόνα 5). Για κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης (δάσος κωνοφόρων, αραιό δάσος κωνοφόρων, θάμνοι, χόρτα, γυμνό έδαφος) δημιουργήθηκε ξεχωριστό οικοσύστημα, χρησιμοποιώντας τις βιβλιοθήκες του προγράμματος 3D_VNS2 και επιλέχθηκαν οι οπτικές μεταβλητές χρησιμοποιώντας επίσης πραγματικές τιμές χαρακτηριστικών της βλάστησης.



Εικόνα 5: Απεικόνιση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την οπτικοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος

Για την τρισδιάστατη οπτικοποίηση σε κλίμακα δειγματοληπτικής επιφάνειας με θάμνους, διαστάσεων 20x20m επιλέχθηκαν για απεικόνιση το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης και πραγματικές μετρήσεις αναφορικά με την κάλυψη και το ύψος των θάμνων. Στην περιοχή ενδιαφέροντος (κορυφή Κουρτερή, Χερσόνησος Αμαλής) εγκαταστάθηκαν τρεις δειγματοληπτικές επιφάνειες θάμνων, αντιπροσωπευτικών για την περιοχή, με κυρίαρχα είδη τα φρύγανα (*Cistus Spp*, *Sarcopoterium spinosum*) και τους αείφυλλους σκληρόφυλλους θάμνους (*Quercus infectoria*). Σε κάθε δειγματοληπτική επιφάνεια έγινε συλλογή δεδομένων (ύψος, πλάτος, πυκνότητα, είδος) με την άμεση μη-καταστροφική δειγματοληπτική διαδικασία (διατομές). Ειδικότερα, σε κάθε επιφάνεια διαστάσεων 20x20 m σχεδιάστηκαν τέσσερις

εγκάρσιες διατομές. Σε κάθε διατομή μετρήθηκε η αρχή και το τέλος του κάθε θάμνου, το είδος, το πλάτος και το μήκος του κάθε θάμνου, καθώς και το μέγιστο ύψος του θάμνου πάνω στη διατομή (Σχήμα 28).

Προκειμένου να οπτικοποιήσουμε τον κάθε θάμνο, το λογισμικό πρόγραμμα 3D_VNS2 απαιτούσε ο κάθε θάμνος να έχει γεωγραφική αναφορά. Έτσι, έγινε η παραδοχή το κέντρο του μήκους του θάμνου πάνω στη διατομή να αποτελέσει ένα σημείο που θα χαρακτηρίζει το κάθε θάμνο, σύμφωνα με την εξίσωση:

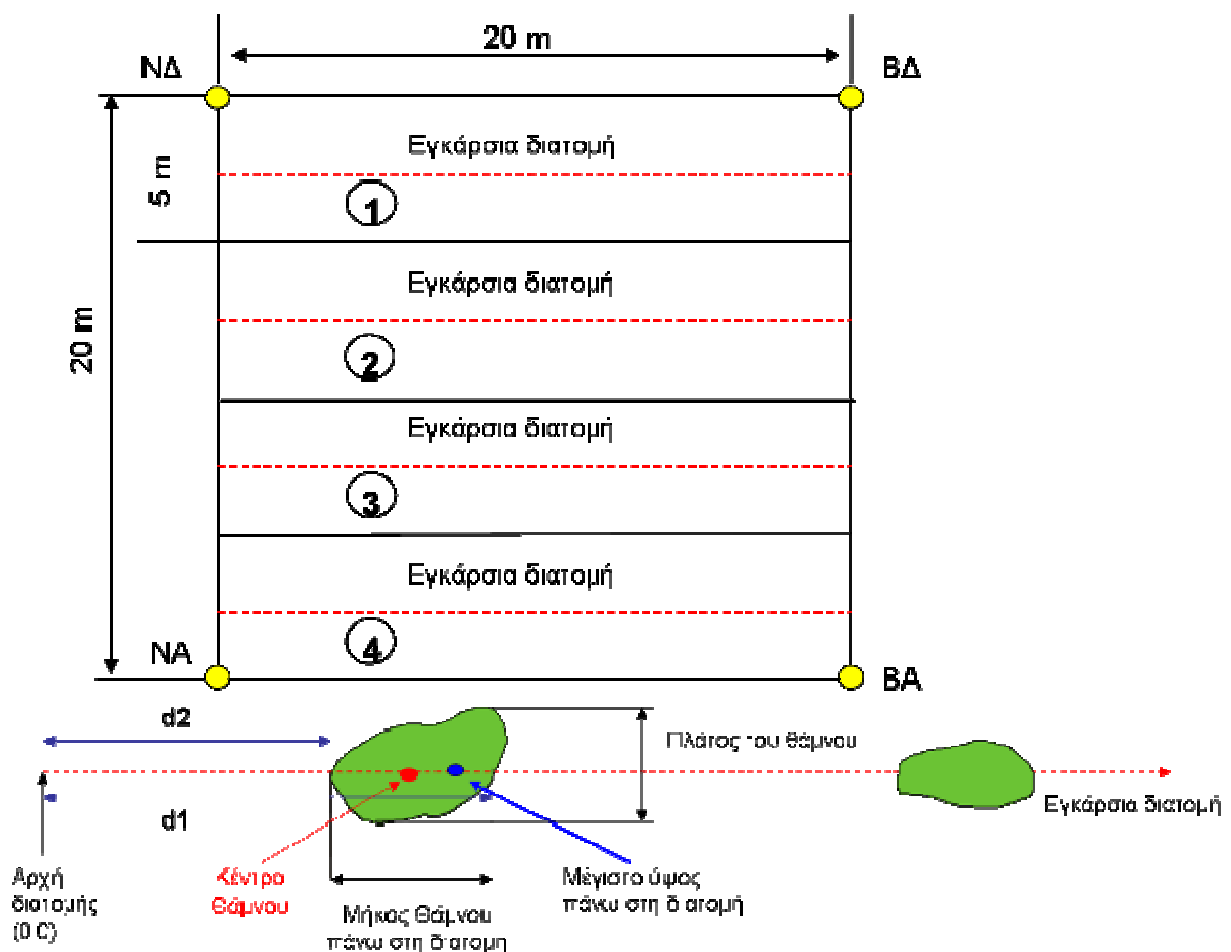
$$C_i = \left[\frac{(d_1 - d_2)}{2} + d_2 \right]$$

όπου,

C_i : το κέντρο κάθε θάμνου,

d_1 : η απόσταση του σημείου που αρχίζει η διατομή μέχρι το σημείο που τελειώνει το μήκος του κάθε θάμνου

d_2 : είναι η απόσταση του σημείου που αρχίζει η διατομή μέχρι το σημείο που αρχίζει ο κάθε θάμνος.



Σχήμα 28: Μεθοδολογία συλλογής δεδομένων θάμνου με άμεση μη-καταστροφική δειγματοληψία (Roussou et al., 2008)

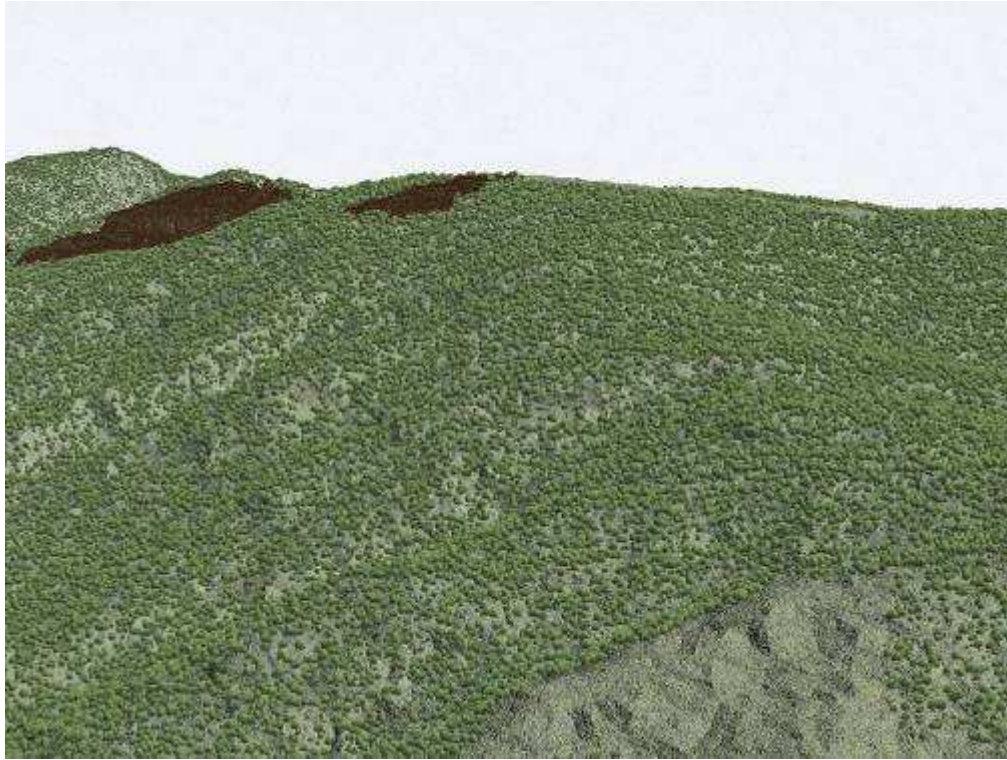
Στη συνέχεια, τα διαθέσιμα δεδομένα από τις μετρήσεις στο πεδίο επεξεργάστηκαν καταλλήλως και με τη βοήθεια του γραφιστικού προγράμματος AutoCAD και των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ArcMap) απέκτησαν χωρική αναφορά. Δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων (.dbf) που περιελάμβανε τις ιδιότητες του κάθε θάμνου, όπως κέντρο, μήκος, πλάτος, ύψος, είδος θάμνου), η οποία συνδυάστηκε με την χωρική αναφορά του κάθε θάμνου (.dxf). Έτσι, δημιουργήθηκε μια θεματική επιφάνεια (.shp) που περιλάμβανε όλη την απαιτούμενη χωρική και περιγραφική πληροφορία για την αξιόπιστη και όσο το δυνατό πιο ρεαλιστική τρισδιάστατη απεικόνιση του κάθε θάμνου σε κάθε εγκάρσια διατομή. Για κάθε είδος θάμνου (*Cistus Spp.*, *Quercus infectoria*, *Sarcopoterium spinosum*, *Phillyrea media*) δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα 3D_VNS2 ένα αντίστοιχο σύμπλεγμα (Foliage group). Τέλος, για κάθε θάμνο επιλέχθηκε μια οπτική μεταβλητή που ταιριάζει στην ρεαλιστική οπτική απεικόνιση του κάθε είδους θάμνου.

3.7.2 Αποτελέσματα - Συμπεράσματα

Η τρισδιάστατη οπτικοποίηση της περιοχής μελέτης, σε μικρή χωρική κλίμακα απεικονίζεται στην Εικόνα 6. Όσο αυξάνεται η χωρική κλίμακα είναι δυνατή η καλύτερη παρατήρηση της βλάστησης, των χρήσεων γης, αλλά και του ανάγλυφου της περιοχής (Εικόνες 7-13). Οι οπτικές μεταβλητές των ειδών βλάστησης ή χρήσεων γης επιλέχθηκαν από την βιβλιοθήκη του προγράμματος, έτσι ώστε να προσεγγίζουν όσο το δυνατό περισσότερο τις πραγματικές. Χαρακτηριστικά, δημιουργήθηκε μια νέα οπτική μεταβλητή για την πιο ρεαλιστική τρισδιάστατη απεικόνιση των ελαιώνων (Εικόνες 12 και 13).



Εικόνα 6: Οπτικοποίηση της Χερσονήσου Αμαλής από μεγάλο υψόμετρο



Εικόνα 7: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση τμήματος της περιοχής μελέτης



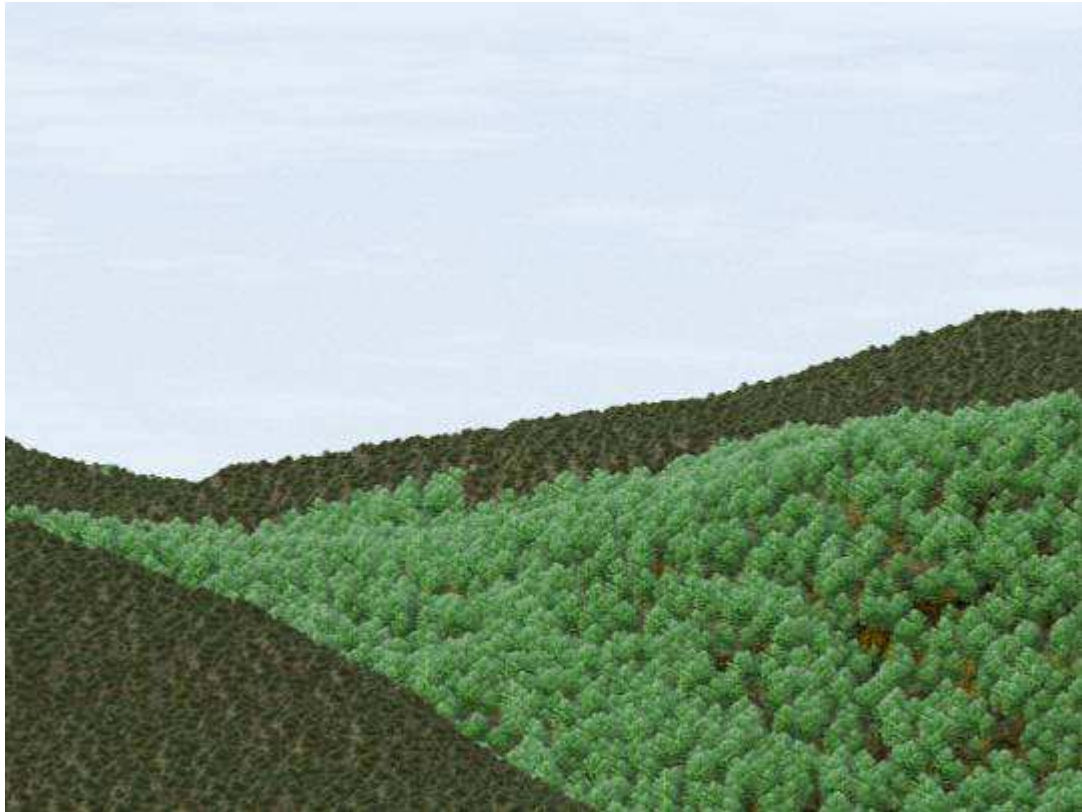
Εικόνα 8: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση εναλλαγής διαφορετικών χρήσεων γης



Εικόνα 9: Απεικόνιση αστικής περιοχής με κύριο και δευτερεύον οδικό δίκτυο



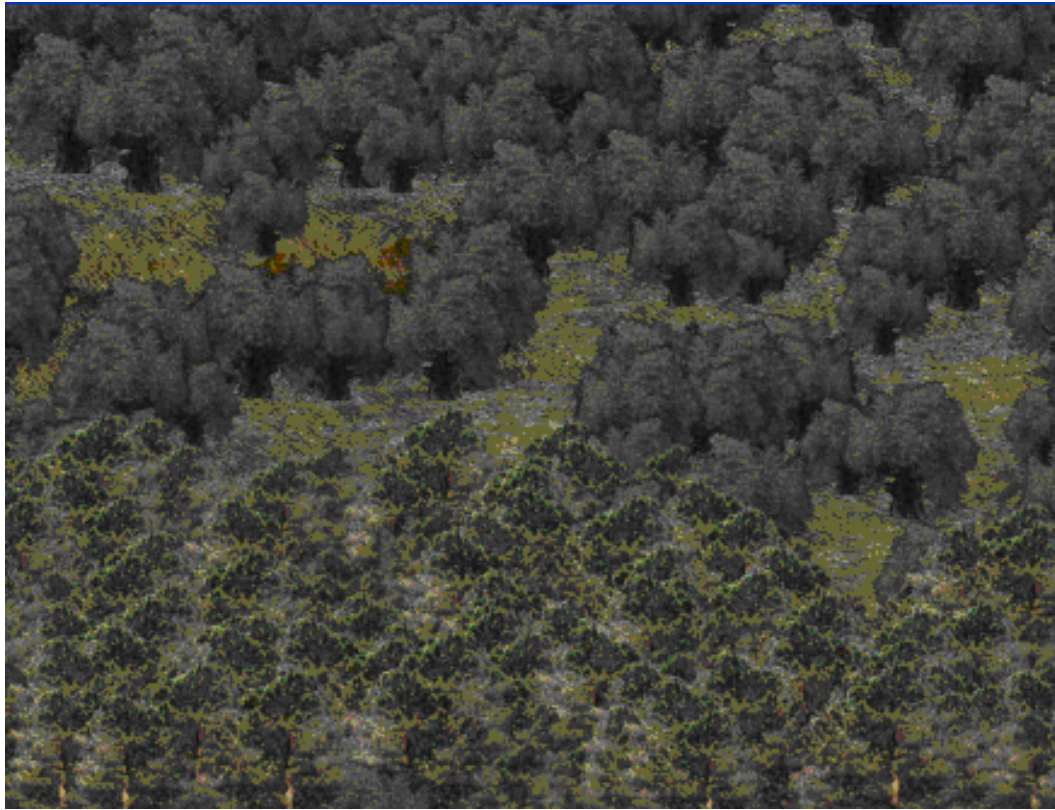
Εικόνα 10: Απεικόνιση αραιού δάσους κωνοφόρων με δασικούς δρόμους



Εικόνα 11: Τρισδιάστατη απεικόνιση εναλλαγής αραιού -πυκνού δάσους κωνοφόρων



Εικόνα 12: Απεικόνιση ελαιώνα



Εικόνα 13: Τρισδιάστατη απεικόνιση εναλλαγής ελαιώνα με δάσος κωνοφόρων

Για το καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα της απεικόνισης έγινε επιλογή των χαρακτηριστικών των δένδρων (π.χ. μέγιστο και ελάχιστο ύψος, πυκνότητα) κάτι που οδηγεί σε πληροφορίες πολύ κοντά στις πραγματικές για την χλωρίδα της περιοχής, ιδιαίτερα όταν η οπτικοποίηση γίνεται σε μεγάλες χωρικές κλίμακες.

Κατά την επεξεργασία των δεδομένων διαπιστώθηκαν τα εξής προβλήματα:

- Η διαφορά κλίμακας στην οποία έχουν ψηφιοποιηθεί τα δεδομένα αποτελούν έναν ακόμη ανασταλτικό παράγοντα για την ακριβή απεικόνιση της γήινης επιφάνειας. Τα δεδομένα τύπου vector (όπως χρήσεις γης, οδικό δίκτυο) δεν εφαρμόζονται με ακρίβεια στο αρχείο του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (Ψ.Μ.Ε.) καθώς το δεύτερο προήλθε από ψηφιοποίηση της περιοχής στο παρελθόν (ανάλυση 30x30m).
- Το Ψ.Μ.Ε. της περιοχής μελέτης με την θάλασσα δεν ήταν ικανοποιητικό, καθώς η στάθμη της θάλασσας ήταν πάνω από το μηδέν. Οι όποιες παρεμβάσεις έγιναν για να ξεπεραστεί το πρόβλημα δεν ήταν ικανοποιητικές.
- Στις μεγάλες κλίμακες, η μορφολογία του εδάφους παρουσίαζε έντονες κλίσεις, απότομες γωνίες και ακμές. Έγινε κατάλληλη παρέμβαση στο λογισμικό προκειμένου να εξομαλυνθεί η επιφάνεια του εδάφους, αλλά παράλληλα να αλλάζουν και οι πληροφορίες για την πραγματική εικόνα του φυσικού ανάγλυφου.

Η εικονική πτήση δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να αντιλαμβάνεται καλύτερα μια περιοχή καθώς μπορεί να εναλλάσσεται από μικρές σε μεγάλες χωρικές κλίμακες. Ανάλογα με τη διεργασία ή το φαινόμενο που επιλέγεται να περιγραφεί, καθορίζεται ο σκοπός της τρισδιάστατης οπτικοποίησης και εξετάζοντας φυσικά τη ποιότητα της διαθέσιμης πληροφορίας, δίνονται οι προδιαγραφές για τη δημιουργία εικονικής πτήσης. Έτσι, δημιουργήθηκαν δύο εικονικές πτήσεις με τη μορφή βίντεο πάνω από την περιοχή ενδιαφέροντος, Χερσόνησος Αμαλής Ν. Λέσβου χρησιμοποιώντας το λογισμικό πρόγραμμα 3D Visual Nature Studio2 (3D_VNS). Το πρώτο βίντεο (ANIM_1 PANO) διαρκεί 44 δευτερόλεπτα, ξεκινάει από ύψος 2.650m και καταλήγει σε ύψος 500m. Για τη δημιουργία του απαιτήθηκαν 1100 καρέ, περίπου 75 ώρες επεξεργασίας (rendering) με ρυθμό αναπαραγωγής 25 καρέ ανά δευτερόλεπτο. Η ταχύτητα της κάμερας είναι 200m/sec και αναπαριστά την πτήση ενός μικρού αεροπλάνου. Το δεύτερο βίντεο (ANIM_1 KATO) διαρκεί 60 δευτερόλεπτα, ξεκινάει από ύψος 200m και καταλήγει σε ύψος 60m. Για τη δημιουργία του απαιτήθηκαν 1500 καρέ, περίπου 100 ώρες επεξεργασίας (rendering) με ρυθμό αναπαραγωγής επίσης 25 καρέ ανά δευτερόλεπτο. Η ταχύτητα της κάμερας είναι 60m/sec και αναπαριστά την πτήση ενός αετού (Eagle). Τα τελικά αποτελέσματα των εικονικών πτήσεων μέσω του 3D_VNS επισυνάπτονται ηλεκτρονικά.

Ένα από τα μειονεκτήματα των προγραμμάτων τρισδιάστατης απεικόνισης της πραγματικότητας αποτελεί η επεξεργασία των δεδομένων. Ο όγκος των δεδομένων είναι μεγάλος με αποτέλεσμα τα λογισμικά να δυσκολεύονται να πραγματοποιήσουν την οπτικοποίηση σε πολύ υψηλή ανάλυση. Όταν τελικά αυτό μπορεί να επιτευχθεί απαιτείται πάρα πολύς χρόνος. Η διαδικασία rendering διαρκεί περίπου 4 λεπτά για κάθε καρέ. Το σύνολο αυτών είναι 2600, δηλαδή χρειάστηκαν περίπου 10400 λεπτά ή 174 ώρες συνεχούς επεξεργασίας των δεδομένων χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι δοκιμές αλλά και οι πρώτες διαδικασίες επεξεργασίας για την οπτικοποίηση της κάθε οπτικής μεταβλητής, όπως στους θάμνους.

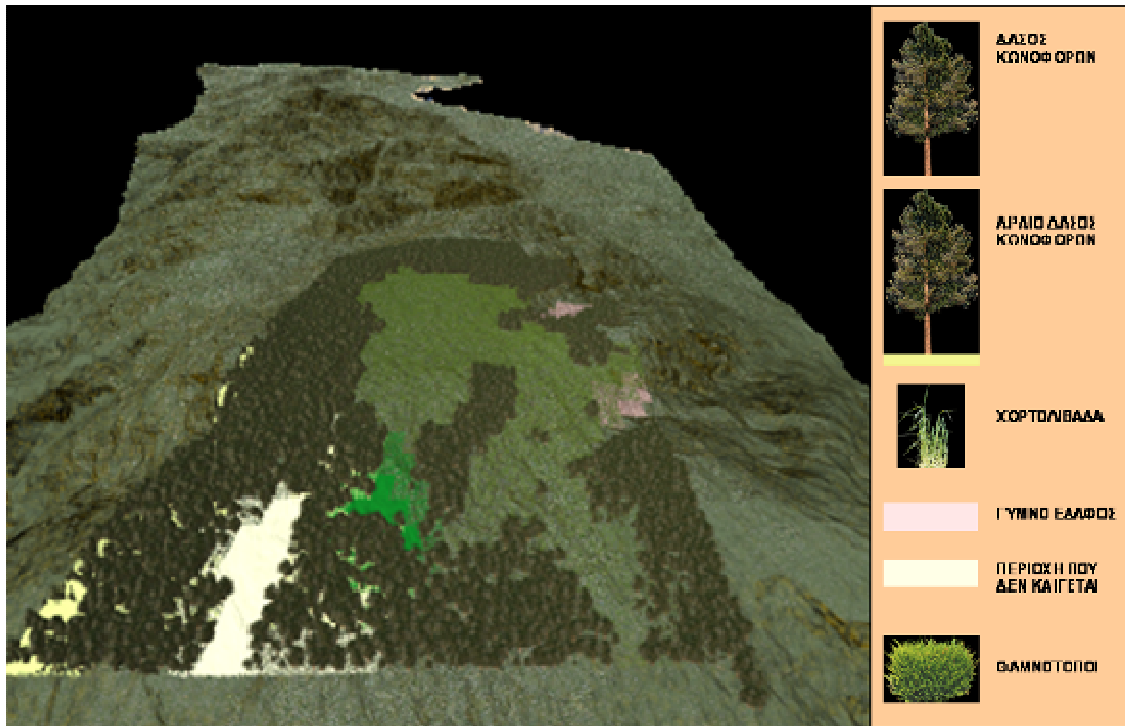
Επιπρόσθετα, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ArcScene χαράχθηκε μία πορεία εικονικής πτήσης η οποία ακολουθήθηκε δύο φορές χρησιμοποιώντας διαφορετικής χωρικής ανάλυσης δεδομένα. Συγκεκριμένα, για τη δημιουργία του τρίτου συνολικά βίντεο χρησιμοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους και η δορυφορική εικόνα QuickBird διακριτικής ικανότητας 2.8m, ενώ στο τέταρτο συνολικά βίντεο χρησιμοποιήθηκε το Ψ.Μ.Ε. και η δορυφορική εικόνα QuickBird διακριτικής ικανότητας 0.6m. Τα τελικά αποτελέσματα των εικονικών πτήσεων μέσω του ArcScene επισυνάπτονται επίσης ηλεκτρονικά.

Η περιοχή ενδιαφέροντος στην κορυφή “Κουρτερή” της Χερσονήσου Αμαλής έχει έκταση 600 στρεμμάτων και αποτελεί μια μικρογραφία της περιοχής μελέτης (Χάρτης 15). Η βλάστηση της χαρακτηρίζεται από αραιό και πυκνό δάσος κωνοφόρων, αείφυλλους σκληρόφυλλους θάμνους, χορτολίβαδα, γυμνό έδαφος και μια περιοχή που δεν επιδέχεται καύση.

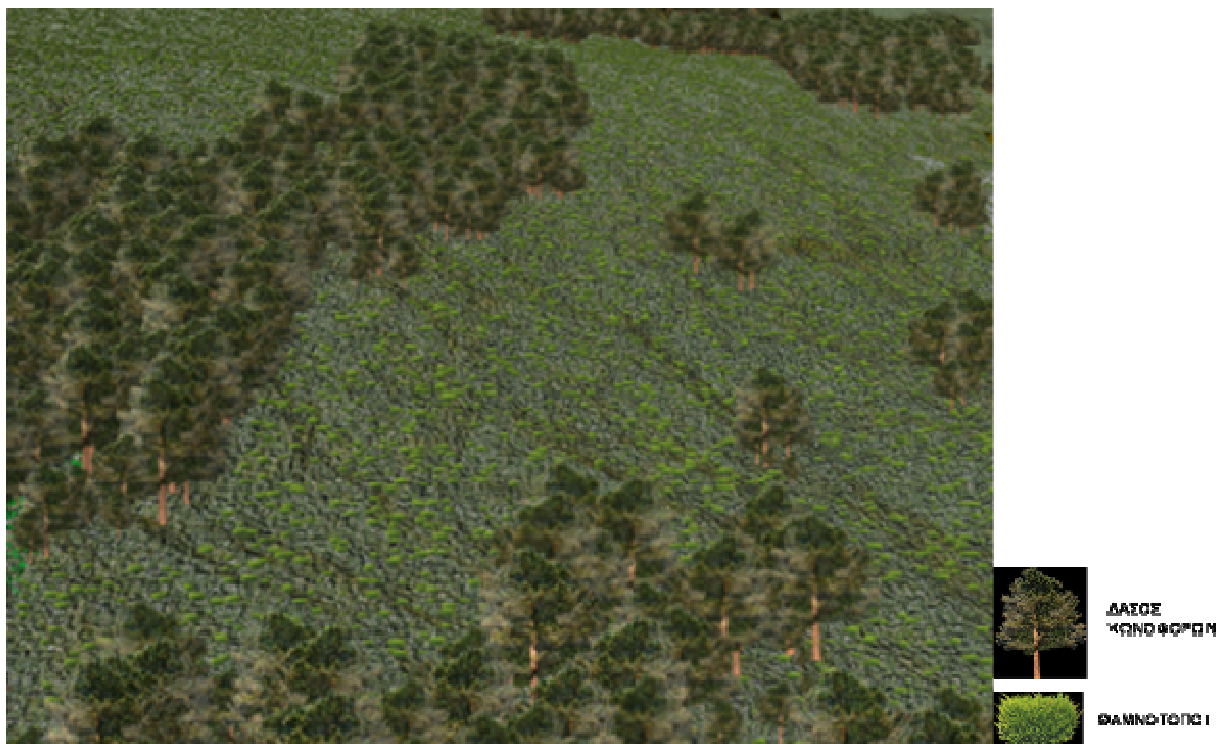


Χάρτης 15: Περιοχή ενδιαφέροντος στην κορυφή “Κουρτερή” Χερ/σου Αμαλής

Τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης οπτικοποίησης των χρήσεων γης απεικονίζονται στις ακόλουθες εικόνες:



Εικόνα 14: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση χρήσεων γης στην κορυφή “Κουρτερή”



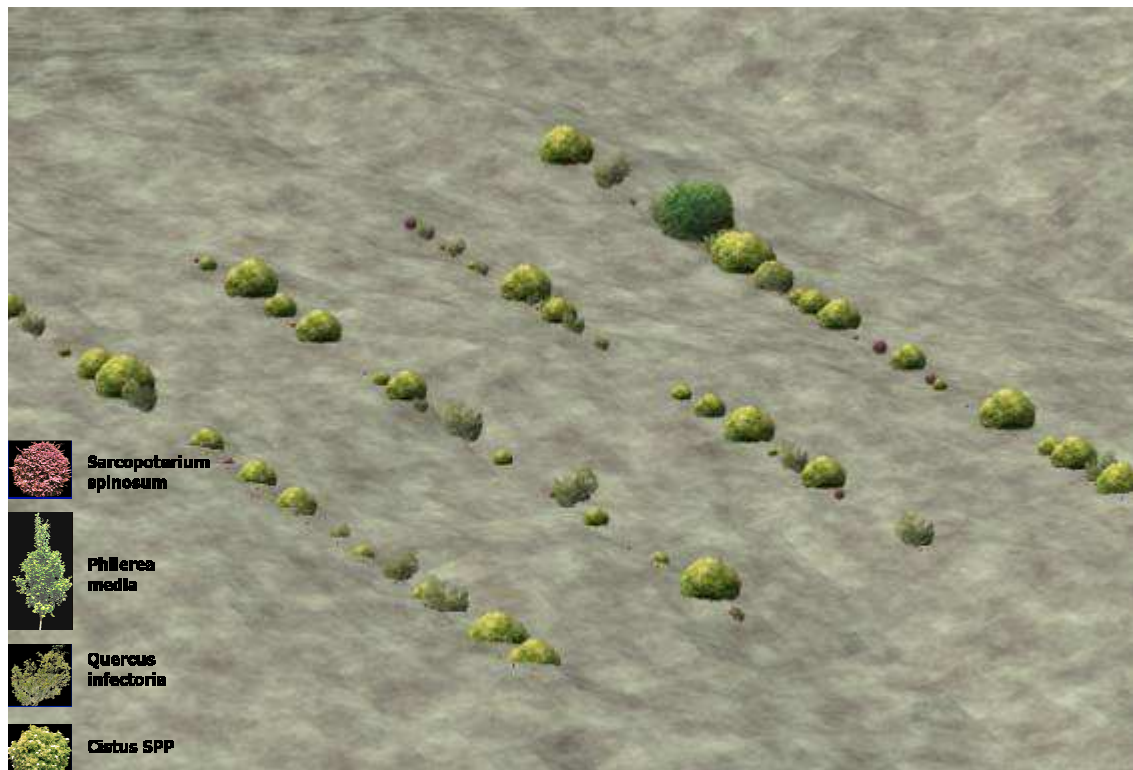
Εικόνα 15: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση χρήσεων γης στην κορυφή “Κουρτερή”, σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα

Σε κλίμακα περιοχής δειγματοληψίας, αρχικά το αποτέλεσμα της τρισδιάστατης οπτικοποίησης απέιχε από την πραγματικότητα κατά πολύ, καθώς απεικονίζονταν το έδαφος με τη μορφή απότομων τετραγωνισμένων γωνιών. Κρίθηκε λοιπόν αναγκαία η χρησιμοποίηση ειδικών ρυθμίσεων για την εξομάλυνση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους έτσι ώστε το έδαφος να είναι αντιπροσωπευτικό της πραγματικότητας.

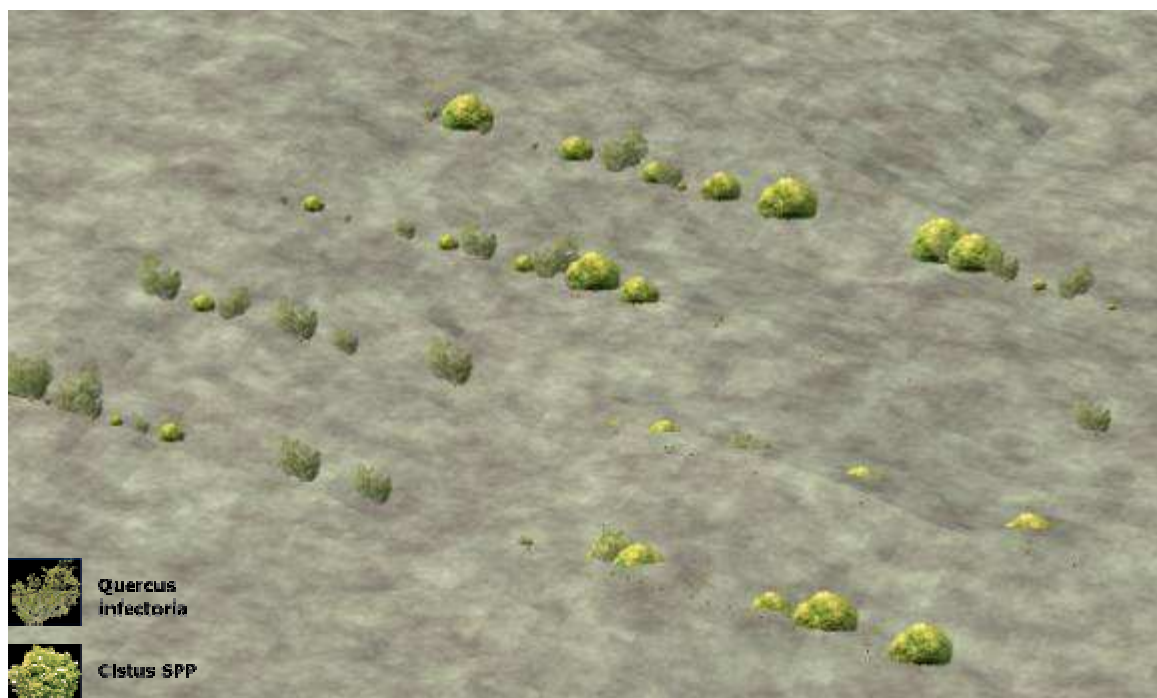
Στη συνέχεια απεικονίζονται τα αποτελέσματα της τρισδιάστατης οπτικοποίησης στις έξι περιοχές δειγματοληψίας θάμνων (Χάρτης 12 και 15, Εικόνες 16-21).



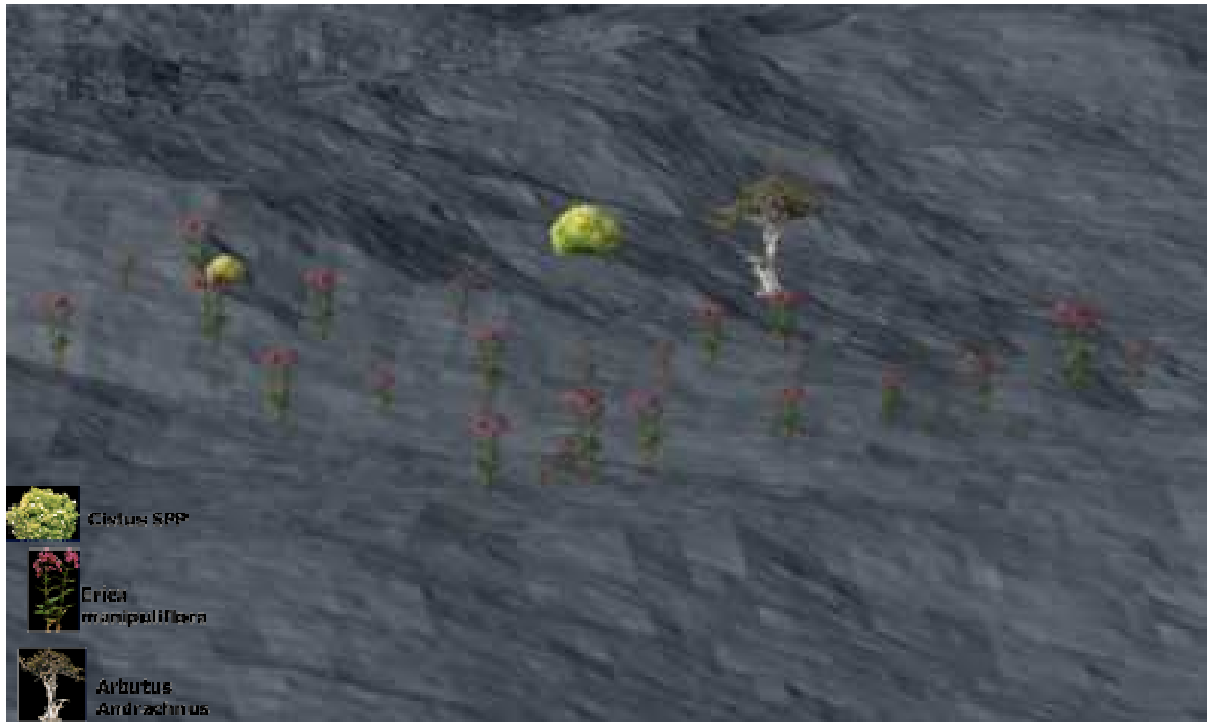
Εικόνα 16: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 1)



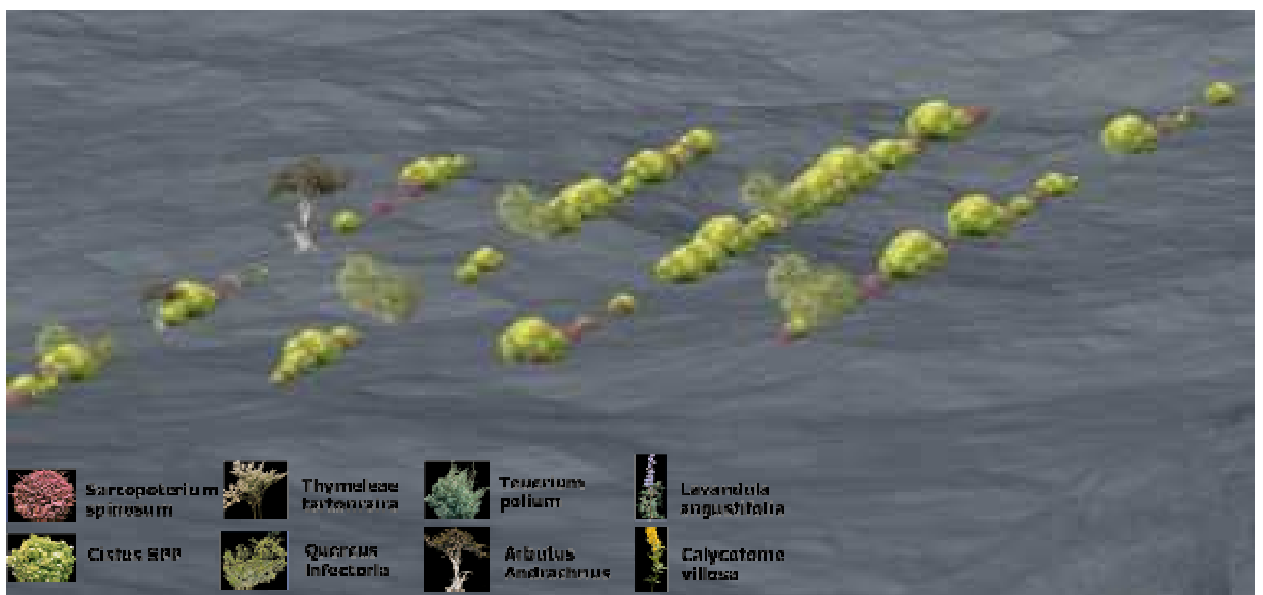
Εικόνα 17: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 2)



Εικόνα 18: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 3)



Εικόνα 19: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 4)



Εικόνα 20: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 5)



Εικόνα 21: Τρισδιάστατη οπτικοποίηση θάμνων σε εγκάρσιες διατομές (Δειγματοληπτική επιφάνεια 6)

Σκοπός της τρισδιάστατης απεικόνισης σε επίπεδο δειγματοληπτικής επιφάνειας ήταν η προσομοίωση της κατανομής της βλάστησης, μετατρέποντας δεδομένα που συλλέχθηκαν με έμμεση δειγματοληπτική διαδικασία (εγκάρσιες διατομές) σε ακριβή πληροφορία των χαρακτηριστικών της καύσιμης ύλης σε επίπεδο φυτού. Η πληροφορία που απεικονίζεται τρισδιάστατα είναι σύνθεση ειδών, δομή (ύψος, πλάτος, μήκος), οριζόντια διάταξη και συνέχεια των συμπλεγμάτων βλάστησης. Οι παραγόμενες εικόνες είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακριβής και λεπτομερής πληροφορία για την καύσιμη ύλη και την κατανομή της σε μια δασική περιοχή αποτελεί το πιο σημαντικό στοιχείο στην πραγματική εκτίμηση της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς και την πρόβλεψη και την αποτελεσματική λήψη μέτρων καταστολής αυτής.

Η τρισδιάστατη απεικόνιση ως εργαλείο της γεωπληροφορικής συνεισφέρει στην καλύτερη κατανόηση της δομής και της χωρικής κατανομής της βλάστησης από το χρήστη, δίνοντας μια φωτο-ρεαλιστική απεικόνιση του περιβάλλοντος χώρου σε διάφορες κλίμακες. Με τον τρόπο αυτό, η οπτικοποίηση γεωγραφικών δεδομένων μπορεί να βοηθήσει τον χρήστη να καταλάβει και να εξοικειωθεί με την κατανομή των ειδών βλάστησης σε μια δασική περιοχή, ακόμα και αν δεν κατέχει ιδιαίτερες επιστημονικές γνώσεις ή δεν γνωρίζει την περιοχή.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης έχει ουσιαστική σημασία για τη διαχείριση πυρκαγιών, ιδιαίτερα για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας μιας πυρκαγιάς, του κινδύνου εμφάνισής της καθώς και για την προσομοίωση της εξάπλωσης της (μήκος φλόγας, ταχύτητα διάδοσης, θερμική ένταση του μετώπου κ.α.) στο χώρο. Για την περιοχή μελέτης, τη Χερσόνησο Αμαλής, Ν. Λέσβο, δημιουργήθηκαν χάρτες που περιέχουν την πιο ενημερωμένη και λεπτομερή πληροφορία σε τοπογραφία, χρήσεις γης, οδικό δίκτυο και υποδομές. Ένας από τους σημαντικότερους χάρτες στην διαχείριση ενός δασικού οικοσυστήματος είναι ο χάρτης των μοντέλων καύσιμης ύλης που απαντώνται στην περιοχή. Η επεξεργασία δορυφορικών εικόνων υψηλής διακριτικής ικανότητας και χωρικής ανάλυσης σε συνδυασμό με χρήσεις γης και εντατική επιτόπια έρευνα στη περιοχή συνέβαλαν στην καταγραφή των συμπλεγμάτων καύσιμης ύλης και την μοντελοποίησή τους.

Η κλασική έντυπη μορφή του χάρτη αποτελεί το πλέον διαδεδομένο και οικείο εργαλείο καθώς παρουσιάζει πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα που δεν υπάρχουν στα σύγχρονα συστήματα γεωπληροφορικής. Οι έντυποι χάρτες είναι απλοί στη χρήση τους, μπορούν να αναπαραχθούν εύκολα σε πολλά αντίτυπα, δεν χρειάζονται συντήρηση, δεν απαιτούν ενέργεια για να λειτουργήσουν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα και η επεξεργασία και ενημέρωσή τους δεν είναι χρονοβόρες διαδικασίες. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το κοινό και το προσωπικό που δεν έχει εξειδίκευση για μια περιοχή, ενώ παράλληλα εξοικειώνουν σε κάποιο βαθμό τους χρήστες με τα σύγχρονα εργαλεία γεωπληροφορικής.

Η κατανόηση και η πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς απαιτεί την ποσοτική εκτίμηση της καύσιμης ύλης. Η γνώση του φορτίου ή βιομάζα της επίγειας και εναέριας καύσιμης ύλης αποτελεί τον παράγοντα που παίζει καθοριστικό ρόλο πριν, κατά και μετά την έναρξη μιας πυρκαγιάς σε μια δασική έκταση. Χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέχθηκαν στο πεδίο τόσο σε δέντρα όσο και σε θάμνους πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης με το στατιστικό πακέτο SPSS. Αλλομετρικές εξισώσεις δημιουργήθηκαν για την εκτίμηση της βιομάζας κόμης δέντρων Τραχείας Πεύκης με ανεξάρτητες μεταβλητές τη σθηθιαία διάμετρο, το ύψος των δέντρων και τις παραμέτρους κλαδιών (πλάτος, μήκος, διάμετρος). Από τις εξισώσεις αυτές προέκυψε ότι μετρώντας τη σθηθιαία διάμετρο ενός δέντρου τραχείας Πεύκης μπορεί να εκτιμηθεί κατά 98,3% η βιομάζα της κόμης και κατά 92% η συνολική βιομάζα του δέντρου, για δέντρα που η σθηθιαία διάμετρος κυμαίνεται από 9,75 έως 29,3cm. Επιπλέον, η βιομάζα της κόμης μπορεί να εκτιμηθεί κατά 80,7% γνωρίζοντας το ύψος ενός δέντρου Τραχείας Πεύκης, αρκεί το ύψος του δέντρου να κυμαίνεται από 6,9 έως 13,55m. Καλό είναι να γίνει κάποια επαλήθευση με επιπλέον δεδομένα Τραχείας Πεύκης προτού χρησιμοποιηθούν οι συναρτήσεις επιχειρησιακά για σκοπούς διαχείρισης δασικών περιοχών. Αντίστοιχα, στην περίπτωση των θάμνων (φρύγανα και αείφυλλα σκληρόφυλλα) προέκυψε ότι μετρώντας το ύψος των θάμνων μπορεί να εκτιμηθεί η “ενεργή” βιομάζα της καύσιμης ύλης κατά 70,8%, η ζωντανή βιομάζα των θάμνων κατά 87,6% και η συνολική βιομάζα κατά 77,9%. Το εύρος του ύψους των θάμνων που μπορούν να εφαρμοστούν οι αλλομετρικές αυτές εξισώσεις είναι από 8 - 92cm. Από πλευράς στατιστικών μεθόδων, οι αλλομετρικές εξισώσεις εκτίμησης βιομάζας των θάμνων είναι αποδεκτές. Προκειμένου όμως οι εξισώσεις αυτές να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν επιχειρησιακά, θα πρέπει να μεγαλώσει το μέγεθος του δείγματος, με δεδομένα είτε της περιοχής μελέτης είτε από άλλες περιοχές της Ελλάδας χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία δειγματοληψίας, και να επιβεβαιωθεί ή να βελτιωθεί ο συντελεστής προσδιορισμού.

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση αποτελεί αποτελεσματικό και χρήσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και σημαντική πηγή γεωπληροφοριών. Τα διαθέσιμα τηλεπισκοπικά δεδομένα με την αυξημένη φασματική και χωρική τους

διακριτική ικανότητα παρέχουν τη δυνατότητα για παρακολούθηση φαινομένων/ διαταραχών και συνεισφέρουν σε ένα πλήθος εφαρμογών, μία από τις οποίες είναι και τα δασικά οικοσυστήματα. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης (QuickBird 0.6m) και δεδομένα πεδίου που αφορούν χαρακτηριστικά καύσιμης ύλης/ βλάστησης προκειμένου να ανιχνευτεί αν υπάρχει δυνατότητα εκτίμησης της βιομάζας της καύσιμης ύλης μέσω του Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης NDVI (Normalised Difference Vegetation Index). Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε έδωσε μια εκτίμηση της βιομάζας μέσω δορυφορικών εικόνων η οποία χρειάζεται να επαληθευτεί με δεδομένα πεδίου μελλοντικά ή και να μελετηθεί η εφαρμογή της σε άλλες περιοχές της χώρας όπου υπάρχουν διαθέσιμα τα κατάλληλα δεδομένα (υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες, δειγματοληψίες δέντρων τραχείας Πεύκης και γνώση της ακριβούς γεωγραφικής θέσης του δέντρου κοπής).

Η εμφάνιση και εξάπλωση μιας πυρκαγιάς συσχετίζεται με τη μορφολογία (ύψος, πυκνότητα), την ευφλεκτικότητα, την περιεχόμενη υγρασία και την ποσότητα της καύσιμης ύλης. Στα Μεσογειακού τύπου οικοσυστήματα, η φωτιά εξαπλώνεται κατά γενική ομολογία μέσω θάμνων, που εμφανίζονται είτε ως θαμνότοποι είτε ως υπόροφος δέντρων, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, όταν οι θάμνοι έχουν χαμηλή περιεχόμενη υγρασία και είναι πιο εύφλεκτοι. Η διαδικασία της δημιουργίας τοπικών μοντέλων συνιστάται όταν επιτρέπεται από τα χρονικά και οικονομικά περιθώρια, όπως σε περιπτώσεις προγραμμάτων μείωσης της καύσιμης ύλης, προ-διαγεγραμμένο κάψιμο κτλ. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης αναπτύχθηκε ένα τοπικό μοντέλο που ανταποκρίνεται στις συνθήκες της περιοχής της Κρατήγους και γενικότερα της Ελλάδας. Το επίτευγμα αυτό είναι σημαντικό καθώς μπορεί να γίνει πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς, που να πλησιάζει σημαντικά στην πραγματικότητα, λαμβάνοντας υπόψη φυσικά την τοπογραφία (κλίση) και τις μετεωρολογικές συνθήκες του σημείου εκδήλωσης πυρκαγιάς. Βέβαια είναι σημαντικό να δημιουργηθεί ένας ολοκληρωμένος κατάλογος τοπικών μοντέλων καύσιμης, αλλά απαιτείται να γίνουν επιπλέον δειγματοληπτικές εργασίες. Συνεπώς, η μοντελοποίηση της καύσιμης ύλης αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την υποστήριξη αποφάσεων όσον αφορά την πρόληψη και την καταστολή δασικών πυρκαγιών.

Η πρόβλεψη της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών αποτελεί ένα από τα πολυτιμότερα βοηθήματα σε πραγματικές επιχειρήσεις καταστολής (άμεση εκτίμηση μεγέθους, ταχύτητας και έντασης πυρκαγιάς), στον προληπτικό σχεδιασμό (εκπαίδευση προσωπικού και σχεδιασμό αντιμετώπισής της) και στη γενικότερη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών (εκτίμηση κινδύνου, διαχείριση καύσιμη ύλης κ.α.). Τα δύο ευρέως διαδεδομένα εργαλεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την στατική όσο και για την χωρική προσομοίωση της συμπεριφοράς και εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς είναι το BehavePlus v.3 και το FARSITE αντίστοιχα. Αποτελούν πολύ σημαντικά εργαλεία για την Πυροσβεστική και τη Δασική Υπηρεσία που εμπλέκονται με τη διαχείριση των πυρκαγιών. Η συγκέντρωση των απαραίτητων δεδομένων για το FARSITE είναι μια επίπονη και δύσκολη διαδικασία, απαιτείται εξειδικευμένη γνώση στα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, τη δασολογία και τη γεωγραφία. Η υποστήριξη των Σ.Γ.Π. είναι απαραίτητη τόσο για τη δημιουργία, μετατροπή και διαχείριση των εισερχόμενων χωρικών δεδομένων όσο και στην επεξεργασία - παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Για την αξιοποίηση των δυνατοτήτων των προγραμμάτων πρόβλεψης συμπεριφοράς και εξάπλωσης πυρκαγιών κρίνεται αναγκαία η ανάπτυξη μιας βάσης ψηφιακών δεδομένων, κάτι στο οποίο πρέπει να συγκλίνουν οι περισσότεροι φορείς.

Η τρισδιάστατη οπτικοποίηση αποτελεί χρήσιμο εργαλείο της γεωπληροφορικής που ενσωματώνει υψηλής ανάλυσης δορυφορικές εικόνες, συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών και δεδομένα από μετρήσεις στο πεδίο που συλλέγονται κάθε χρόνο από τις διάφορες υπηρεσίες. Σε περιοχές μεγάλης έκτασης και μικρής χωρικής

κλίμακας, η δισδιάστατη απεικόνιση των γεωγραφικών δεδομένων έχει τα ίδια αποτελέσματα με τη τρισδιάστατη απεικόνιση, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά συγκρίνοντας τον Χάρτη 1 με την Εικόνα 6. Η μόνη διαφορά εντοπίζεται στο χρόνο δημιουργίας της απεικόνισης. Σαφώς στην τρισδιάστατη οπτικοποίηση απαιτείται περισσότερος χρόνος και πληροφορίες (αντιστοίχιση με οπτική μεταβλητή και μετατροπή δεδομένων) από ότι στη δημιουργία ενός χάρτη, όπου απαιτείται κυρίως χρωματική απεικόνιση.

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας τρισδιάστατης απεικόνισης χαρακτηριστικών της καύσιμης ύλης που έχουν καταγραφεί στο πεδίο (ύψος, μήκος, πλάτος, είδος βλάστησης, πυκνότητα κ.α.) συνέβαλλε στη δημιουργία τεχνικών οικοσυστημάτων με πραγματικές τιμές και γενικότερα στην φωτο-ρεαλιστική απεικόνιση του περιβάλλοντος χώρου σε διάφορες κλίμακες.

Οι δειγματοληψίες και γενικότερα οι μετρήσεις στο πεδίο αποτελούν τις πιο χρονοβόρες και δαπανηρές διαδικασίες. Συνήθως τα δεδομένα αυτά δεν αξιοποιούνται κατάλληλα. Με την τρισδιάστατη οπτικοποίηση ο μεγάλος όγκος δεδομένων σε έντυπη μορφή (π.χ. φόρμες καταγραφής βλάστησης, σημειώσεις, αρχεία αριθμητικών δεδομένων κ.α.) μπορεί να αποκτήσει υπόσταση (μορφή και γεωγραφική αναφορά). Έτσι, ο χρήστης ή το κοινό στο οποίο απευθύνεται θα μπορεί εύκολα να αντιληφθεί το φαινόμενο ή τη διαδικασία που περιγράφεται ακόμα και αν δεν κατέχει ιδιαίτερες επιστημονικές γνώσεις. Είναι γεγονός ότι οι τριών διαστάσεων εικόνες είναι πιο ενδιαφέρουσες και αισθητικά πιο ελκυστικές στο κοινό από αυτές των δύο διαστάσεων.

Η τρισδιάστατη οπτικοποίηση είναι ένα καινοτόμο εργαλείο για σχεδιασμό και λήψη αποφάσεων από επιστήμονες και αναλυτές στη διαχείριση των πυρκαγιών. Επιπρόσθετα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατανόηση και εξήγηση (χωρικά και χρονικά) της δυναμικής της βλάστησης, της οικιστικής ανάπτυξης, της εξέλιξης μιας πυρκαγιάς στο χώρο και στη δημιουργία σεναρίων διαχείρισης (όπως σχεδίου προστασίας δασικών εκτάσεων που κινδυνεύουν από πυρκαγιές ή/ και πλημμύρες).

5. ΛΟΙΠΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

- Μέρος των αποτελεσμάτων της μελέτης δημοσιοποιήθηκε στο Διεθνές Συνέδριο “Studying, Modeling & Sense Making of Planet Earth” που πραγματοποιήθηκε 1-6 Ιουνίου 2008, Μυτιλήνη, Ν. Λέσβος.

O. Roussou, A. Papakonstantinou, K. Kalabokidis, N. Soulakellis “3D Geo-visualization of Mediterranean shrubs in different spatial scales”.

Επισυνάπτεται αντίγραφο της δημοσιευμένης εργασίας σε ηλεκτρονική και έντυπη μορφή.

- Το σύνολο της μελέτης θα αποτελέσει μέρος διδακτορικής διατριβής με τίτλο «Χωρική Ανάλυση Κατανομής Καύσιμης Ύλης για Διαχείριση Πυρκαγιών σε Κλίμακα Τοπίου» του Τμήματος Γεωγραφίας του Πανεπιστημίου Αιγαίου (υποψ. διδάκτωρ Όλγα Ν. Ρούσσου)

6. BIBLIOGRAFIA

Ξενόγλωσση

- ADAI -Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (2000). Guia fotográfico para identificação de combustíveis florestais
- Agee J. (1983). Fuel weights of understory-growth conifers in southern Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* 13: 648-656
- Albini F.A. (1979). Spotfire distance from burning trees- a predictive model, USDA Forest Service, General Technical Report INT-56
- Anderson H.E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behavior, USDA
- Anderson H.E., McHaughey R.J. and Wessman C.A. (2005). Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 99, pp.441-449
- Andrews P.L. (1986). BEHAVE. Fire behavior prediction and fuel modeling system. Burn subsystem, USDA Forest Service. Ogden, UT.
- Andrews P.L., Bevins C.D. and R.C. Seli (2005). BehavePlus Fire Modeling System version 3.0. User's Guide. USDA. Forest Research Rocky Mountain, General Technical Report ,RMRS-GTR-106WWW-Revised
- Bandwar G.B., R.B. MacDonald, N.C. Mehta (1986) Satellite-Derived Leaf-Area-Index and Vegetation Maps as Input to Global Carbon Cycle Models – A Hierarchical Approach. *International Journal of Remote Sensing*, 7(2), 265-281
- Baret F. and Guyot G. (1991) Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment, *Remote Sensing of Environment*, 35:161-173
- Brandtberg T., Warner T. A., Landenberger R., and J. McGraw (2003). Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85, pp. 290-303
- Brown J.K. (1970b) Physical fuel properties of ponderosa pine forest floors and cheatgrass. USDA Forest Service Research Note INT-74, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Brown J.K. (1970). A method for inventorying downed woody fuel. USDA Forest Service, General Technical Report INT-16, 24pp.
- Brown J.K. (1974). Handbook for inventorying downed woody material. USDA Forest Service, General Technical Report INT-16. Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Brown J.K., See T.E. (1981) Downed dead woody fuel and biomass in the northern Rocky Mountains. General Technical Report INT-117. Ogden, UT: *USDA Forest Service*, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 48 p.
- Brown , J.K., R.D. Oberheu, and C.M. Johnston, 1982. Handbook for inventorying surface fuels and biomass in the Interior West. GTR INT-129, Ogden, Utah U.S. Department of Agriculture Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 48p.
- Buckley A.R., M.Gahegan and K.Clarke "GEOGRAPHIC VISUALIZATION", December 1, 2000 http://www.ucgis.org/priorities/research/research_white/2000%20Papers/emerging/Geographicvisualization-edit.pdf

- Burgan R. E., and R. C. Rothermel. (1984) BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system—Fuel subsystem. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, Gen. Tech. Rep. INT- 167. Ogden, Utah. 126 p.
- Burgan, P.E., Klaver R.W. and J.M. Klaver (1998) Fuel models and fire potential from satellite and surface observations. *International Journal of Wildland Fire* 8(3), 159-170.
- Catchpole W.R. and J. Wheeler (1992). Estimating plant biomass: A review of techniques. *Australian Journal of Ecology* 17:121-131
- Chandler, D., Cheney, P., Thomas, P., Trabaud, L., and Williams, D. 1983. *Fire in Forestry, Volume I, Forest Fire Behavior and effects*. John Wiley & Sons, Inc. USA
- Chen J.M. (1996) Evaluation of Vegetation Indices and a Modified Simple Ratio for Boreal Applications. *Canadian Journal of Remote Sensing* 22:229-242
- Chuvieco E. and R.G. Congalton (1989) Application of remote sensing and geographical information systems to forest fire hazard mapping. *Remote sensing of the Environment*, 29, 147-159
- Chuvieco E. and M.P. Martin (1994) Global fire aping and fire danger estimation using AVHRR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 60(5), 563-570.
- Chuvieco, E. 1997. A review of remote sensing methods for the study of large wildland fires. Megafires project. Universidad de Alcala, Spain. 192 p.
- Clevers J.G.P.W. (1988) The Derivation of a Simplified Reflectance Model for the Estimation of Leaf Area Index. *Remote Sensing of Environment*, 25: 53- 70
- Clevers J.G.P.W. (1989) The Application of a Weighted Infrared-Red Vegetation Index for Estimating Leaf Area Index by Correcting for Soil Moisture. *Remote Sensing of Environment*, 29; 25-37.
- Cruz M.G., M.E. Alexander and R.H. Wakimoto (2003). Assessing canopy fuel stratum characteristics in crown fire prone fuel types of western North America. *International Journal of Wildfire* 12(1): 39-50.
- de Vasconcelos J.J.P, Paul J.C.U., Silvia S., Pereira J.M.C., Caetano M.S., Catre F.X., Oliveira T.M. (1998). *Regional fuel mapping using knowledge based system approach*. In "Proceedings: III International Conference on forest fire research and the 14th conference on fire and forest meteorology". Vol. II, pp. 2111-2123.
- Dimitrakopoulos, A.P., and Panov, P.I. 2001. *Pyric properties of some dominant Mediterranean vegetation species*. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 23–27
- Dimitrakopoulos, A.P., and Papaioannou, K.K. 2001. *Flammability assessment of Mediterranean forest fuels*. *Fire Technology*, 37: 143–152
- Dimitrakopoulos, A.P. 2001. *Statistical classification of species flammability*. *International Journal of Wildland Fire*, 10: 113–118
- Dimitrakopoulos, A.P. 2002. *Mediterranean fuel models and potential fire behaviour in Greece*. *International Journal of Wildland Fire*, 11: 127–130
- Dimitrakopoulos A.P. and P.I. Panov (2001) Pyric properties of some dominant Mediterranean vegetation species. *International Journal of Wildland Fire*, 10, 23-27

- Dimitrakopoulos A.P. (2001) A statistical classification of Mediterranean species based on their flammability components. *International Journal of Wildland Fire*, 10, 113-118.
- ERDAS Field Guide Version 8.7
- ESRI (2007). Home page: <http://www.esri.com/>
- Etienne M. (1989). Non destructive methods for evaluating shrub biomass: a review. *Acta Oecologica Applicata* 10(2): 115-128,
- Etienne M. and C. Legrand (1994) A non-destructive method to estimate shrub land biomass and combustibility. pp. 425-434 In Proceedings of 2th Conference on Foresy Fire Research, Vol. I, Nov. 1994, Coimbra
- Falkowski M.J., Smith A.M.S., Hudak A.T., Gessler P.E., Vierling L.A. and N.L. Crookston (2006) Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol32, No2, pp.153-161.
- Finney M.A. (1998) FARSITE: fire area simulator-model development and evaluation. Research Paper NRMRS-RP-4. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 47 p.
- Finney M.A. and P.L. Andrews (1999) FARSITE- A Program For Fire Growth Simulation. *Fire Management Notes*, Vol 59 (2) pp.13-15
- Finney (2004) FARSITE: fire area simulator-model development and evaluation (revised). Rep. Paper NRMRS-RP-4 revised. USDA, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT.
- Fonseca T.J.F. and B.R. Parresol (2001). A new model for cork weight estimation in northern Portugal with methodology for construction of confidence intervals. *Forest Ecology and Management*, 152, pp.131-139.
- Gower S.T., C.J. Kucharik and J.M. Norman (1999). Direst and indirest estimatin of leaf area index, $F_{(APAR)}$, and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 70, 29-51
- Green M. (1998). PhD Towards a Perceptual Science of Multidimensional Data - Visualization: Bertinand beyond - ERGO/GERO human factors science (<http://www.ergogero.com/datavis/dvis0.html>)
- Grigal D. F. and L.F. Ohmann (1977). Biomass estimation for some shrubs from Northeastern Minnesota. North Central Forest Experiment Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture. Research Note NC-226
- Guevara J.C., Gonnet J.M. and O.R. Estevez (2002). Biomass estimation for native perennial grasses in the plain of Mendoza, Argentina. *Journal of Arid Environments* 50: 613-619
- Hernando C, Guijaro M., and De Los Sandos A. 1995. Determination de la relation superficie/volumen de las aciculas muertas. *Investigacion Agraria Sistemas y Recursos Forestales* 4(1),73-85
- Hoben B.N., C.J. Tucker, C.J. Fan (1980) Spectral Assessment of Soybean Leaf Area and Leaf Biomass. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46:651-656
- Keane, R.E., Burgan, R., and Wagtendonk, J. 2001. Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Remote Sensing*, 10: 301 – 319

- Kazanis D., G. Xanthopoulos and M. Arianoutsou (2006). Long-term post-fire evolution of understorey biomass in *Pinus halepensis* Mill. Forests of Central Greece, V International Conference on Forest Fire Research, 27-30 November 2006. Figueira da Foz, Portugal.
- Klaver, J.M., Klaver, R.W. and R.E. Brown (1998) *Using GIS to assess forest fire hazard in the Mediterranean region of the United States*. 12 pp.
- Kozlowski T.T and C.E. Ahlgren, 1974: *Fire and Ecosystems*. Academic Press, New York, USA
- Lefsky M. A., Harding D., Cohen W. B., Parker G. and H.H. Shugart (1999) Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests on eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 67, pp. 83-98.
- MacEachren A. M. (1994). *Some Truth with Maps: A Premier on Design and Symbolization*. Washington, DC. Association of American Geographers.
- Maselli F., Rodolfi A., Bottai L., and C. Conese (1996) Evaluation of forest fire risk by the analysis of environmental data and TM images. *International Journal of Remote Sensing* 17(7), 1417-1423.
- Maxweel W.G. and F.R. Ward (1981). Fuels and fire in land-management planning. Part 1. Forest fuel classification. USDA Forest Service. General Technical Report PNW-131, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, Portland. OR
- McCarthy G. (1989) Assessment of overall fuel hazard for a site and its implications for both strategic fuel management and first attack success probability. pp79 In Proceedings of 13th Conference on Fire and Forest Meteorology, Oct. 1996, Lorne, Melbourne, Australia. International Association of Wildland Fire
- Means J.E., Acker S.A., Harding D.J., Blair J.B., Lefsky M.A., Cohen W.B., Harmon M.E. and W.A. McKee (1999). Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 67, pp. 298-308
- Means, J.E., Acker, S.A., Fitt, B.J., Renslow, M., Emerson, L., and C. Hendrix (2000). Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (11)1367-1371.
- Méndez E. and V. Dale (2002) Estimating stand biomass in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Annals of Forest Science* 59, pp 813-821
- Mitsopoulos I.D. and A. P. Dimitrakopoulos (2007). Allometric equations for crown fuel biomass of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 16, pp 642-647.
- Monserud R.A. and J.D. Marshall (1999) Allometric crown relations in three northern Idaho conifer species. *Canadian Journal of Forest Research*. 29, pp. 521-535
- Morrison, J. L. (1984). Applied cartographic communication: Map symbolization for atlases. *New Insights in Cartographic Communication Monograph* 31, *Cartographica* 21, 44-84.
- Morsdorf, F., Meier, E., Kotz, B., Itten, K.I., Dobbertin, M. and B., Allgower (2004) LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sensing of the Environment*, 92 (3), 353-362.
- Naesset E. and T. Oekland (2002). Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing if Environment*, 79, pp. 105-115

- National Wildfire Cooperating Group – N.W.C.G. (1981) Fire Behavior. Unit 1: The Fire Environment. Student Workbook - S390. Boise Interagency Fire Center. Idaho
- Návar J., Méndez E. and V. Dale (2002). Estimating stand biomass in the Tamaulipan thornscrub of northeastern Mexico. *Annals of Forest Science* 59, pp 813-821
- Návar J., Nájera J., E. Jurado (2002). Biomass estimation equations in the Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 52: 167-179
- Návar J., E. Méndez, A. Nájera, J. Graciano, V. Dale and B. Parresol (2004). Biomass equations for shrub species of Tamaulipan thornscrub of North-eastern Mexico. *Journal of Arid Environments* 59: 657-674
- Norusis, M.J. (1990). *SPSS/PC+ Advanced Statistics™ 4.0. for the IBM PC/XT/AT and PS/2* SPSS Inc. Chicago
- Pearson R.L. and L.D. Miller (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. Proceedings of the Eighth International Symposium on Remote Sensing of Environment, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 1357-1381
- Porte A., Trichet P., Bert D. and D. Loustau (2002) Allometric relationships for branch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster Ait*). *Forest Ecology and Management* 158, pp. 71-83
- Pyne S.J., P.L. Andrews, and R.D. Laven (1996). Introduction to Wildland Fire, second edition. John Wiley & Sons, Inc. New York
- Reinhardt E., Scott J., Gray K. and R. Keane (2006). Estimating canopy fuel characteristics in five conifer stands in the western United States using tree and stand measurements. *Canadian Journal Forest Research* 36:2803-2814
- Rothermel R.C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, General Technical Report INT-115
- Rothermel R.C. (1991). Predicting behavior and size of crown fires in the northern Rocky Mountains. USDA Forest Service, Paper INT-438
- Rothermel R.C. and P.L. Andrews (1982) Charts for interpreting wildland fire behavior characteristics. USDA Forest Service, General Technical Report INT-131
- Rouse' J.W., Hass R.H., Shell J.A. and Deering D.W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP 351:301-317.
- Roussou O., A. Papakonstantinou, K. Kalabokidis, N. Soulakellis (2008). 3D Geovisualization of Mediterranean shrubs in different spatial scales. International Conference: Studying, Modeling and Sense Making Of Planet Earth. 1-6 June, Department of Geography, University of the Aegean, Mytilene, Lesvos, Greece
- Salas, J. and E. Chuvieco (1994) Geographic information systems for wildland fire risk mapping. *Wildfire* 3(2), 7-13.
- Sandberg D.V., Ottmar R.D., Cushon G.H. (2001). Characterizing fuels in the 21st Century. *International Journal of Wildland Fire* 10, 381-387
- Scott, J.H., and Burgan, R.E. (2005). Standard Fire Behavior Fuel Models: A comprehensive set of standard fire behavior fuel models for use with Rothermel's surface fire spread model. Gen.Tech.Report RMRS-GTR-153, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 80p.

- Simard A.G. (1996) Fire severity, changing scales, and how things hang together. *International Journal of Wildland Fire* 1(1), 23-34.
- Spanner M.A., L.L. Pierce, D.L. Peterson, S.W. Running (1990). Remote Sensing of Temperate Coniferous Forest Leaf Area Index: The influence of Canopy Closure, Understorey Vegetation and Background Reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 95-111.
- Ter-Mikaelian M. and M.D. Korzukhin (1997). Biomass equations for sixty-five North American tree species. *Forest Ecology and Management*, 97, pp. 1-24.
- Tucker C.J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8:127-150
- Turker C.J. , Holben B.N., Elgin J.H., McMurtrey (1981). Remote sensing of total dry matter accumulation in winter wheat, *Remote Sensing of Environment*, 11:171-189
- Van Wangner C.E. (1977). Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal Forest Research* 7:23-34
- Van Wangner C.E. (1993). Prediction of crown fire behavior in two stands of jack pine. *Canadian Journal Forest Research* 23:442-449
- Visual Nature Studio (2007), 3D Nature v2.53, LLC, 5740 Olde Wadsworth, Suite C, Arvada, CO, USA 80002. Home page: <http://3dnature.com/vnsinfo.html>
- Wang C. (2006). Biomass allometric equation for 10 co-occurring tree species in Chinese Temperate forests. *Forest Ecology and Management* 222, 9-16
- Xanthopoulos, G. and M. Manasi (2002) *A practical methodology for the development of shrub fuel models for fire behavior prediction*. In Proceedings of 4th International Conference on Forest Fire Research. November 18-23, Luso-Coimbra, Portugal. Millpress Science Publishers, Rotterdam, the Netherlands. Abstract p.124
- Xiao C.W. and R. Ceulemans (2004) Allometric relationships for below - and aboveground biomass of young Scots pines. *Forest Ecology and Management* 203, 177-186

Ελληνική

- Δημητρακόπουλος Α.Π., Mateeva V. και Γ. Ξανθόπουλος (2001) Μοντέλα Καύσιμης Ύλης Μεσογειακών Τύπων Βλάστησης της Ελλάδας. *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα*, Σειρά VI, 3(12):192-206
- Δημητρακόπουλος, Α.Π., και Δρίτσα, Σ. 2001. Νομογραφήματα πρόγνωσης πυρικών παραμέτρων πυρκαγιών σε μεσογειακούς τύπους βλάστησης της Ελλάδος. *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα* 3(12): 207-223.
- Καλαμποκίδης, Κ., Ρούσσου, Ο., Βασιλάκος, Χ., και Μαροκοπούλου, Δ. 2004. Χωρική μοντελοποίηση καύσιμης ύλης και συμπεριφοράς πυρκαγιών τοπίου. Στα Πρακτικά 7ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου. 14-17 Οκτωβρίου 2004, Ελληνική Γεωγραφική Εταιρεία και Τμήμα Γεωγραφίας Πανεπιστημίου Αιγαίου, Μυτιλήνη. Τόμ. Ι, σελ. 486-494.
- Καρτάλης Κ. και Φείδας Χ. (2006) Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Εκδόσεις Γκιούρδας, Αθήνα
- Μανιάτης Γ. (1996) Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών Γης – Κτηματολογίου. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη

- Μερτίκας Σ. (1999) Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα
- Στεφανάκης Ε. (2003) Βάσεις Γεωγραφικών Δεδομένων και Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
- Τσουχλαράκη Α., 1996. Ψηφιακή εικονική αναπαράσταση ανάγλυφου στην ανάλυση του τοπίου. Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Ι, Τεύχος 3, σσ. 27-40.
- Ξανθόπουλος, Γ., και Μανασή, Μ. 2001. *Μεθοδολογία δημιουργίας μοντέλων καύσιμης ύλης για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών*. Πρακτικά 9^{ου} Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου, “Προστασία φυσικού περιβάλλοντος και αποκατάσταση διαταραγμένων περιοχών”, 17-20 Οκτωβρίου 2000, Κοζάνη. Ελληνική Δασολογική Εταιρία, Θεσσαλονίκη. Σελ. 541-549.

7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Fire Perimeter (Kilometers)

Elapsed	Current	Horizontal	Slope
00 00:00	07/19 23:30	0.000	0.000
00 00:30	07/20 00:00	0.006	0.006
00 01:00	07/20 00:30	0.053	0.065
00 01:30	07/20 01:00	0.117	0.124
00 02:00	07/20 01:30	0.180	0.189
00 02:30	07/20 02:00	0.243	0.249
00 03:00	07/20 02:30	0.305	0.316
00 03:30	07/20 03:00	0.385	0.400
00 04:00	07/20 03:30	0.472	0.487
00 04:30	07/20 04:00	0.570	0.590
00 05:00	07/20 04:30	0.668	0.695
00 05:30	07/20 05:00	0.775	0.803
00 06:00	07/20 05:30	0.882	0.911
00 06:30	07/20 06:00	0.990	1.026
00 07:00	07/20 06:30	1.100	1.140
00 07:30	07/20 07:00	1.193	1.233
00 08:00	07/20 07:30	1.288	1.333
00 08:30	07/20 08:00	1.378	1.426
00 09:00	07/20 08:30	1.470	1.528
00 09:30	07/20 09:00	1.569	1.625
00 10:00	07/20 09:30	1.667	1.716
00 10:30	07/20 10:00	1.762	1.835
00 11:00	07/20 10:30	1.854	1.910
00 11:30	07/20 11:00	1.953	2.020
00 12:00	07/20 11:30	2.049	2.131
00 12:30	07/20 12:00	2.157	2.226
00 13:00	07/20 12:30	2.294	2.378
00 13:30	07/20 13:00	2.403	2.508
00 14:00	07/20 13:30	2.513	2.598
00 14:30	07/20 14:00	2.614	2.717
00 15:00	07/20 14:30	2.733	2.833
00 15:30	07/20 15:00	2.852	2.955
00 16:00	07/20 15:30	2.951	3.059

00 16:30	07/20	16:00	3.079	3.192
00 17:00	07/20	16:30	3.124	3.239
00 17:30	07/20	17:00	3.280	3.411
00 18:00	07/20	17:30	3.420	3.549
00 18:30	07/20	18:00	3.522	3.649
00 19:00	07/20	18:30	3.657	3.791
00 19:30	07/20	19:00	3.728	3.850
00 20:00	07/20	19:30	3.857	3.985
00 20:30	07/20	20:00	4.044	4.175
00 21:00	07/20	20:30	4.186	4.321
00 21:30	07/20	21:00	4.350	4.505
00 22:00	07/20	21:30	4.459	4.604
00 22:30	07/20	22:00	4.525	4.681
00 23:00	07/20	22:30	4.668	4.828
00 23:30	07/20	23:00	4.763	4.922
01 00:00	07/20	23:30	4.934	5.098
01 00:30	07/21	00:00	5.094	5.242
01 01:00	07/21	00:30	5.228	5.396
01 01:30	07/21	01:00	5.228	5.396
01 02:00	07/21	01:30	5.228	5.396
01 02:30	07/21	02:00	5.228	5.396
01 03:00	07/21	02:30	5.228	5.396
01 03:30	07/21	03:00	5.228	5.396
01 04:00	07/21	03:30	5.228	5.396
01 04:30	07/21	04:00	5.228	5.396
01 05:00	07/21	04:30	5.228	5.396
01 05:30	07/21	05:00	5.228	5.396
01 06:00	07/21	05:30	5.228	5.396
01 06:30	07/21	06:00	5.228	5.396
01 07:00	07/21	06:30	5.228	5.396
01 07:30	07/21	07:00	5.228	5.396
01 08:00	07/21	07:30	5.228	5.396
01 08:30	07/21	08:00	5.228	5.396
01 09:00	07/21	08:30	5.328	5.513
01 09:30	07/21	09:00	5.198	5.368
01 10:00	07/21	09:30	5.209	5.356
01 10:30	07/21	10:00	5.349	5.508

01 11:00	07/21	10:30	5.389	5.543
01 11:30	07/21	11:00	5.511	5.655
01 12:00	07/21	11:30	5.540	5.693
01 12:30	07/21	12:00	5.748	5.884
01 13:00	07/21	12:30	5.956	6.112
01 13:30	07/21	13:00	6.043	6.193
01 14:00	07/21	13:30	6.156	6.322
01 14:30	07/21	14:00	6.303	6.479
01 15:00	07/21	14:30	6.469	6.650
01 15:30	07/21	15:00	6.621	6.802
01 16:00	07/21	15:30	6.833	7.000
01 16:30	07/21	16:00	6.908	7.093
01 17:00	07/21	16:30	6.996	7.186
01 17:30	07/21	17:00	7.225	7.417
01 18:00	07/21	17:30	7.383	7.611
01 18:30	07/21	18:00	7.577	7.808
01 19:00	07/21	18:30	7.690	7.928
01 19:30	07/21	19:00	7.758	7.993
01 20:00	07/21	19:30	7.958	8.225
01 20:30	07/21	20:00	8.124	8.374
01 21:00	07/21	20:30	8.284	8.561
01 21:30	07/21	21:00	8.417	8.681
01 22:00	07/21	21:30	8.465	8.747
01 22:30	07/21	22:00	8.565	8.858
01 23:00	07/21	22:30	8.563	8.854
01 23:30	07/21	23:00	8.624	8.928
02 00:00	07/21	23:30	8.651	8.955
02 00:30	07/22	00:00	8.684	8.988
02 01:00	07/22	00:30	8.718	9.024
02 01:30	07/22	01:00	8.718	9.024
02 02:00	07/22	01:30	8.718	9.024
02 02:30	07/22	02:00	8.718	9.024
02 03:00	07/22	02:30	8.718	9.024
02 03:30	07/22	03:00	8.718	9.024
02 04:00	07/22	03:30	8.718	9.024
02 04:30	07/22	04:00	8.718	9.024
02 05:00	07/22	04:30	8.718	9.024

02 05:30	07/22	05:00	8.718	9.024
02 06:00	07/22	05:30	8.718	9.024
02 06:30	07/22	06:00	8.718	9.024
02 07:00	07/22	06:30	8.718	9.024
02 07:30	07/22	07:00	8.718	9.024
02 08:00	07/22	07:30	8.718	9.024
02 08:30	07/22	08:00	8.718	9.024
02 09:00	07/22	08:30	8.754	9.062
02 09:30	07/22	09:00	8.887	9.227
02 10:00	07/22	09:30	8.923	9.229
02 10:30	07/22	10:00	8.949	9.245
02 11:00	07/22	10:30	9.054	9.336
02 11:30	07/22	11:00	9.219	9.490
02 12:00	07/22	11:30	9.334	9.604
02 12:30	07/22	12:00	9.459	9.739
02 13:00	07/22	12:30	9.655	9.949
02 13:30	07/22	13:00	9.731	10.014
02 14:00	07/22	13:30	9.834	10.158
02 14:30	07/22	14:00	9.940	10.226
02 15:00	07/22	14:30	10.039	10.397
02 15:30	07/22	15:00	10.070	10.443
02 16:00	07/22	15:30	10.088	10.404
02 16:30	07/22	16:00	10.207	10.531
02 17:00	07/22	16:30	10.445	10.775
02 17:30	07/22	17:00	10.643	10.959
02 18:00	07/22	17:30	10.826	11.164
02 18:30	07/22	18:00	10.874	11.208
02 19:00	07/22	18:30	10.999	11.329
02 19:30	07/22	19:00	11.140	11.472
02 20:00	07/22	19:30	11.303	11.678
02 20:30	07/22	20:00	11.455	11.833
02 21:00	07/22	20:30	11.563	11.931
02 21:30	07/22	21:00	11.702	12.083
02 22:00	07/22	21:30	11.760	12.157
02 22:30	07/22	22:00	11.796	12.199
02 23:00	07/22	22:30	11.828	12.229
02 23:30	07/22	23:00	11.853	12.255

03 00:00	07/22	23:30	11.876	12.274
03 00:30	07/23	00:00	11.894	12.304
03 01:00	07/23	00:30	11.915	12.316
03 01:30	07/23	01:00	11.915	12.316
03 02:00	07/23	01:30	11.915	12.316
03 02:30	07/23	02:00	11.915	12.316
03 03:00	07/23	02:30	11.915	12.316
03 03:30	07/23	03:00	11.915	12.316
03 04:00	07/23	03:30	11.915	12.316
03 04:30	07/23	04:00	11.915	12.316
03 05:00	07/23	04:30	11.915	12.316
03 05:30	07/23	05:00	11.915	12.316
03 06:00	07/23	05:30	11.915	12.316
03 06:30	07/23	06:00	11.915	12.316
03 07:00	07/23	06:30	11.915	12.316
03 07:30	07/23	07:00	11.915	12.316
03 08:00	07/23	07:30	11.915	12.316
03 08:30	07/23	08:00	11.915	12.316
03 09:00	07/23	08:30	11.915	12.316
03 09:30	07/23	09:00	11.915	12.316
03 10:00	07/23	09:30	11.915	12.316
03 10:30	07/23	10:00	11.915	12.316
03 11:00	07/23	10:30	11.915	12.316
03 11:30	07/23	11:00	11.915	12.316
03 12:00	07/23	11:30	11.915	12.316
03 12:30	07/23	12:00	11.915	12.316
03 13:00	07/23	12:30	11.915	12.316
03 13:30	07/23	13:00	11.915	12.316
03 14:00	07/23	13:30	11.915	12.316
03 14:30	07/23	14:00	11.915	12.316
03 15:00	07/23	14:30	11.915	12.316
03 15:30	07/23	15:00	11.915	12.316
03 16:00	07/23	15:30	11.915	12.316
03 16:30	07/23	16:00	11.915	12.316
03 17:00	07/23	16:30	11.915	12.316
03 17:30	07/23	17:00	11.915	12.316
03 18:00	07/23	17:30	11.915	12.316

03 18:30	07/23	18:00	11.915	12.316
03 19:00	07/23	18:30	11.915	12.316
03 19:30	07/23	19:00	11.915	12.316
03 20:00	07/23	19:30	11.915	12.316
03 20:30	07/23	20:00	11.915	12.316
03 21:00	07/23	20:30	11.915	12.316
03 21:30	07/23	21:00	11.915	12.316
03 22:00	07/23	21:30	11.915	12.316
03 22:30	07/23	22:00	11.915	12.316
03 23:00	07/23	22:30	11.915	12.316
03 23:30	07/23	23:00	11.915	12.316
04 00:00	07/23	23:30	11.915	12.316

Fire Areas (Hectares)

Elapsed	Current	Horizontal	Slope
00 00:00	07/19 23:30	0.000	0.000
00 00:30	07/20 00:00	0.000	0.000
00 01:00	07/20 00:30	0.022	0.022
00 01:30	07/20 01:00	0.105	0.109
00 02:00	07/20 01:30	0.248	0.257
00 02:30	07/20 02:00	0.444	0.459
00 03:00	07/20 02:30	0.686	0.709
00 03:30	07/20 03:00	1.069	1.106
00 04:00	07/20 03:30	1.600	1.653
00 04:30	07/20 04:00	2.335	2.412
00 05:00	07/20 04:30	3.203	3.306
00 05:30	07/20 05:00	4.339	4.478
00 06:00	07/20 05:30	5.662	5.842
00 06:30	07/20 06:00	7.208	7.436
00 07:00	07/20 06:30	8.913	9.194
00 07:30	07/20 07:00	10.481	10.812
00 08:00	07/20 07:30	12.160	12.544
00 08:30	07/20 08:00	13.868	14.308
00 09:00	07/20 08:30	15.685	16.185
00 09:30	07/20 09:00	17.787	18.358
00 10:00	07/20 09:30	19.995	20.641
00 10:30	07/20 10:00	22.233	22.956
00 11:00	07/20 10:30	24.565	25.371
00 11:30	07/20 11:00	26.952	27.844
00 12:00	07/20 11:30	29.490	30.472
00 12:30	07/20 12:00	32.143	33.221
00 13:00	07/20 12:30	35.033	36.215
00 13:30	07/20 13:00	38.105	39.398
00 14:00	07/20 13:30	41.663	43.087
00 14:30	07/20 14:00	45.661	47.230
00 15:00	07/20 14:30	49.544	51.254
00 15:30	07/20 15:00	53.140	54.978
00 16:00	07/20 15:30	56.534	58.491
00 16:30	07/20 16:00	60.540	62.637
00 17:00	07/20 16:30	64.707	66.949

00 17:30	07/20	17:00	68.823	71.207
00 18:00	07/20	17:30	72.716	75.233
00 18:30	07/20	18:00	76.283	78.922
00 19:00	07/20	18:30	79.905	82.668
00 19:30	07/20	19:00	83.581	86.470
00 20:00	07/20	19:30	86.923	89.926
00 20:30	07/20	20:00	90.106	93.217
00 21:00	07/20	20:30	93.074	96.288
00 21:30	07/20	21:00	96.041	99.357
00 22:00	07/20	21:30	98.847	102.258
00 22:30	07/20	22:00	101.594	105.100
00 23:00	07/20	22:30	104.340	107.940
00 23:30	07/20	23:00	107.329	111.032
01 00:00	07/20	23:30	110.392	114.200
01 00:30	07/21	00:00	113.336	117.245
01 01:00	07/21	00:30	116.065	120.067
01 01:30	07/21	01:00	116.065	120.067
01 02:00	07/21	01:30	116.065	120.067
01 02:30	07/21	02:00	116.065	120.067
01 03:00	07/21	02:30	116.065	120.067
01 03:30	07/21	03:00	116.065	120.067
01 04:00	07/21	03:30	116.065	120.067
01 04:30	07/21	04:00	116.065	120.067
01 05:00	07/21	04:30	116.065	120.067
01 05:30	07/21	05:00	116.065	120.067
01 06:00	07/21	05:30	116.065	120.067
01 06:30	07/21	06:00	116.065	120.067
01 07:00	07/21	06:30	116.065	120.067
01 07:30	07/21	07:00	116.065	120.067
01 08:00	07/21	07:30	116.065	120.067
01 08:30	07/21	08:00	116.065	120.067
01 09:00	07/21	08:30	118.666	122.758
01 09:30	07/21	09:00	124.362	128.647
01 10:00	07/21	09:30	130.164	134.647
01 10:30	07/21	10:00	135.879	140.557
01 11:00	07/21	10:30	141.716	146.592
01 11:30	07/21	11:00	147.053	152.111

01 12:00	07/21	11:30	152.472	157.715
01 12:30	07/21	12:00	159.023	164.490
01 13:00	07/21	12:30	165.832	171.532
01 13:30	07/21	13:00	172.562	178.495
01 14:00	07/21	13:30	179.171	185.333
01 14:30	07/21	14:00	185.912	192.310
01 15:00	07/21	14:30	192.837	199.477
01 15:30	07/21	15:00	199.980	206.873
01 16:00	07/21	15:30	207.484	214.642
01 16:30	07/21	16:00	214.877	222.298
01 17:00	07/21	16:30	222.047	229.724
01 17:30	07/21	17:00	229.061	236.989
01 18:00	07/21	17:30	235.500	243.661
01 18:30	07/21	18:00	241.820	250.208
01 19:00	07/21	18:30	247.951	256.561
01 19:30	07/21	19:00	253.301	262.105
01 20:00	07/21	19:30	258.417	267.407
01 20:30	07/21	20:00	262.986	272.143
01 21:00	07/21	20:30	267.061	276.367
01 21:30	07/21	21:00	270.694	280.132
01 22:00	07/21	21:30	274.088	283.651
01 22:30	07/21	22:00	277.006	286.675
01 23:00	07/21	22:30	279.544	289.306
01 23:30	07/21	23:00	280.630	290.432
02 00:00	07/21	23:30	280.967	290.781
02 00:30	07/22	00:00	281.335	291.163
02 01:00	07/22	00:30	281.683	291.524
02 01:30	07/22	01:00	281.683	291.524
02 02:00	07/22	01:30	281.683	291.524
02 02:30	07/22	02:00	281.683	291.524
02 03:00	07/22	02:30	281.683	291.524
02 03:30	07/22	03:00	281.683	291.524
02 04:00	07/22	03:30	281.683	291.524
02 04:30	07/22	04:00	281.683	291.524
02 05:00	07/22	04:30	281.683	291.524
02 05:30	07/22	05:00	281.683	291.524
02 06:00	07/22	05:30	281.683	291.524

02 06:30	07/22	06:00	281.683	291.524
02 07:00	07/22	06:30	281.683	291.524
02 07:30	07/22	07:00	281.683	291.524
02 08:00	07/22	07:30	281.683	291.524
02 08:30	07/22	08:00	281.683	291.524
02 09:00	07/22	08:30	282.029	291.882
02 09:30	07/22	09:00	288.011	298.085
02 10:00	07/22	09:30	293.833	304.121
02 10:30	07/22	10:00	299.360	309.852
02 11:00	07/22	10:30	304.655	315.341
02 11:30	07/22	11:00	310.427	321.327
02 12:00	07/22	11:30	316.400	327.519
02 12:30	07/22	12:00	322.523	333.867
02 13:00	07/22	12:30	328.684	340.255
02 13:30	07/22	13:00	334.888	346.689
02 14:00	07/22	13:30	340.787	352.807
02 14:30	07/22	14:00	347.036	359.288
02 15:00	07/22	14:30	353.280	365.764
02 15:30	07/22	15:00	358.768	371.457
02 16:00	07/22	15:30	364.110	376.998
02 16:30	07/22	16:00	369.309	382.391
02 17:00	07/22	16:30	374.592	387.871
02 17:30	07/22	17:00	379.886	393.364
02 18:00	07/22	17:30	385.159	398.834
02 18:30	07/22	18:00	389.751	403.598
02 19:00	07/22	18:30	394.331	408.349
02 19:30	07/22	19:00	398.582	412.759
02 20:00	07/22	19:30	402.446	416.769
02 20:30	07/22	20:00	405.683	420.126
02 21:00	07/22	20:30	408.619	423.172
02 21:30	07/22	21:00	411.007	425.650
02 22:00	07/22	21:30	412.142	426.827
02 22:30	07/22	22:00	412.562	427.263
02 23:00	07/22	22:30	412.985	427.702
02 23:30	07/22	23:00	413.360	428.092
03 00:00	07/22	23:30	413.719	428.464
03 00:30	07/23	00:00	414.071	428.829

03 01:00	07/23	00:30	414.408	429.179
03 01:30	07/23	01:00	414.408	429.179
03 02:00	07/23	01:30	414.408	429.179
03 02:30	07/23	02:00	414.408	429.179
03 03:00	07/23	02:30	414.408	429.179
03 03:30	07/23	03:00	414.408	429.179
03 04:00	07/23	03:30	414.408	429.179
03 04:30	07/23	04:00	414.408	429.179
03 05:00	07/23	04:30	414.408	429.179
03 05:30	07/23	05:00	414.408	429.179
03 06:00	07/23	05:30	414.408	429.179
03 06:30	07/23	06:00	414.408	429.179
03 07:00	07/23	06:30	414.408	429.179
03 07:30	07/23	07:00	414.408	429.179
03 08:00	07/23	07:30	414.408	429.179
03 08:30	07/23	08:00	414.408	429.179
03 09:00	07/23	08:30	414.408	429.179
03 09:30	07/23	09:00	414.408	429.179
03 10:00	07/23	09:30	414.408	429.179
03 10:30	07/23	10:00	414.408	429.179
03 11:00	07/23	10:30	414.408	429.179
03 11:30	07/23	11:00	414.408	429.179
03 12:00	07/23	11:30	414.408	429.179
03 12:30	07/23	12:00	414.408	429.179
03 13:00	07/23	12:30	414.408	429.179
03 13:30	07/23	13:00	414.408	429.179
03 14:00	07/23	13:30	414.408	429.179
03 14:30	07/23	14:00	414.408	429.179
03 15:00	07/23	14:30	414.408	429.179
03 15:30	07/23	15:00	414.408	429.179
03 16:00	07/23	15:30	414.408	429.179
03 16:30	07/23	16:00	414.408	429.179
03 17:00	07/23	16:30	414.408	429.179
03 17:30	07/23	17:00	414.408	429.179
03 18:00	07/23	17:30	414.408	429.179
03 18:30	07/23	18:00	414.408	429.179
03 19:00	07/23	18:30	414.408	429.179

03 19:30	07/23	19:00	414.408	429.179
03 20:00	07/23	19:30	414.408	429.179
03 20:30	07/23	20:00	414.408	429.179
03 21:00	07/23	20:30	414.408	429.179
03 21:30	07/23	21:00	414.408	429.179
03 22:00	07/23	21:30	414.408	429.179
03 22:30	07/23	22:00	414.408	429.179
03 23:00	07/23	22:30	414.408	429.179
03 23:30	07/23	23:00	414.408	429.179
04 00:00	07/23	23:30	414.408	429.179