



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΜΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**«Συνεργιστική Εφαρμογή Ατμοσφαιρικού
Μοντέλου FLEXPART και δορυφορικών δεδομένων MISR για
τη μελέτη διασποράς καπνού από πυρκαγιές»**



Μεταπτυχιακή εργασία της:

Σοφίου Φραγκίσκης-Ιωάννας

**Στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Διπλώματος
Ειδίκευσης Γεωπληροφορικής**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ & ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΜΣ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**«Συνεργιστική Εφαρμογή Ατμοσφαιρικού
Μοντέλου FLEXPART και δορυφορικών δεδομένων MISR για
τη μελέτη διασποράς καπνού από πυρκαγιές»**

Μεταπτυχιακή εργασία της Σοφίου Φραγκίσκης-Ιωάννας
Γεωγράφου Χαροκοπέιου Πανεπιστημίου Αθηνών

Επιβλέπων: καθηγητής Αργιαλάς Δημήτριος

Τριμελής Επιτροπή
Αργιαλάς Δημήτρης

Αμοιρίδης Βασίλης

Καράντζαλος Κωνσταντίνος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2015

Περιεχόμενα

Πίνακας Διαγραμμάτων	4
Πίνακας Εικόνων	4
Πίνακας Πινάκων	5
Πίνακας Χαρτών	5
Πρόλογος - Ευχαριστίες	6
Περίληψη	7
Abstract	8
1. Εισαγωγή	9
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
2.1 Πυρκαγιές στην Ελλάδα	11
2.1.1 Παράγοντες δημιουργίας των πυρκαγιών	11
2.1.2 Επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών	14
2.1.3 Στατιστικά στοιχεία πυρκαγιών στον Ελλαδικό χώρο	17
2.2 Multi-angle Imaging SpectroRadiometer	24
2.2.1 Ο δορυφόρος Terra	24
2.2.2 Multi-angle Imaging SpectroRadiometer	25
2.3 MISR INteractive eXplorer	28
2.3.1 Ψηφιοποίηση καπνού	36
2.4 Lagrangian ατμοσφαιρικό μοντέλο FLEXPART	37
2.4.1 Δομή μοντέλου	41
2.5 Ατμοσφαιρικό Μοντέλο	44
2.6 Πρόγραμμα BEYOND	45
3. Μέθοδος - Αποτελέσματα	49
3.1 Δορυφορικά αποτελέσματα	50
3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων δύο μεθόδων	66
4. Συμπέρασμα - Προοπτικές	69
Βιβλιογραφία	70
Ξένη Βιβλιογραφία	70
Ελληνική Βιβλιογραφία	73
Διαδικτυακοί τόποι	74

Πίνακας Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Καμένες εκτάσεις (σε στρέμματα) στη Πελοπόννησο ανά νομό	18
Διάγραμμα 2: Καμένες εκτάσεις ανά κατηγορία χρήσεων γης στον ελλαδικό χώρο το διάστημα 2002-2013	19

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1: Τρεις παράγοντες για τη δημιουργία της φωτιάς (Πηγή: www.fria.gr).....	11
Εικόνα 2: Τρίγωνο δημιουργίας της φωτιάς και παράγοντες που επηρεάζουν τις δασικές πυρκαγιές (Πηγή: Ζούντας, 2005)	13
Εικόνα 3: Καταστροφή στο κέντρο της Αθήνας από έντονη βροχόπτωση συνέπεια της απώλειας πρασίνου, Οκτώβριος 2014 (Πηγή: Tribune).....	16
Εικόνα 4: Στατιστικά στοιχεία εμφάνισης πυρκαγιών ανά χρονιά και ανά μήνα (Πηγή: Sofiou et al., 2013)	17
Εικόνα 5: Δορυφόρος Terra και η θέση των αισθητήρων πάνω του (NASA).....	24
Εικόνα 6: Δεδομένα από τους πέντε αισθητήρες του δορυφόρου Terra (NASA-Terra)	25
Εικόνα 7: Εννέα κάμερες του οργάνου MISR η χωρική διακριτική ικανότητα της κάθε κάμερας (MISR Science team, 2014)	26
Εικόνα 8: Κύριο τμήμα του MISR (MISR Science Team, 2014).....	27
Εικόνα 9: Γεωμετρική απεικόνιση του υπολογισμού του ύψους του «wind-corrected» και της ταχύτητας του ανέμου, από το συσχετισμό των δύο δεδομένων από τις δύο κάμερες (Nelson et al., 2013).....	33
Εικόνα 10: Λεπτομέρειες γεωμετρικής απεικόνισης από τη μια κάμερα (πορτοκαλί κουτί εικόνας 9) (Nelson et al., 2002)	34
Εικόνα 11: Κύβος απεικόνισης του μοντέλου του MINX για στερεοσκοπική απεικόνιση ενός μοναδικού σημείου από μια κάμερα (Nelson et al., 2013).....	34
Εικόνα 12: Προβολή Lambert που χρησιμοποιεί το WRF (Πηγή: Brioude et al. 2013)	39
Εικόνα 13: Μερκατορική προβολή που χρησιμοποιεί το WRF (Πηγή: Brioude et al. 2013).....	39
Εικόνα 14: Στερεογραφική προβολή των πόλων (Πηγή: Brioude et al. 2013)	40
Εικόνα 15: Συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται στα δύο συστήματα WRF (σ) και FLEXPART (z) με κάθετη απεικόνιση στο επίπεδο (Πηγή: Brioude et al., 2012b).....	41
Εικόνα 16: Θερμοκρασία και ύψη στα 500mb, η διακεκομμένη περιοχή δείχνει τον ελλαδικό χώρο.....	45
Εικόνα 17: Οι πυρκαγιές που έλαβαν χώρα στη Πελοπόννησο το 2007, με τη χρήση της διαδικτυακής εφαρμογής BEYOND.....	46
Εικόνα 18: Διαχρονική εξέλιξη των πυρκαγιών στη Πελοπόννησο, με πορτοκαλί χρώμα φαίνονται οι πυρκαγιές του 2007, ενώ με κόκκινο νεώτερες του 2012.....	47
Εικόνα 19: Παρατήρηση της γης και μοντελοποίηση στα πλαίσια του κέντρου αριστείας BEYOND.....	48
Εικόνα 20: Άνεμος σε ύψος 10m (m/s).....	49
Εικόνα 21: Σύνδεση με την υγρασία στα 2m (%).....	50

Εικόνα 22: Εστίες θερμών πηγών στην Πελοπόννησο στις 26/8/2007 (MODVOLC, 2014).....	51
Εικόνα 23: Αναζήτηση επιθυμητής τροχιάς με τη χρήση του λογισμικού MINX	52
Εικόνα 24: Τροχιά 40892, 26/08/2007.....	53
Εικόνα 25: Ορισμός επιθυμητών στοιχείων για την απεικόνιση της τροχιάς.....	54
Εικόνα 26: Δορυφορική εικόνα της περιοχής μελέτης, με τη χρήση του διαδικτυακού εργαλείου περιήγησης του MISR (MISR Browse Tool, 2014)	54
Εικόνα 27: Μάσκα καπνού με τη χρήση του λογισμικού MINX της περιοχής μελέτης	55
Εικόνα 28: Επιλογές για τη έναρξη της ψηφιοποίησης του καπνού	56
Εικόνα 29: Ύψος αερολυμάτων πρώτης εστίας στη κάμερα στο σημείο ναδίρ	57
Εικόνα 30: Ύψος αερολυμάτων δεύτερης εστίας	58
Εικόνα 31: Ύψος αερολυμάτων τρίτης εστίας	59
Εικόνα 32: Ύψος αερολυμάτων τέταρτης εστίας	60
Εικόνα 33: Πέμπτη εστία πυρκαγιάς.....	61
Εικόνα 34: Έκτη εστία πυρκαγιάς	62
Εικόνα 35: Όλες οι εστίες με τα ύψη του καπνού στις πυρκαγιές της Δυτικής Πελοποννήσου	63
Εικόνα 35: Συγκέντρωση σωματιδίων ($ng\ m^{-3}$)	65
Εικόνα 36: Κάθετη κατανομή των συγκεντρώσεων των σωματιδίων ($ng\ m^{-3}$)	65
Εικόνα 37: Σύγκριση αποτελεσμάτων από τη χρήση των δύο μεθόδων: δορυφορική (κάτω), μοντέλο (επάνω)	66
Εικόνα 39: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δύο εφαρμογές, δορυφορική επεξεργασία με μπλε χρώμα και ατμοσφαιρικό μοντέλο με κόκκινο χρώμα.....	67

Πίνακας Πινάκων

Πίνακας 1: Καλύψεις / Χρήσεις Γής επιπέδου 2	19
Πίνακας 2: Μέσος Όρος Σφάλματος ανά κάμερα στο εργαλείο MISR (Πηγή: Davies et al., 2007).....	31

Πίνακας Χαρτών

Χάρτης 1: Πυρκαγιές στην Πελοπόννησο 2007, σε συνδυασμό με τις χρήσεις γης..	20
Χάρτης 2: Χάρτης Πρόβλεψης Κινδύνου πυρκαγιάς για 25/08/2007 (Υπουργείο Εσωτερικής Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, 2015)	21
Χάρτης 3: Χάρτης πρόβλεψης κινδύνου για τη δημιουργία πυρκαγιάς στις 26/08/2007 (Υπουργείο Εσωτερικής Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, 2015)	22
Χάρτης 4: Χάρτης πρόβλεψης κινδύνου για τη δημιουργία πυρκαγιάς της Τρίτη μέρα των πυρκαγιών 26/08/2007 (Υπουργείο Εσωτερικής Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, 2015).....	23

Πρόλογος - Ευχαριστίες

«Η φωτιά είναι καλός υπηρέτης αλλά κακός αφέντης» λέει μια αγγλική παροιμία. Πράγματι οι πυρκαγιές αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες μόλυνσης και καταστροφής όλου του οικοσυστήματος αλλά και της υγείας ανθρώπου και ζώων.

Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα αυξημένο στον Ελλαδικό χώρο εξαιτίας της ιδιάζουσας τοπογραφίας και των ιδιαίτερων μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν στην λεκάνη της Μεσογείου.

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας στη σχολή Αργονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Αθηνών, μελετήσαμε τον τρόπο διασποράς του καπνού και το ύψος των αερολυμάτων ώστε να κατανοήσουμε την μεταφορά του καπνού στην ατμόσφαιρα. Για την μελέτη αυτή επιλέξαμε τις φωτιές που έλαβαν χώρα στην δυτική Πελοπόννησο.

Στο σημείο αυτό οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Δ. Αργιαλά για όλες αυτές τις ώρες που μου αφιέρωσε αλλά και τις καίριες παρατηρήσεις του στην ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω από το τμήμα Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης του Αστεροσκοπείου Αθηνών τον ερευνητή κ. Β. Αμοιρίδη που υπήρξε πολύτιμος και γενναιόδωρος σύμβουλος καθόλη τη διάρκεια της υλοποίησης της παρούσας έρευνας, μετατρέποντας τα σύνθετα σε απλά και κατανοητά. Δεν μπορώ επίσης, να ξεχάσω να ευχαριστήσω τον κ. Σ. Σολωμό, μεταδιδακτορικό ερευνητή του Αστεροσκοπείου Αθηνών, που μοιράστηκε μαζί μου τις γνώσεις και την εμπειρία του.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Κ. Καράντζαλο, επίκουρο καθηγητή της Σχολής Αργονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Αθηνών και μέλος της τριμελούς επιτροπής της διπλωματικής μου, για τη βοήθεια και τη κατανόηση του σε όλο το διάστημα των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Περίληψη

Οι φυσικές καταστροφές επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη ποιότητα ζωής στο πλανήτη μας. Εξ' αυτών, οι πυρκαγιές αποτελούν μια σοβαρή απειλή για τον άνθρωπο και το περιβάλλον.

Τα τελευταία χρόνια, εδώ περίπου και μια δεκαετία, σημειώνονται όλο και περισσότερες πυρκαγιές στον ελλαδικό χώρο με αποτέλεσμα να καταστρέφονται μεγάλες τόσο καλλιεργήσιμες, όσο και κατοικήσιμες εκτάσεις που επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την οικονομία της χώρας, αλλά και το περιβάλλον. Η καύση της βιομάζας αποφέρει σημαντική περιβαλλοντική ρύπανση με μεταφορά των αέριων ρύπων σε ευρύ γεωγραφικό χώρο. Οι πυρκαγιές που έλαβαν χώρα στη Πελοπόννησο το 2007 ήταν ένα σοβαρό πλήγμα για τους κατοίκους της περιοχής, την οικονομία, αλλά και λόγω της διάρκειας και της έκτασης του γεγονότος επηρέασαν σημαντικά την ατμόσφαιρα.

Στην παρούσα έρευνα μελετήθηκαν οι πυρκαγιές της δυτικής Πελοποννήσου τον Αύγουστο του 2007 με τη χρήση δορυφορικών εικόνων του φασματοφωτομέτρου πολλαπλών γωνιών (MISR), εξετάστηκε το ύψος των αεροζόλ και η διεύθυνση τους από την εστία της πυρκαγιάς. Με βάση τη χρήση ενός ατμοσφαιρικού μοντέλου (WRF-FLEXPART) συγκρίθηκε η χωρική διασπορά του καπνού και βρέθηκε ότι το μοντέλο συμβαδίζει με τη αποτελέσματα του δορυφόρου με την έναρξη της πυρκαγιάς.

Μελλοντικά θα μπορούσαμε να εξετάσουμε τη συσχέτιση των δύο μεθόδων με in-situ μετρήσεις, καθώς επίσης και την αποτελεσματικότητα των μεθόδων αυτών σε άλλα φυσικά φαινόμενα, όπως σε μελέτη των αερολυμάτων ηφαιστειών. Τέλος, θα μπορούσε να γίνει μια στατιστική σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων των υψομέτρων που προέρχονται από το δορυφόρο και το μοντέλο.

Λέξεις Κλειδιά: Πυρκαγιές, ύψος καπνού, ατμοσφαιρικό μοντέλο, δορυφορικά δεδομένα

Abstract

«Application of FLEXPART atmospheric model for injection height retrivals using MISR data analysis»

Natural disasters affect the quality of life on our planet. Fires are a serious threat to humans and to the environment.

In the last decade, many fires took place in Greece which destroyed so large cultivate areas, and residential areas significantly affecting the economy of the country, but also the environment. Burning biomass yields significant environmental pollution by transferring the gaseous pollutants in a wide geographic area. The fires that took place in the Peloponnese in 2007 was a serious blow to the local people, the economy, but also because of the duration and extent of the event significantly affected the atmosphere.

In this research we studied the fires of western Peloponnese in August 2007 using satellite Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) images and examined the amount of aerosols and their direction from the initial point of the fire. With the use of an atmospheric model (WRF-FLEXPART) we compared the spatial distribution of plume with a view to forecast with greater accuracy than the satellite route and expansion of the plume from the fire's inception.

Future plans are the collaboration of the retrivals of these two methods with in-situ measurements and also the examination of these methods in other events like as volcanic ash. In conclusion, it would be helpful to examine the statistic of numeric injection heights results from satellite and atmospheric model.

Keywords: fires, injection plume height, atmospheric model, satellite data

1. Εισαγωγή

Η καύση της βιομάζας και η αύξηση των μεγάλων πυρκαγιών επηρεάζουν το κλίμα του πλανήτη μας. Η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας αναμένεται να αυξήσει τη συχνότητα εμφάνισης των μεγάλων πυρκαγιών. Η εκπομπή των σωματιδίων από καύσεις της βιομάζας επηρεάζει το κλίμα μέσω της μεταφοράς της ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα και επίσης της επίδρασης στον σχηματισμό και ιδιότητες της συννεφοκάλυψης.

Οι πυρκαγιές επιδρούν σημαντικά στην ανανέωση και εξέλιξη των φυτικών οικοσυστημάτων, με αποτέλεσμα να συμμετέχουν στον καθορισμό της σημερινής δομής και τον τρόπο σύνθεσης του τοπίου. Τα τελευταία χρόνια και πιο συγκεκριμένα τη τελευταία δεκαετία, ωστόσο, έχει σημειωθεί σημαντική αύξηση των πυρκαγιών σε ολόκληρο τον ελλαδικό χώρο. Η περιβαλλοντική αυτή καταστροφή, με δραματικές συνέπειες για τα οικοσυστήματα, την ποιότητα του αέρα και το κλίμα, έχει σαν αποτέλεσμα σημαντικές κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις σε ολόκληρη τη χώρα. Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα παρατηρείται ραγδαία αύξηση των πυρκαγιών ετησίως με τεράστιες εκτάσεις να αποτεφρώνονται.

Βελτιώνοντας τις γνώσεις μας για τις εκπομπές της βιομάζας μπορούν να υπολογιστούν οι επιπτώσεις τους με τη χρήση κλιματικών μοντέλων. Σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την τύχη του πλουμίου του καπνού είναι ο άνεμος, η σταθερότητα της ατμόσφαιρας, τα διάφορα ατμοσφαιρικά στρώματα, η σοβαρότητα (ένταση), η διάρκεια της φωτιάς και το αρχικό ύψος του καπνού. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται ένα κοινό ατμοσφαιρικό μοντέλο μεταφοράς αερίων μαζών και η μέθοδος της ψηφιοποίησης στην επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων με σκοπό να μελετηθεί ο τρόπος διασποράς και χωρικής κατανομής του καπνού.

Η συγκεκριμένη έρευνα γίνεται με σκοπό να εξεταστεί το δυναμικό του αισθητήρα Multi-angle Imaging SpectroRadiometer MISR, αλλά και το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF-FLEXPART και η ικανότητά τους να συμβάλλουν μέσω της παροχής τρισδιάστατων πεδίων στη πλήρη γεωμετρική καταγραφή του νέφους καπνού μιας πυρκαγιάς. Οι απεικονίσεις αυτές μπορούν να

βελτιστοποιήσουν τις προσομοιώσεις διασποράς ούτως ώστε οι εκτιμήσεις των συγκεντρώσεων του καπνού στην επιφάνεια να είναι ακριβέστερες.

Η μελέτη αυτή θα εξασφαλίσει τη σύγκριση των εκτιμήσεων του μοντέλου με την αληθινή εικόνα (in-situ), στοχεύοντας οι προσομοιώσεις διασποράς να είναι ακριβείς και ικανές να χρησιμοποιηθούν για την μείωση κατά το δυνατόν των επιπτώσεων στην υγεία, κοινωνικοοικονομικών και περιβαλλοντικών από την στιγμή της έναρξης της πυρκαγιάς.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Πυρκαγιές στην Ελλάδα

2.1.1 Παράγοντες δημιουργίας των πυρκαγιών

Πυρκαγιές λαμβάνουν χώρα εδώ και εκατομμύρια χρόνια στην γη πριν την εμφάνιση του ανθρώπου. Δυστυχώς η παρέμβαση του ανθρώπου επιδείνωσε τη κατάσταση, με αποτέλεσμα ένα φυσικό φαινόμενο να γίνει περιβαλλοντικό πρόβλημα. Κύρια αιτία των πυρκαγιών παλαιότερα ήταν κεραυνοί και ηφαίστεια (φυσικά φαινόμενα). Την περίοδο που τα ηφαίστεια έγιναν ανενεργά παρατηρήθηκε μείωση των πυρκαγιών. Αντίθετα, η αύξηση των κεραυνών και ιδιαίτερα στη περιοχή της Μεσογείου έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνουν οι εκάστοτε πυρκαγιές.

Το φαινόμενο της καύσης εμφανίζεται με την συνύπαρξη τριών παραγόντων, της καύσιμης ύλης (βλάστησης), του οξυγόνου και της υψηλής θερμοκρασίας. Συνέπεια των μεγάλων πυρκαγιών είναι η δημιουργία μιας νέας μορφής βλάστησης (κάθε 100 χρόνια περίπου, εξαιτίας φυσικών παραγόντων) σε διάφορες ελλαδικές περιοχές, όπως στην Αττική, στα παραλιακά τμήματα της Εύβοιας, στη Χαλκιδική, το Πήλιο και στην πλειοψηφία των νησιών.



Εικόνα 1: Τρεις παράγοντες για τη δημιουργία της φωτιάς (Πηγή: www.fria.gr)

Οι δασικές πυρκαγιές συμβαίνουν στη μεσογειακή ζώνη (στην παράκτια περιοχή της Ελλάδας, δηλαδή σε υψόμετρο μικρότερο από 600 m) κατά κύριο λόγο, με εξαίρεση τις πυρκαγιές το καλοκαίρι του 2007, όπου εξαιτίας των δύσκολων κλιματολογικών συνθηκών (όπως ισχυρών ανέμων) σημειώθηκαν πυρκαγιές και έξω από αυτές τις ζώνες. Οι περιοχές στις οποίες

δημιουργούνται συχνότερα πυρκαγιές συναντώνται κυρίως πεύκα, πουρνάρια, κουμαριές και ρείκια.¹

Πέρα από τα είδη των δασών που επηρεάζουν σημαντικά τον τρόπο ανάπτυξης μιας δασικής πυρκαγιάς, σημαντικό ρόλο παίζουν τα είδη καύσης της δασικής ύλης, που τη διακρίνουμε σε δύο κατηγορίες την επιδάφια καύσιμη ύλη (η οποία περιλαμβάνει ζωντανά και νεκρά οργανικά υλικά πάνω στο έδαφος) και την εναέρια καύσιμη ύλη (αποτελείται από οργανικά υλικά ζωντανά ή νεκρά πάνω σε δέντρα που καίγονται σε ύψος μεγαλύτερο των 2 m).²

Εκτός από τα είδη καύσης μπορούμε να διαχωρίσουμε την καύσιμη δασική ύλη σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την αναφλεξιμότητα που εμφανίζουν: πρώτον σε αναφλέξιμη ύλη (αποτελείται κυρίως από βελόνες πεύκων, φύλλα, φλοιό αποφλοιώσης, ξερά κλαδιά, υλικά που αναφλέγονται αμέσως λόγω μεγάλης ποσότητας ρητίνης), δεύτερον σε βαρεία καύσιμη ύλη (καίγεται αργά με μεγάλη διάρκεια και αποτελείται από ξερούς κορμούς, κλαδιά και υπολείμματα υλοτομιών) και τρίτον σε πράσινη καύσιμη ύλη (αποτελείται από τα πράσινα τμήματα των δέντρων, κλαδιών, θάμνων και προϋπόθεση για την καύση της είναι να ξεραθεί).³

Σημαντικός παράγοντας στη δημιουργία των πυρκαγιών είναι οι μετεωρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Πιο αναλυτικά, η βροχή (η ένταση της και η διάρκειά της), η θερμοκρασία (η σχετική υγρασία και η ξηρασία).

Στην Ελλάδα έχουμε μεγάλη διάρκεια ξηρής και ζεστής περιόδου από τα τέλη της άνοιξης, μέχρι τους πρώτους μήνες του φθινοπώρου. Η σχετική ατμοσφαιρική υγρασία, επιδρά στη νεκρή δασική ύλη, επηρεάζοντας τη συχνότητα και την ένταση των δασικών πυρκαγιών. Ο άνεμος είναι πολύ επικίνδυνος ιδιαίτερα όταν είναι ξηρός, διότι επιταχύνει τη εξάτμιση μειώνοντας την υγρασία της καύσιμης ύλης και απομακρύνει το στρώμα κορεσμού των υδρατμών γύρω από τα πράσινα φυτικά μέρη με αποτέλεσμα

¹ Κωσταντινίδης, 2007

² Καϊλίδης, 1990

³ Γκόφας, 2001

να γίνονται πιο εύφλεκτα.⁴ Επιπροσθέτως, όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη είναι η προσφορά οξυγόνου που συμβάλει στη ξήρανση της καύσιμης ύλης που αναφλέγεται. Στη συνέχεια, η εξάτμιση σε συνδυασμό με τον άνεμο, τη θερμοκρασία και την υγρασία, καθώς και η βαρομετρική πίεση με το κλίμα της περιοχής επηρεάζουν το σύνολο των μετεωρολογικών φαινομένων.

Τέλος, η τοπογραφία της περιοχής, η γεωμορφολογία, το υψόμετρο, η κλίση του εδάφους επηρεάζει τη δημιουργία πυρκαγιών. Πιο συγκεκριμένα, η κλίση του εδάφους επιδρά στον τρόπο εξάπλωσης των πυρκαγιών, έτσι παρατηρούμε γρηγορότερη ταχύτητα εξάπλωσης των πυρκαγιών όταν κινείται από κάτω προς τα επάνω, μικρότερη σε αντίθετη κίνηση και ακόμα μικρότερη ταχύτητα όταν βρισκόμαστε σε επίπεδα εδάφη.⁵



Εικόνα 2: Τρίγωνο δημιουργίας της φωτιάς και παράγοντες που επηρεάζουν τις δασικές πυρκαγιές (Πηγή: Ζούντας, 2005)

Η ταχύτητα εξάπλωσης μια πυρκαγιάς δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$R = \frac{IR \xi (1 + \Phi W + \Phi S)}{Pb \quad Qig}$$

⁴ Μιμίκου, 1994

⁵ Καϊλίδης, 1990

όπου R είναι η ταχύτητα διάδοσης της πυρκαγιάς, IR η θερμική ροή της φλεγόμενης ζώνης, ξ είναι η ποσότητα της θερμικής ροής για τη διάδοση της πυρκαγιάς, ΦW η επίδραση του ανέμου, ΦS η επίδραση της κλίσεως του εδάφους, Pb η φαινομενική επίδραση της πυκνότητας της καυστικής ύλης, Qig η θερμότητα προθερμάνσεως καυσίμου με την θερμοκρασία ανάφλεξης (τη θερμοκρασία που πρέπει να θερμάνουμε ένα καύσιμο με σκοπό να παράγει ατμό, ο οποίος αναφλέγεται όταν έρθει σε επαφή με γυμνή φλόγα).⁶

Η θερμική ένταση μιας πυρκαγιάς εκφράζει το ποσό της θερμότητας που εκλύεται ανά μέτρο φλεγόμενου μετώπου της πυρκαγιάς, αν IB η θερμική ένταση δασικής πυρκαγιάς (kW/m), W το φορτίο καύσης (kg/m²), R η ταχύτητα διάδοσης δασικής πυρκαγιάς (m/min), Q η θερμιδική αξία της καύσιμης ύλης (kJ/g), τότε η θερμική ένταση της πυρκαγιάς δίνεται από τον ακόλουθο τύπο.

$$IB=W*R*Q$$

Το μήκος της φλόγας συνδέεται με τη θερμική ένταση της πυρκαγιάς (IB) με τον ακόλουθο τύπο, όπου το FL δείχνει το μήκος της φλόγας του μετώπου της δασικής πυρκαγιάς (m)⁷:

$$IB = 258(FL)^{2,17}$$

2.1.2 Επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών

Κύκλος νερού

Οι δασικές πυρκαγιές επηρεάζουν τον κύκλο του νερού, με έντονες διαβρώσεις του εδάφους που βλάπτουν την ποιότητα του νερού. Αυξάνονται οι πλημμύρες, λόγω της αδυναμίας των δέντρων και του εδάφους να συγκρατήσουν τα νερά (που μπορεί να προέρχονται από τις βροχοπτώσεις) και διαβρώνεται το έδαφος με αποτέλεσμα την απώλεια παραγωγικών εδαφών και ερημοποίηση των περιοχών. Η καταστροφή που συντελείται λόγω

⁶ Καϊλίδη Δ., 1990

⁷ Byram, 1959

καταστροφής των εδαφικών οργανικών υλικών, αυξάνει την επιφανειακή απορροή και τη διάβρωση.⁸

Ποιότητα αέρα

Σημαντικές αλλοιώσεις στην ποιότητα του αέρα εμφανίζονται στις πληγέντες περιοχές, καθώς οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπής ατμοσφαιρικών ρύπων με αρνητικές επιπτώσεις στο οικοσύστημα και στην υγεία του ανθρώπου. Η καύση της βιομάζας επιβαρύνει τον ατμοσφαιρικό αέρα, με αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και σοβαρές αλλαγές στο μικροκλίμα της εκάστοτε περιοχής.⁹

Κλίμα

Ο καπνός που δημιουργείται, αυξάνει τις συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και τα αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας και προκαλεί τοπικές αλλαγές στο κλίμα. Τα σωματίδια του καπνού επιβαρύνουν τη ρύπανση των υδάτων και τη διάβρωση του εδάφους. Τα εκπεμπόμενα αέρια (CO₂, CH₄, N₂O, H₂O) σε συνδυασμό με το χημικά παραγόμενο τροποσφαιρικό όζον (O₃) επηρεάζουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου, τα εκπεμπόμενα σωματίδια σκεδάζουν την ακτινοβολία και ψύχουν την επιφάνεια της γης ενώ ο μαύρος άνθρακας απορροφά ακτινοβολία θερμαίνοντας την ατμόσφαιρα στα επίπεδα που βρίσκεται.

Κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις

Πέρα από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι πυρκαγιές προκαλούν και κοινωνικοοικονομικά προβλήματα. Τέτοια είναι η απώλεια των ανθρωπίνων ζωών, σοβαροί τραυματισμοί και απώλεια περιουσιακών στοιχείων. Επιπλέον, καταστροφή πόρων αναψυχής και βέβαια των θετικών επιδράσεων του δάσους στους ανθρώπους, τις καλλιέργειες και το περιβάλλον. Επιπροσθέτως, δημιουργείται αίσθημα ανασφάλεια και φόβο με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αστυφιλία. Σημαντικές οικονομικές επιπτώσεις παρατηρούνται από τη καταστροφή δομικών έργων (όπως κατοικιών και δημοσίων κτηρίων) και δαπάνες για δασοπροστασία.¹⁰

⁸ DeBano et al, 1998

⁹ Miranda et al., 2008

¹⁰ Δουλακάκη N., 2013

Τα προϊόντα των πυρκαγιών καταστρέφουν τις κρίσιμες υποδομές, όπως αυτοκινητόδρομοι, αεροδρόμια και λιμάνια, που εξαιτίας των καιρικών φαινομένων και των απότομων θερμοκρασιακών μεταβολών διαβρώνονται. Επιπλέον, είχαμε διαβρώσεις σε αρχαιολογικές περιοχές, όπως στην Αρχαία Ολυμπία το 2007. Επιπροσθέτως, συχνά μετά τη καταστροφή μιας δασικής έκτασης παρατηρείται αλλαγή των χρήσεων γης, όπως εκμετάλλευση των δασικών περιοχών με καλλιέργειες ή ακόμα χειρότερα με οικοδόμηση τους.

Υγεία

Τα προβλήματα υγείας για τα οποία ενοχοποιούνται οι πυρκαγιές είναι ασφυξίες (εξαιτίας του μονοξειδίου του άνθρακα), καρκινογενέσεις (υδρογονάνθρακες και διοξίνες), μεταλλάξεις (με μετατροπές στο γενετικό υλικό), συστηματικές τοξίνες (εξαιτίας των βαρέων μετάλλων) και πνευμονοπάθειες με τοξική δράση των σωματιδίων.¹¹

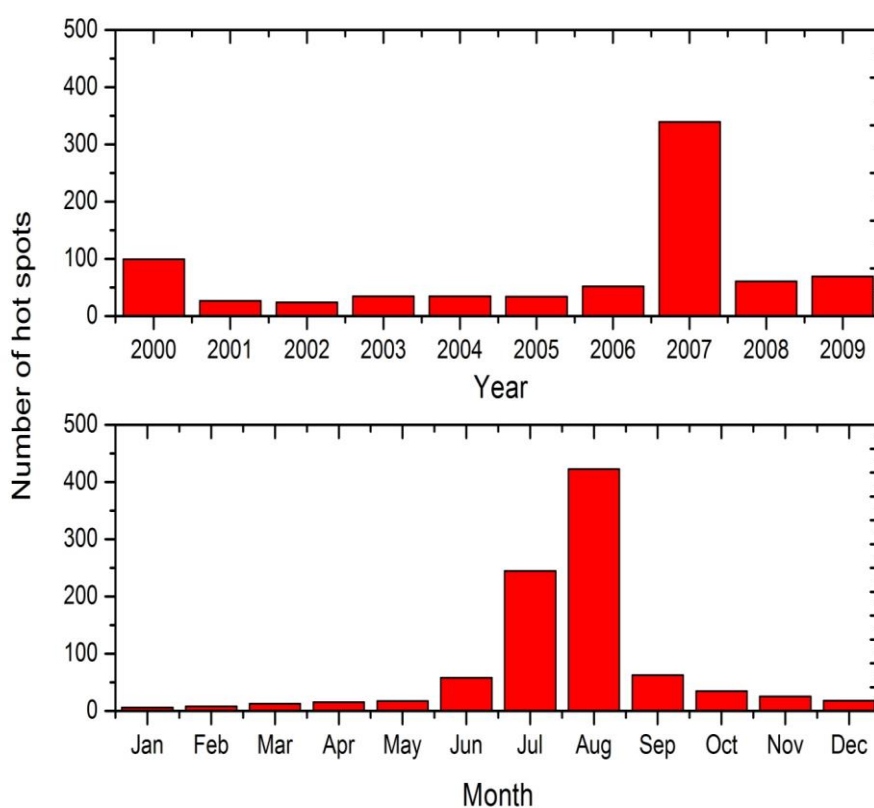


Εικόνα 3: Καταστροφή στο κέντρο της Αθήνας από έντονη βροχόπτωση συνέπεια της απώλειας πρασίνου, Οκτώβριος 2014 (Πηγή: Tribune)

¹¹ Dokas I. et. al.,2007

2.1.3 Στατιστικά στοιχεία πυρκαγιών στον Ελλαδικό χώρο

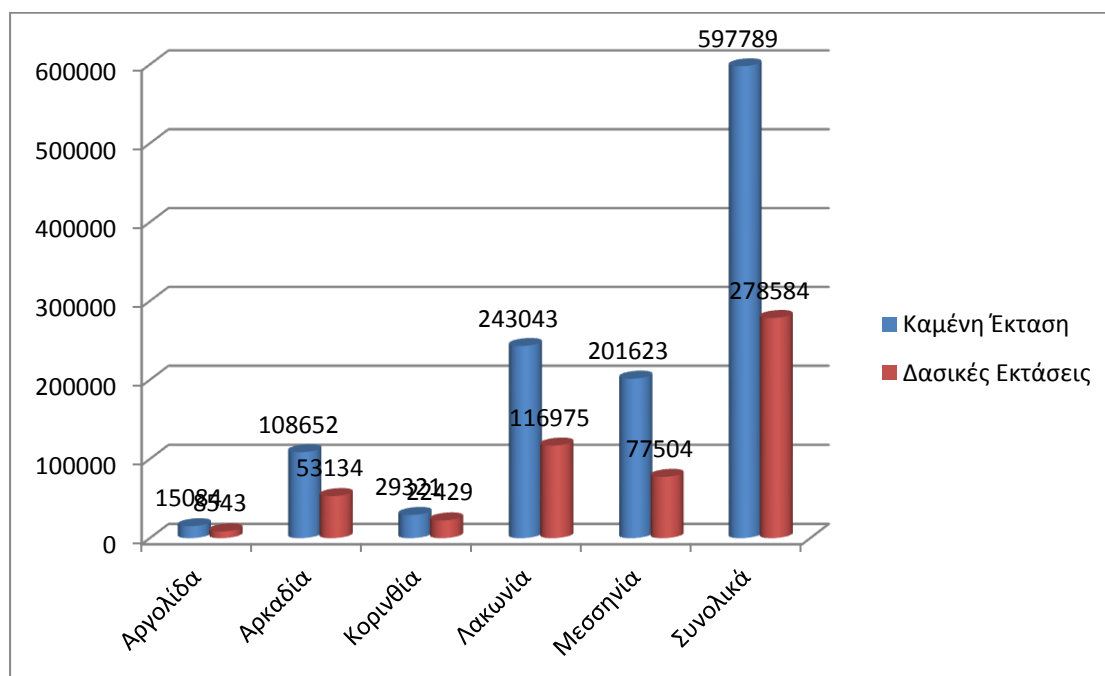
Στην Ελλάδα λαμβάνουν χώρα μεγάλες πυρκαγιές κάθε χρόνο με τις μεγαλύτερες να έχουν λάβει χώρα το 2000 και το 2007. Όσον αφορά τη κατανομή των πυρκαγιών κατά τη διάρκεια του έτους, μεγαλύτερη εμφάνιση έχουμε κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών και ιδιαίτερα κατά τον μήνα Αύγουστο, όπου οι υψηλές θερμοκρασίες και τα καλοκαιρινά μελέτμια που δημιουργούνται τους μήνες αυτούς επιδεινώνουν τη κατάσταση.



Εικόνα 4: Στατιστικά στοιχεία εμφάνισης πυρκαγιών ανά χρονιά και ανά μήνα (Πηγή: Sofiou et al., 2013)

Το 2007 στο σύνολο της ελληνικής επικράτειας σύμφωνα με στοιχεία της πυροσβεστικής έλαβαν χώρα 11.767 πυρκαγιές, οι οποίες έκαψαν συνολικά 2.623.764 στρέμματα από τα οποία τα 833.033 ήταν δασικές εκτάσεις. Μόνο

οι πυρκαγιές στη περιοχή της Πελοποννήσου έφθασαν τις 1599 και η καμένη έκταση ανήλθε στα 597.789 στρέμματα.¹²

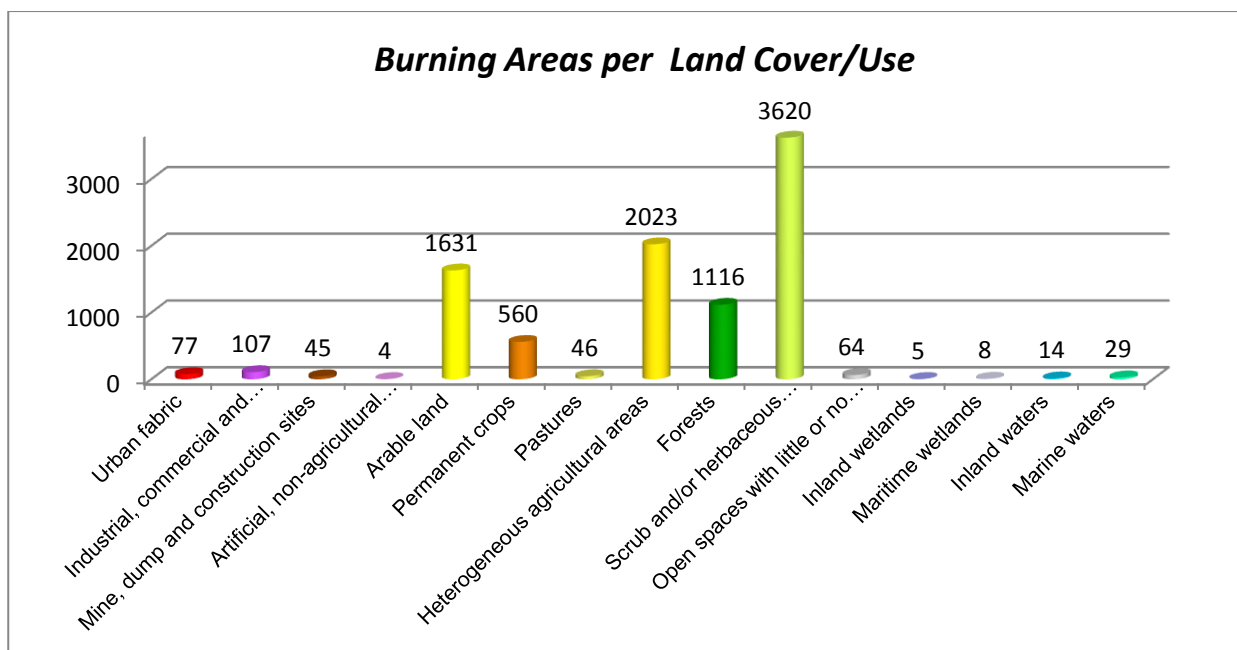


Διάγραμμα 1: Καμένες εκτάσεις (σε στρέμματα) στη Πελοπόννησο ανά νομό

Χρησιμοποιήθηκε το δορυφορικό εργαλείο Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (που βρίσκεται στον Terra και τον Aqua δορυφόρο) για να εντοπιστεί το σύνολο των πυρκαγιών στον ελλαδικό χώρο το διάστημα 2002-2013. Το εργαλείο ανιχνεύει τις θερμές πηγές με βάση την ακτινοβολία της γήινης επιφάνειας. Με τη χρήση του γεωγραφικού μήκους και πλάτους της εκάστοτε εστίας και με τη χρήση του λογισμικού ArcGis 10.2 συσχετίστηκαν οι πυρκαγιές με τον τύπο της εδαφικής κάλυψης που καταστρέφουν. Χρησιμοποιήθηκαν οι χρήσεις γης επιπέδου 2, που διαχωρίζουν τη γη σε 15 κατηγορίες.

Η πλειοψηφία των πυρκαγιών έλαβε χώρα σε θαμνώδεις περιοχές, καθώς και ετερογενείς και καλλιεργήσιμες γεωργικές περιοχές και δάση. Μόνο 10% των συνολικών πυρκαγιών έχουν ξεκινήσει από άλλου τύπου χρήσεων γης. Τα αποτελέσματα δίνονται αναλυτικά παρακάτω με τη μορφή διαγράμματος.

¹² Αρχείο Πυροσβεστικού Σώματος, <http://www.fireservice.gr/>



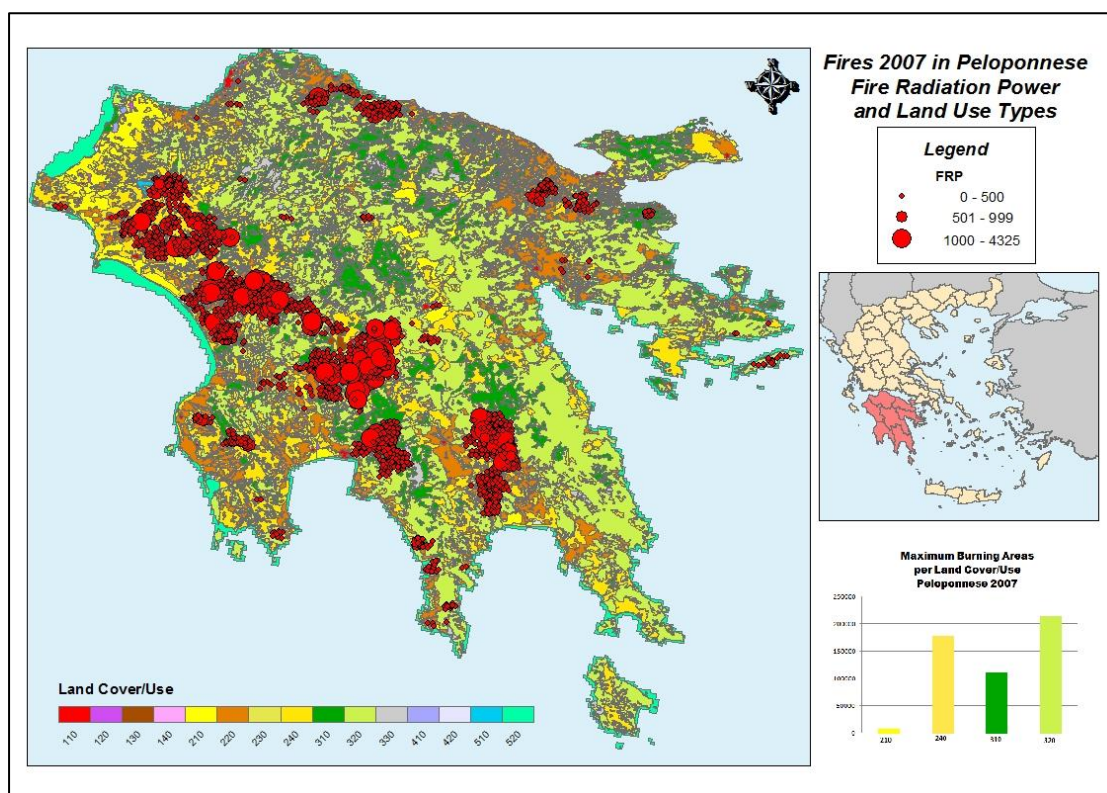
Διάγραμμα 2: Καμένες εκτάσεις ανά κατηγορία χρήσεων γης στον ελλαδικό χώρο το διάστημα 2002-2013

Κωδικός	Καλύψεις/Χρήσεις Γής Επιπέδου 2	
110	Urban fabric	Αστικός ιστός
120	Industrial, commercial and transport units	Βιομηχανικές, εμπορικές και μεταφορικές μονάδες
130	Mine, dump and construction sites	Ορυχείο, χωματερή και εργοτάξια
140	Artificial, non-agricultural vegetated areas	Τεχνητές, μη γεωργικές περιοχές με βλάστηση
210	Arable land	Καλλιεργήσιμη γη
220	Permanent crops	Μόνιμες καλλιέργειες
230	Pastures	Βοσκότοποι
240	Heterogeneous agricultural areas	Οι ετερογενείς γεωργικές περιοχές
310	Forests	Δάση
320	Scrub and/or herbaceous vegetation associations	Θάμνοι ή / και ποώδη βλάστηση ενώσεις
330	Open spaces with little or no vegetation	Ανοιχτοί χώροι με μικρή ή καθόλου βλάστηση
410	Inland wetlands	Χερσαίοι υγρότοποι
420	Maritime wetlands	Θαλάσσιοι υγρότοποι
510	Inland waters	Εσωτερικά ύδατα (Λίμνες, Ποτάμια)
520	Marine waters	Θαλάσσια ύδατα

Πίνακας 1: Καλύψεις / Χρήσεις Γής επιπέδου 2

Το εργαλείο MODIS, που βρίσκεται πάνω στον Aqua και Terra δορυφόρο, για να μπορέσει να μετρήσει την ένταση της ακτινοβολίας στην επιφάνεια του

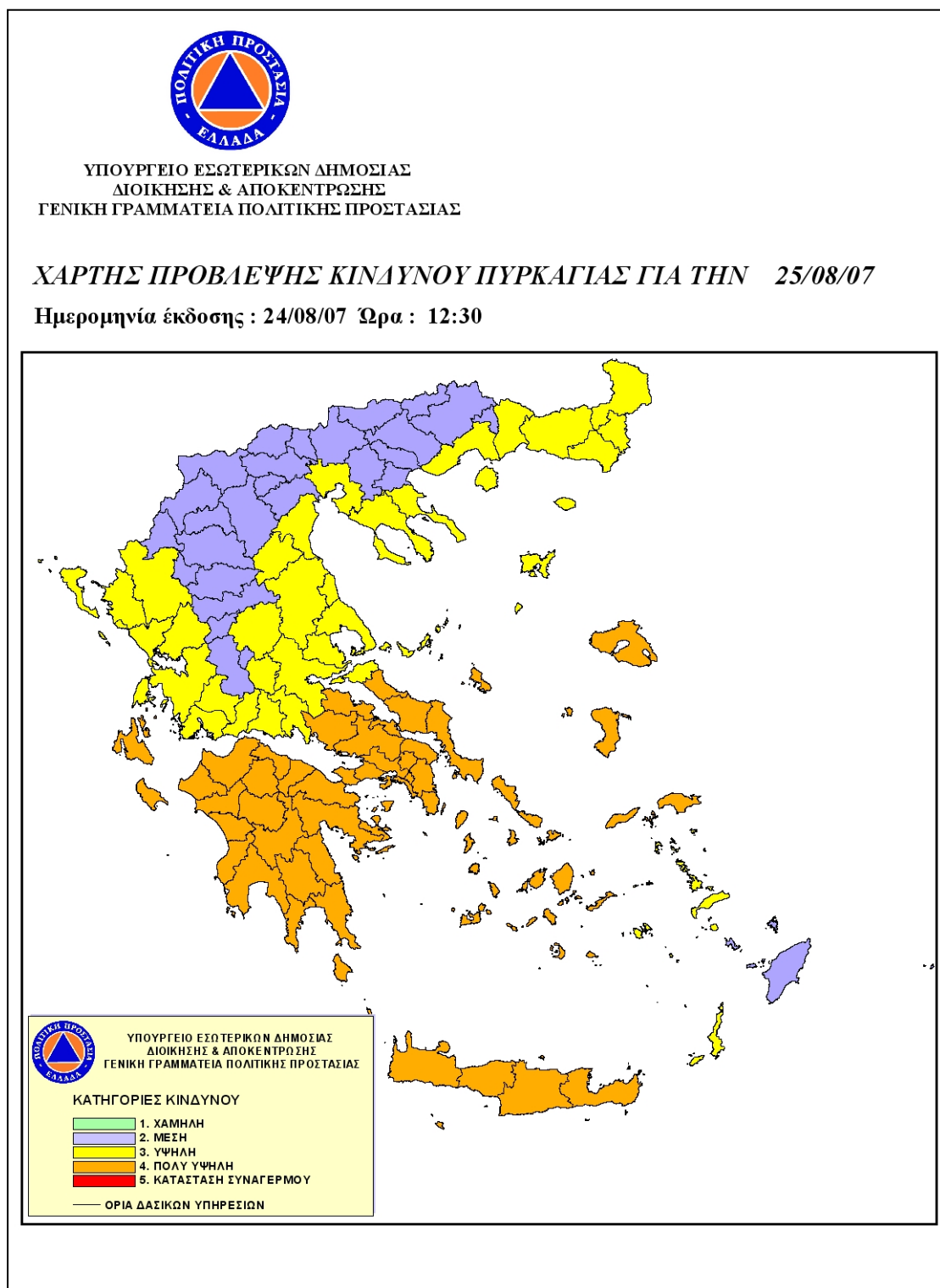
εδάφους και με τον τρόπο αυτό να εντοπίσει εστίες πυρκαγιάς, χρησιμοποιεί δεδομένα της θερμοκρασίας του εδάφους σε σχέση με την εκπεμπόμενη ακτινοβολία. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της έντασης της φωτιάς (Fire Radiation Power-FRP) με σκοπό να εντοπιστούν οι εστίες πυρκαγιών που έλαβαν χώρα στην περιοχή μελέτης μία συγκεκριμένη περίοδο. Επιπροσθέτως, χρησιμοποιήθηκε το σύνολο των χρήσεων γης της περιοχής με στοιχεία από το Αστεροσκοπείο Αθηνών, ώστε τελικά με τη χρήση του λογισμικού ArcGis να είναι εφικτή η οπτικοποίηση των δεδομένων, και να αποκτηθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα της κατάστασης που επικράτησε στην περιοχή μελέτης μας.



Χάρτης 1: Πυρκαγιές στην Πελοπόννησο 2007, σε συνδυασμό με τις χρήσεις γης

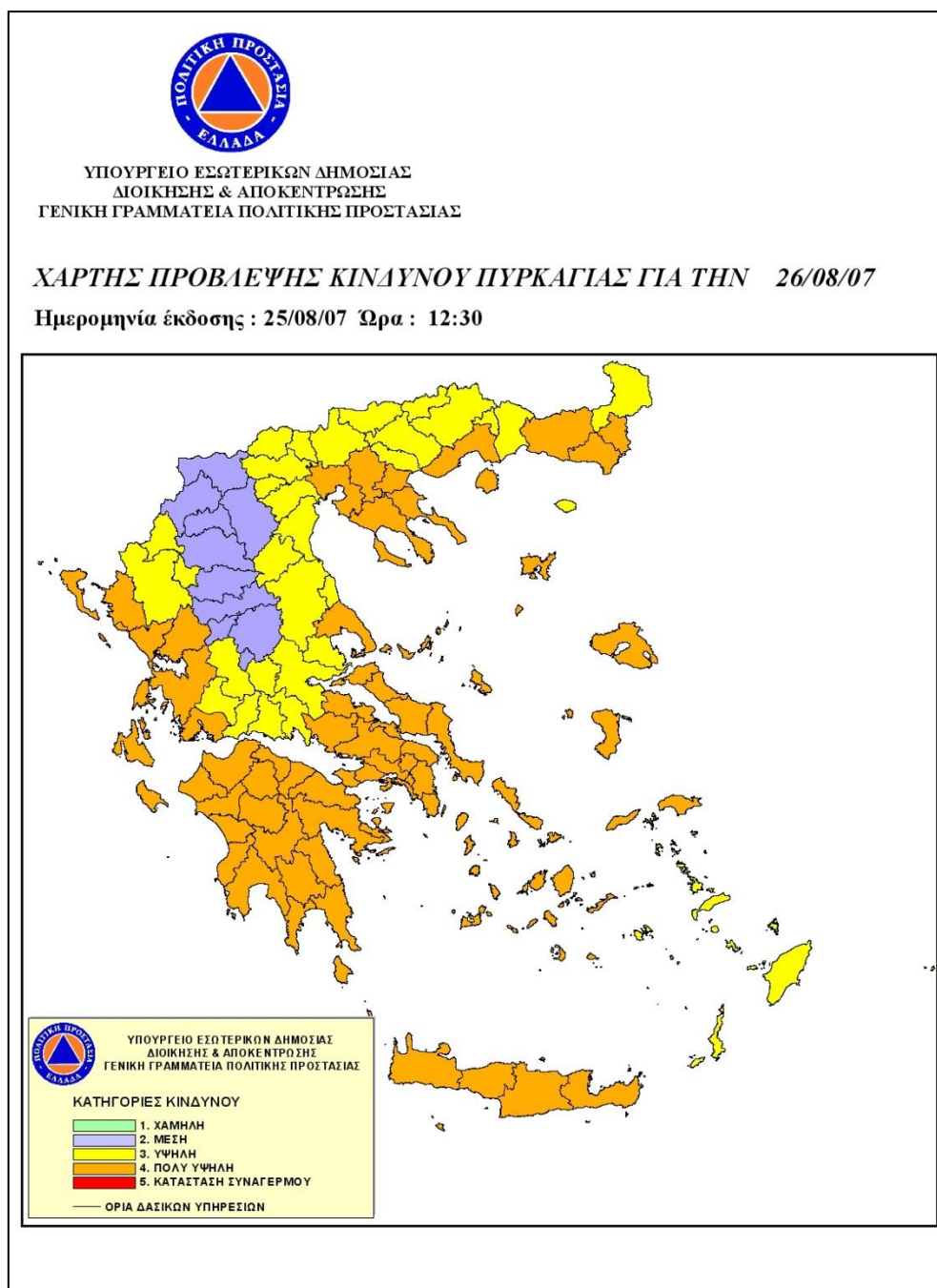
Από το συσχετισμό των χρήσεων γης της περιοχής με τη ένταση της εκάστοτε εστίας πυρκαγιάς, προέκυψε ότι, στην Πελοπόννησο (περιοχή μελέτης μας), το έτος 2007 έλαβαν χώρα ισχυρής έντασης πυρκαγιές, κυρίως στο δυτικό και νότιο τμήμα, με καταστροφή ως επί το πλείστον δασών και καλλιεργήσιμων εκτάσεων.

Το Υπουργείο Δημόσιας Διοίκησης και αποκέντρωσης, όλους τους καλοκαιρινούς μήνες δημιουργεί ημερήσιους χάρτες για το κίνδυνο που υπάρχει στη δημιουργία πυρκαγιάς στο σύνολο του ελλαδικού χώρου.



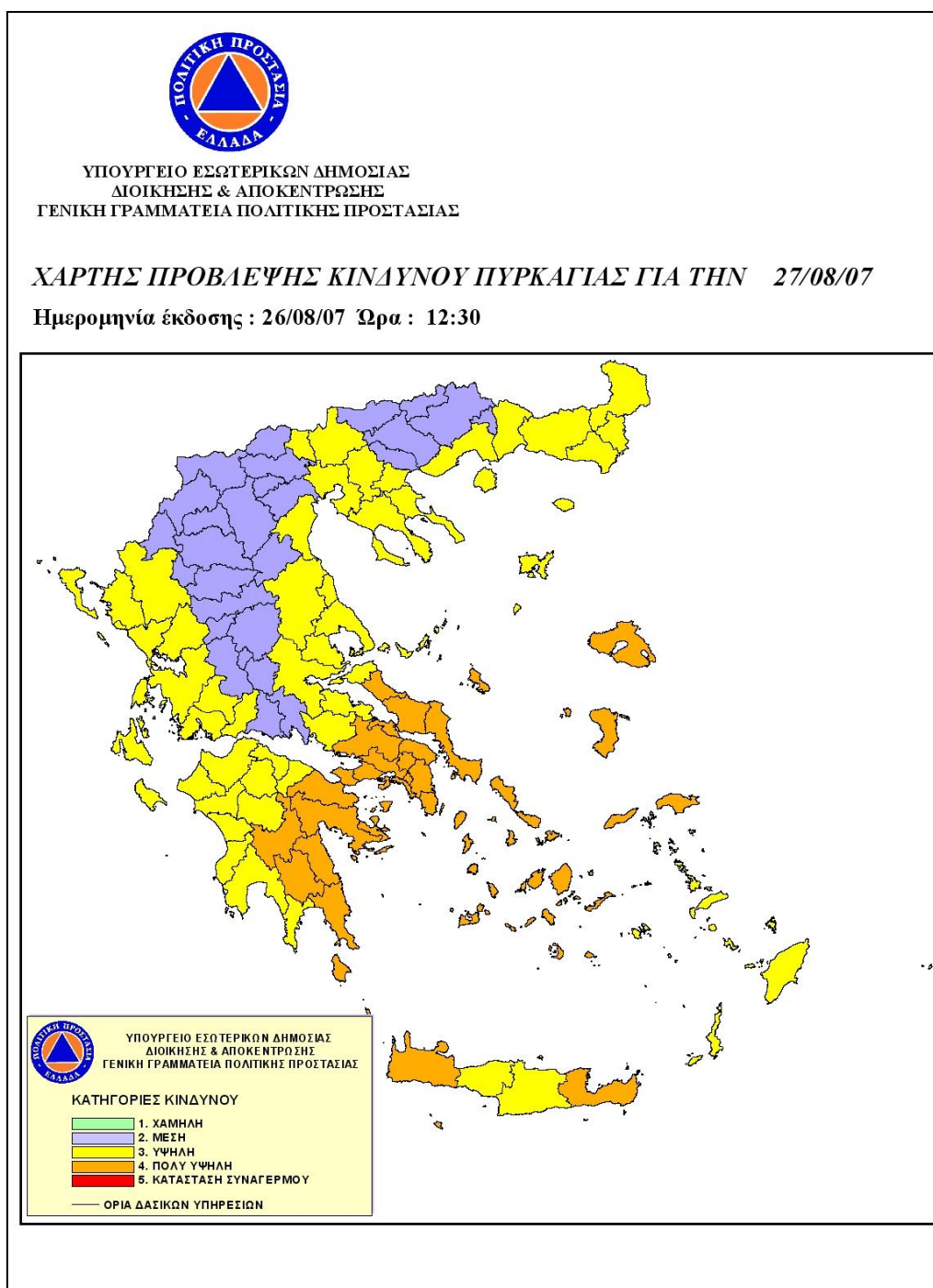
Χάρτης 2: Χάρτης Πρόβλεψης Κινδύνου πυρκαγιάς για 25/08/2007 (Υπουργείο Εσωτερικής Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, 2015)

Παρατηρούμε στον Χάρτη 2, ότι την ημέρα που ξεκίνησαν οι πυρκαγιές τις Πελοποννήσου που μελετήθηκαν (25/08/07) στην παρούσα εργασία, ο κίνδυνος για τη δημιουργία πυρκαγιών στη περιοχή της Πελοποννήσου ήταν πολύ υψηλός, όπως και τη δεύτερη ημέρα του γεγονότος (26/08/07-χάρτης 3), που είχαμε διαθέσιμη τροχιά από τον δορυφόρο.



Χάρτης 3: Χάρτης πρόβλεψης κινδύνου για τη δημιουργία πυρκαγιάς στις 26/08/2007 (Υπουργείο Εσωτερικής Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, 2015)

Τη τρίτη ημέρα των πυρκαγιών ο κίνδυνος για τη δημιουργία πυρκαγιών είναι χαμηλότερος στη περιοχή της Πελοποννήσου, από τις δύο προηγούμενες ημέρες, αλλά συνέχιζε να βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα, όπως μπορούμε να δούμε και στο χάρτη 4.

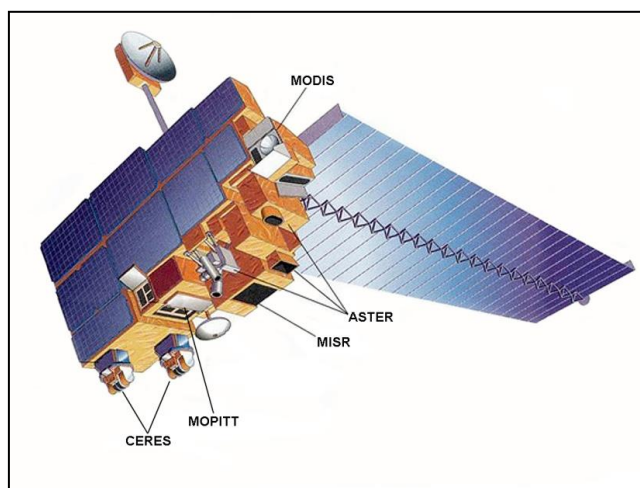


Χάρτης 4: Χάρτης πρόβλεψης κινδύνου για τη δημιουργία πυρκαγιάς της Τρίτη μέρα των πυρκαγιών 26/08/2007 (Υπουργείο Εσωτερικής Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, 2015)

2.2 Multi-angle Imaging SpectroRadiometer

2.2.1 Ο δορυφόρος Terra

Ο δορυφόρος Terra είναι ένας δορυφόρος της NASA που πήρε το όνομα του από τον πλανήτη Γη, ξεκίνησε τη πτήση του στις 18 Δεκεμβρίου 1999. Ο Terra έχει πολική τροχιά, βρίσκεται σε ύψος 705 km και ολοκληρώνει μία περιστροφή μέσα σε 99 λεπτά. Υπάρχουν 233 διαφορετικές τροχιές τις οποίες ακολουθεί. Κάθε 16 ημέρες ακολουθεί την ίδια ακριβώς διαδρομή. Συλλέγει δεδομένα με σκοπό τη μελέτη των κλιματολογικών αλλαγών πάνω στο πλανήτη Γη και τα καύσιμά του είναι αρκετά τουλάχιστον μέχρι το 2018.¹³ Πάνω του βρίσκονται πέντε αισθητήρες προηγμένης τεχνολογίας οι οποίοι παρακολουθούν τις αλληλεπιδράσεις της γήινης ατμόσφαιρας, του εδάφους, των ωκεανών και της ηλιακής ακτινοβολίας. Καθένας αισθητήρας έχει ειδική σχεδίαση με σκοπό να μπορεί να μελετήσει διαφορετικά επιστημονικά πεδία.

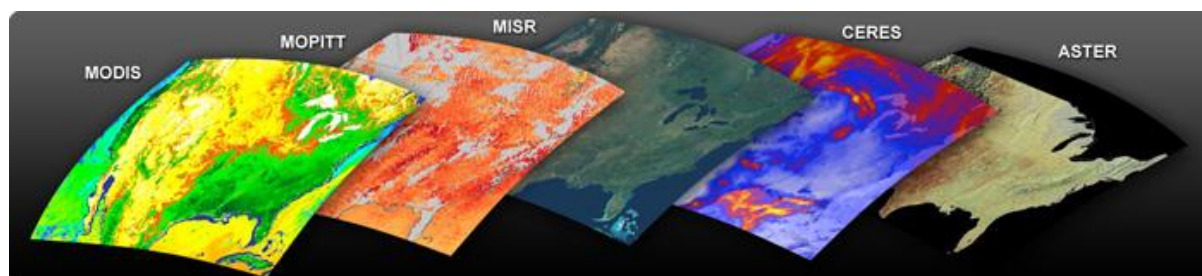


Εικόνα 5: Δορυφόρος Terra και η θέση των αισθητήρων πάνω του (NASA)

Οι πέντε αισθητήρες που είναι τοποθετημένοι πάνω στο δορυφόρο είναι ο αισθητήρας Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER), ένα Ιαπωνικό εργαλείο, που μελετά τις θερμικές εκπομπές, το Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT), ένα εργαλείο από τον Καναδά, που μετράει τη ρύπανση στην ατμόσφαιρα, το MODIS που είναι ένας αισθητήρας με μέτρια ανάλυση φασματομετρίας, και τέλος ο Multi-angle Imaging SpectroRadiometer (MISR) ένα φασματοφωτόμετρο πολλαπλών γωνιών. Τα πέντε εργαλεία που βρίσκονται

¹³ Nelson D. et al., 2013

πάνω στο δορυφόρο δίνουν τη δυνατότητα για ταυτόχρονη παρατήρηση διαφορετικών χαρακτηριστικών της ατμόσφαιρας και της γήινης επιφάνειας με τη πάροδο του χρόνου.

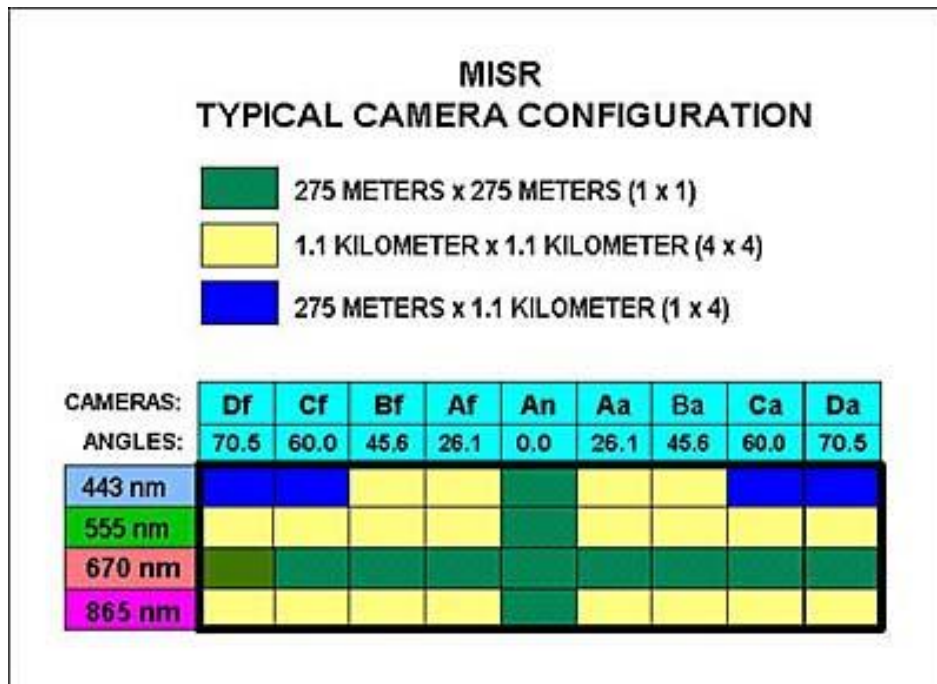


Εικόνα 6: Δεδομένα από τους πέντε αισθητήρες του δορυφόρου Terra (NASA-Terra)

2.2.2 Multi-angle Imaging SpectroRadiometer

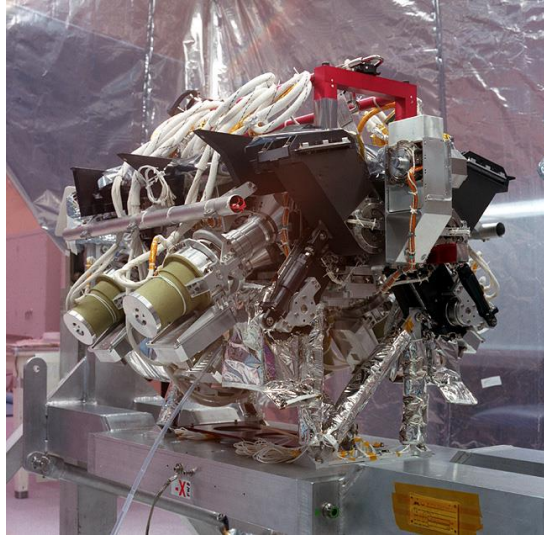
Ο αισθητήρας MISR είναι ένα πρωτότυπο σχεδιασμένο εργαλείο το οποίο παρατηρεί τη γήινη ατμόσφαιρα και επιφάνεια με εννέα διαφορετικές κάμερες, οι οποίες είναι τοποθετημένες σε διαφορετικές γωνίες. Οι κάμερες έχουν ονομαστεί με δύο γράμματα, το πρώτο είναι με τη σειρά τα γράμματα του αλφαβήτου, ενώ το δεύτερο εξαρτάται από τη θέση στην οποία βρίσκονται. Οι κάμερες που είναι στραμμένες στη μπροστινή μεριά της κίνησης του δορυφόρου έχουν το γράμμα «f» (front). Οι κάμερες που καταγράφουν από τη πίσω μεριά του δορυφόρου έχουν το γράμμα «a» (after). Τέλος η κάμερα που καταγράφει ακριβώς κάτω από το δορυφόρο (στο σημείο ναδίρ) έχει το γράμμα «n» (nadir) (Df:70.5°, Cf:60.0°, Bf:45.6°, Af:26.1°, An:0.0°, Aa:26.1°, Ba:45.6°, Ca:60.0°, Da:70.5°.), κάθε κάμερα έχει διαφορετική χωρική διακριτική ικανότητα στο έδαφος και διαφορετική ευαισθησία στα μήκη κύματος, όπως φαίνεται στην έβδομη εικόνα.¹⁴

^{14,4} Nelson D. et al., 2009



Εικόνα 7: Εννέα κάμερες του οργάνου MISR η χωρική διακριτική ικανότητα της κάθε κάμερας (MISR Science team, 2014)

Οι πληροφορίες για κάθε περιοχή λαμβάνονται διαδοχικά, όπως περνάει ο δορυφόρος και σε τέσσερα μήκη κύματος, κόκκινο, πράσινο, μπλε (RGB) και κοντινό υπέρυθρο (near-IR). Οι κάμερες καλύπτουν 275 μέτρα στο έδαφος στα 12 από τα 36 κανάλια του MISR, στο κόκκινο κανάλι σε όλες τις κάμερες και στα τέσσερα κανάλια στη κάμερα του ναδύρ. Χάρη τις εννέα κάμερες που βρίσκονται σε διαφορετικές γωνίες, όπως αναφέραμε πάνω στο δορυφόρο, επιτυγχάνεται μια τρισδιάστατη οπτικοποίηση της περιοχής (3D). Οι κάμερες σε διαφορετικές γωνίες παρέχουν τη δυνατότητα παρατήρησης της κίνησης τόσο των νεφών, όσο φαινομένων σκόνης και καπνού (από πυρκαγιές και ηφαίστεια).



Εικόνα 8: Κύριο τμήμα του MISR (MISR Science Team, 2014)

Με το πέρασμα του δορυφόρου Terra το εργαλείο ανιχνεύει το σύνολο των αερολυμάτων και των υδροσταγονιδίων που βρίσκονται τόσο πάνω στη στεριά, όσο και πάνω από τον ωκεανό. Για να μπορέσει να υπολογιστεί το ύψος που έχουν τα σύννεφα και ο καπνός, απαραίτητη προϋπόθεση είναι η απόσταση να είναι τουλάχιστον 500 m σε 1,1 km οριζόντιας ανάλυσης.¹⁵

Τα δεδομένα που συλλέγονται από το δορυφόρο στέλνονται στο Langley Research Center (LaRC) DAAC στη Βιρτζίνια, όπου και ταξινομούνται σε τρία διαφορετικά επίπεδα ανάλογα με τη χρήση τους. Στο πρώτο επίπεδο βρίσκονται τα δεδομένα με ραδιομετρική και γεωμετρική βαθμονόμηση, για υψηλής ανάλυσης δεδομένα, στο δεύτερο επίπεδο έχουμε μετρήσεις βαθμονόμησης της ακτινοβολίας, ιδανικές για μελέτη αερολυμάτων (όπως σύννεφα και άνεμο) και το τρίτο επίπεδο περιέχει στατιστικά στοιχεία και κλιματολογικά μοντέλα.

2.2.2.1 Ευαισθησία στο φως

Πολλές εικόνες που προέρχονται από το MISR είναι αρκετά σκούρες, όπως από αερολύματα πάνω από την υδάτινη επιφάνεια. Υπάρχουν βέβαια άλλες περιοχές με ιδιαίτερα υψηλή αντίθεση ανάκλασης, όπως περιοχές πάνω από ωκεανούς και λίμνες που περιβάλλονται από φωτεινό έδαφος. Το εργαλείο έχει υψηλή ευαισθησία σε ένα μεγάλο φάσμα ανάκλασης από 0,02% μέχρι

¹⁵ Kahn et al., 2008

100%. Η ευαισθησία του έχει υπολογιστεί σε σχετικά θολή ατμόσφαιρα (ορατότητα περίπου 8 km).

Για να μελετηθούν αλλαγές και επιδράσεις του κλίματος χρειάζεται μια ιδιαίτερα μακροχρόνια μελέτη παγκοσμίως, που δεν είναι εφικτή γιατί το αναγκαίο διάστημα παρακολούθησης είναι ιδιαίτερα μεγάλο και υπερβαίνει τη ζωή ενός δορυφόρου. Για να επιτευχθεί η παρακολούθηση και η μελέτη των αλλαγών της γης, πρέπει να πραγματοποιηθεί μια πλήρης βαθμονόμηση και συνεργασία των πληροφοριών από διάφορους αισθητήρες, όπως οι δορυφόροι Landsat και τα υπόλοιπα εργαλεία στον Terra.

Για να μπορέσει να προσφέρει σημαντική πληροφορία προς εκμετάλλευση, ο MISR βαθμονομήθηκε με σύγχρονες τεχνικές, με διάφορες δοκιμές πριν την λειτουργία του στο διάστημα. Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε δορυφόρο ένα υλικό, που ονομάζεται «Spectralon» και επιτυγχάνει την ομοιόμορφη ανάκλαση. Το υλικό περιστρέφεται σε ένα οπτικό πεδίο, αντανακλώντας διάχυτα το φως από τον ήλιο απευθείας στο εσωτερικό, όπου παρακολουθείται όχι μόνο από τις κύριες μηχανές του οργάνου, αλλά από μια σειρά μηχανών που ελέγχουν τα επίπεδα του φωτός.¹⁶

2.3 MISR INteractive eXplorer

Το MISR INteractive eXplorer (MINX) είναι ένα λογισμικό που δημιουργήθηκε με σκοπό να οπτικοποιήσει τα δεδομένα από το MISR και να παρέχει πληροφορίες σχετικά με το ύψος και τη ταχύτητα των αερολυμάτων, συνδυάζοντας τον άνεμο και το ύψος τους σε υψηλής ανάλυσης δεδομένα, με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας. Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι γραμμένο σε γλώσσα IDL (Interactive Data Language), παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες να μελετήσουν τα αερολύματα με διαφορετικές παραμέτρους, όπως η κατεύθυνση του ανέμου. Το πρόγραμμα είναι διαθέσιμο στην ιστοσελίδα Open Channel Foundation. Από το 2006 χρησιμοποιείται για μελέτη του καπνού για κλιματολογικές μελέτες και μελέτη της ποιότητας της ατμόσφαιρας.

Δεδομένα εδάφους απαιτούνται από τις εννέα κάμερες με σκοπό να αποκτήσουν πληροφορία για το ύψος και τον άνεμο πάνω από το έδαφος. Τα προϊόντα γεωμετρικής παραμέτρου παρέχουν δεδομένα από ζενίθ και

¹⁶ MISR Science Team

αζιμούθια προβολή με ανάλυση 17.6 km κάθε κάμερα. Όλα τα δεδομένα που χρειάζονται βρίσκονται αποθηκευμένα με 1.1 km χωρική ανάλυση και ένα ξεχωριστό φάκελο για κάθε μια από τις 233 διαφορετικές διαδρομές του MISR. Δεν απαιτούνται δεδομένα δευτέρου επιπέδου για την ανάκτηση των υψομέτρων, αλλά μπορούν να ανακτηθούν τρία ακόμα προϊόντα. Μπορούν να δημιουργηθούν διαγράμματα σχετικά για το οπτικό βάθος των σωματιδίων, το καπνό, τη σκόνη, τα σύννεφα και το έδαφος μέσω μηχανών διανυσματική μάθησης (Support Vector Machine-SVM).¹⁷

Το MINX είναι ένα λογισμικό που δημιουργήθηκε από το EPA και τη NASA, σε συνεργασία με διάφορους ερευνητές από άλλα πανεπιστήμια όπως το πανεπιστήμιο του Harvard και Michigan. Το λογισμικό αυτό είναι ένα βασικό εργαλείο για την ανάλυση, την επεξεργασία και την απεικόνιση των δεδομένων από το δορυφορικό εργαλείο MISR. Ειδικεύεται στην μελέτη κλιματολογικών φαινομένων, όπως μελέτη μεταφοράς της ενέργειας και του άνθρακα μεταξύ της επιφάνειας της γης και της ατμόσφαιρας, καθώς και διαφόρων παραμέτρων σχετικών με παγκόσμιες επιπτώσεις στο κλίμα, όπως παρακολούθηση ατμοσφαιρικών σωματιδίων και συννέφων. Χρησιμοποιείται ειδικά για την ανάλυση καπνού, ηφαιστειών και σκόνης από καπνούς.

Η δυνατότητα προβολής της τροχιάς του δορυφόρου σε τρισδιάστατη εικόνα είναι ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα που μας παρέχεται. Με αυτό τον τρόπο είναι πιο εύκολο να παρατηρηθεί ένα φαινόμενο, το οποίο θα ήταν δύσκολο να παρατηρηθεί μέσω μιας μόνο κάθετης προβολής. Κατά τη διάρκεια της φόρτωσης των εικόνων η ακτινοβολία τροποποιείται στο ανώτερο στρώμα της ατμόσφαιρας μέσω της ανάκλασης με βάση τον ακόλουθο τύπο, όπου I είναι η ακτινοβολία (σε μονάδες $W sr^{-1} m^{-2}$), μ_0 είναι το συνημίτονο της ζενίθ γωνίας του ηλίου και το F_0 είναι η τιμή της ακτινοβολίας του ήλιου, με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται ο ανακλαστικότητα με διαφορετικές γωνίες θέασης και φωτισμού (Bidirectional Reflectance Factor-BRF).

$$BRF = \frac{\pi I}{\mu_0 F_0}$$

¹⁷ Nelson et al., 2013

Υπάρχει η δυνατότητα να εισαχθούν τα σημεία με υψηλές θερμοκρασιακές ανωμαλίες (όπως φωτιές) τα οποία παρατηρούνται από το δορυφόρο MODIS και με τον τρόπο αυτό να εντοπιστεί πολύ εύκολα η εστία μια πυρκαγιάς.¹⁸

Η διεύθυνση του ανέμου ορίζεται χρησιμοποιώντας διαφορετικά σημεία που δεν βρίσκονται αναγκαστικά στην ίδια γραμμή τα οποία δημιουργούν με τη μέθοδο της παρεμβολής τη κατεύθυνση του ανέμου. Τη περιοχή που καταλαμβάνει ο καπνός που θέλουμε να μελετήσουμε χρειάζεται να τη ψηφιοποιήσουμε και στη συνέχεια να ορίσουμε τη διεύθυνση του ανέμου. Κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα διάγραμμα στο οποίο φαίνεται το προφίλ του ύψους, όπου έχουμε το «zero-wind height», «wind-corrected height» και «terrain height» (ύψος εδάφους).¹⁹

Το «zero-wind height» μετράει το ύψος με τη παρατήρηση από δορυφορική μετατόπιση ή γεωμετρική παράλλαξη και το «wind-corrected height» μετράει το ύψος θεωρώντας ότι η κάθετη μετατόπιση του καπνού προκαλείται από τον άνεμο, τη ταχύτητα και τη διεύθυνση η οποία έχει οριστεί με αυτόματο τρόπο από τις κάμερες.²⁰

Στη συνέχεια, έχουμε το προφίλ του ανέμου, όπου φαίνεται ο άνεμος κάθετα στη τροχιά του δορυφόρου (across-track) και κατά μήκος της τροχιάς του (along-track). Οι θετικές τιμές του ανέμου απεικονίζουν τη κίνηση από αριστερά προς τα δεξιά της τρισδιάστατης εικόνας στο λογισμικό, που δείχνει άνεμο με πνοή από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Από την άλλη μεριά οι θετικές τιμές του ανέμου κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου δείχνουν κίνηση από τη βάση προς τη κορυφή της τρισδιάστατης εικόνας στο παράθυρο του MINX, που αντιστοιχούν σε ανέμους που πνέουν από το νότο προς το βορρά. Η ταχύτητα του ανέμου (w_s) υπολογίζεται με τη ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων του κάθετου ανέμου (v_{ct}) και αυτού κατά μήκος της τροχιάς (v_{at}), δηλαδή η μέση συνιστώσα, όπως φαίνεται στον ακόλουθο τύπο:

$$w_s = \sqrt{v_{at}^2 + v_{ct}^2}$$

¹⁸ Justice et al., 2002

¹⁹ Nelson et al., 2008

²⁰ Val Martin et al., 2010

Επειδή όλα τα στοιχεία του ύψους και του ανέμου απεικονίζονται στο ίδιο διάγραμμα, μπορούν να υπάρχουν πολλαπλά ύψη, ταχύτητες ανέμου και ύψος εδάφους στην ίδια γραμμική απόσταση από την πηγή.²¹

Για να μπορέσει να δοθεί μια ολοκληρωμένη εικόνα από το πέρασμα του δορυφόρου, υπάρχει ένας αλγόριθμος με τον οποίο συλλέγονται πληροφορίες από όλες τις κάμερες. Όλες οι κάμερες στο πίσω μέρος του δορυφόρου, με τη χρήση του αλγορίθμου συσχετίζονται με τη κάμερα Aη (κάμερα ναδίρ) με σκοπό να αποκτηθούν στερεογραφικές προβολές κατά τη διάρκεια της τροχιάς, καθώς και οπτική σε γεγονότα τα οποία δεν είναι ορατά με τη κάμερα στο σημείο ναδίρ, με ελαχιστοποίηση του σφάλματος.

Με σκοπό να μειωθούν τα σφάλματα στις προβολές των υψομέτρων για κάθε ζευγάρι προβολών θα πρέπει να υπάρχει ο μέγιστος βαθμός ακρίβειας, για κάθε εικονοστοιχείο (pixel), το οποίο αντιστοιχεί σε 275 m στην γήινη επιφάνεια. Το σφάλμα στο ύψος ενός καπνού είναι της τάξης των 560 m.²²

Με βάση τη μελέτη από 40 τροχιές, το σφάλμα που δημιουργείται είναι καλύτερο από 1 εικονοστοιχείο, ο μέσος όρος του σφάλματος από τις κάμερες Ca, Ba, Bf, Aa είναι 0.01,

Κάμερα	Μέσος όρος σφάλματος ανά κάμερα
Cf	0.03
Df	-0.03
Da	-0.04
Af	0

Πίνακας 2: Μέσος Όρος Σφάλματος ανά κάμερα στο εργαλείο MISR (Πηγή: Davies et al., 2007)

Η τυπική απόκλιση από τις κάμερες ανέρχεται από 0.14 μέχρι 0.26. Μόνο συγκεκριμένος αριθμός εικονοστοιχείων, λιγότερα από N εικονοστοιχεία, αναλύονται σε σύνδεση με την ατμόσφαιρα πάνω από το γήινο έδαφος. Ο

²¹ Nelson et al., 2008

²² Davies et al., 2007

αριθμό N των εικονοστοιχείων εξαρτάται από την κάμερα (οι κάμερες A και B έχουν $N=2$).²³

Με την επεξεργασία των αποτελεσμάτων με το λογισμικό MINX οπτικοποιούνται τα δεδομένα από τη τροχιά του δορυφόρου και παρουσιάζεται μια εικόνα με χρονολογική σειρά από τις μπροστινές προς τις πίσω κάμερες. Οι θέσεις που βρίσκονται οι κάμερες και το μήκος της παράλληλης τροχιάς του δορυφόρου με την επιφάνεια της γης είναι τα δύο στοιχεία που συνυπολογίζονται για τη στερεοσκοπική προβολή και τον υπολογισμό του ύψους και του ανέμου.

Η οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων γίνεται με σκοπό να βρεθούν οι τρεις παράμετροι που μας ενδιαφέρουν το ύψος, η ταχύτητα του ανέμου κατά μήκος της τροχιάς και η ταχύτητα του ανέμου στην οριζόντια τροχιά. Για να υπολογιστεί το ύψος χωρίς την επιρροή του ανέμου (κατά μήκος και οριζόντια της τροχιάς) χρησιμοποιείται η κίνηση της οριζόντιας τροχιάς που είναι μηδενική, καθώς και η κίνηση κατά μήκος της τροχιάς, η οποία ευθύνεται εξ ολοκλήρου στη παράλλαξη (η γωνία υπό τη οποία προβάλλεται η γήινη επιφάνεια). Το ύψος στη περίπτωση αυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$d = h \tan \Theta$$

όπου το d εκφράζει τις ανισότητες μεταξύ της τροχιάς ανάμεσα στη κάθετη (Αη κάμερας) και τις άλλες προβολές, το h εκφράζει το ύψος και Θ είναι η γωνία που σχηματίζεται η κάμερα του ζενίθ με τις εκτός ζενίθ κάμερα.

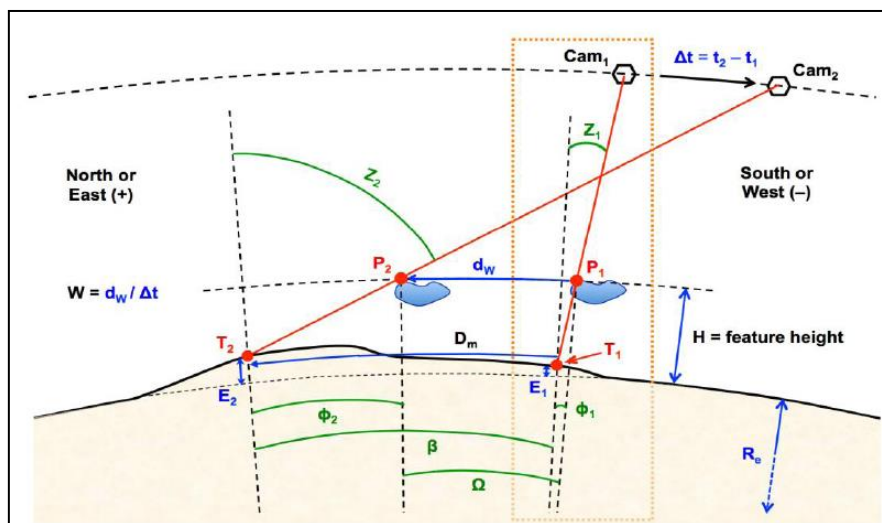
Ο υπολογισμός του ύψους κατά μήκος και κάθετα της τροχιάς, γίνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο με τις δύο κάμερες που προαναφέραμε. Στη προκειμένη περίπτωση, έχουμε δυο αγνώστους (τα ύψη και τον άνεμο κατά μήκος της τροχιάς), με διαθέσιμη τιμή μόνο από μια μέτρηση (τις διαφορές κατά μήκος της τροχιάς) για να συσχετιστούν. Ο αλγόριθμος που δίνει το MINX επιτρέπει στο χρήστη να ορίσει μόνος του διεύθυνση ανέμου, που δυσκολεύει στην επίλυση του προβλήματος. Για κάθε σημείο που βρίσκεται πάνω στη γραμμή, της διεύθυνσης του ανέμου, δημιουργείται μια καμπύλη, η οποία απεικονίζει τη διεύθυνση και τη κίνηση του υπό μελέτη φαινομένου με βάση το ακόλουθο τύπο:

²³ Jovanovic et al., 2007

$$S = \frac{D_{along}}{D_{across}} = \frac{v_{at}}{v_{ct}}$$

όπου S είναι η καμπύλη της γραμμής της διεύθυνσης, D η απόσταση μεταφοράς στην κατά μήκος και κάθετα της τροχιάς, ενώ τα v_{at} και v_{ct} δείχνουν τη συνιστώσα του ανέμου στις δύο διευθύνσεις.²⁴

Για να επιτευχθεί στερεογραφική προβολή της σφαιρικής επιφάνειας της γης (για τοπική επαλληλία με το υψόμετρο της γης), χρησιμοποιείται ξεχωριστός αλγόριθμος για τον υπολογισμό του «zero-wind» και του «wind-corrected». Ο συσχετισμός γίνεται με δεδομένα από την Αη κάμερα και τις κάμερες μπροστά και πίσω από το δορυφόρο, επίσης υπολογίζεται η διαφορά του χρόνου μεταξύ των παρατηρήσεων ($\Delta t > 0$). Η τελική εικόνα επηρεάζεται από την ακτίνα καμπυλότητας R_e , το ύψος του εδάφους στις δύο λήψεις (E_1 και E_2) σε δύο σημεία του εδάφους (T_1 και T_2), όπου κάθε κάμερα επικεντρώνει τη λήψη και τέλος τη γωνία κατά μήκος της τροχιάς Z_1 και Z_2 , για να μπορέσει να γίνει συσχέτιση των δύο λήψεων.

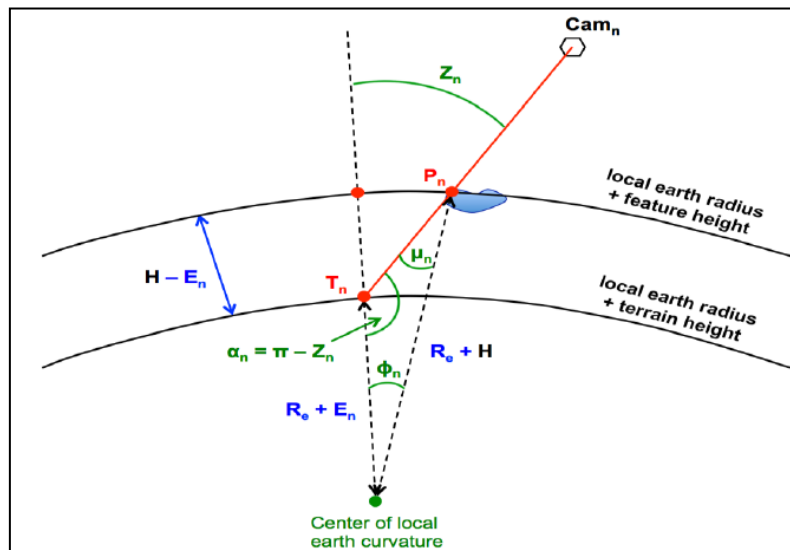


Εικόνα 9: Γεωμετρική απεικόνιση του υπολογισμού του ύψους του «wind-corrected» και της ταχύτητας του ανέμου, από το συσχετισμό των δύο δεδομένων από τις δύο κάμερες (Nelson et al., 2013)

Η λήψη από μια μόνο κάμερα έχει σημαντικές ενδιάμεσες μεταβλητές, που επηρεάζουν τη τελική εικόνα, όπως οι γωνίες και οι αποστάσεις που

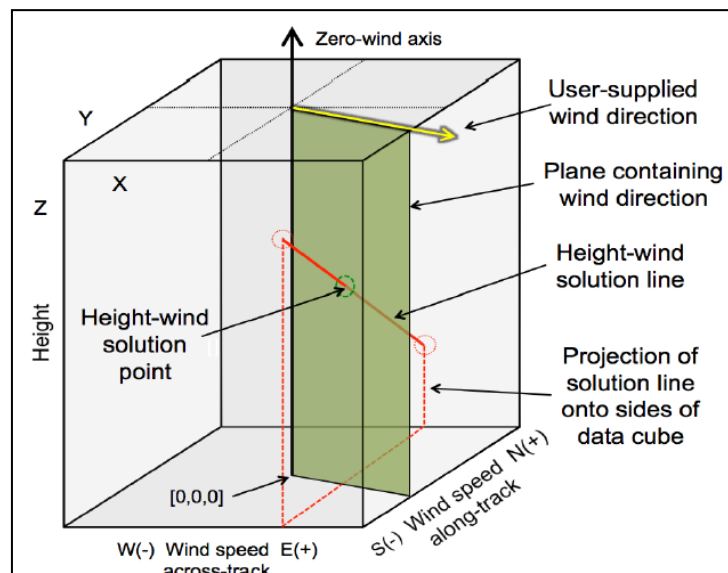
²⁴ Moroney et al., 2002

διανύονται από τη κάθε κάμερα μέχρι το σημείο μελέτης ενός φαινομένου και το ύψος από την επιφάνεια της γης.



Εικόνα 10: Λεπτομέρειες γεωμετρικής απεικόνισης από τη μια κάμερα (πορτοκαλί κουτί εικόνας 9) (Nelson et al., 2002)

Υπάρχει γραμμική συσχέτιση μεταξύ των δύο υψών (κατά μήκος και κάθετα της τροχιάς), για να δημιουργηθεί ένα ζεύγος του ύψους και του ανέμου. Τα δεδομένα του κύβου (εικόνα 11) απεικονίζουν με λεπτομέρεια τα χαρακτηριστικά του ύψους και της ταχύτητας του ανέμου.



Εικόνα 11: Κύβος απεικόνισης του μοντέλου του MINX για στερεοσκοπική απεικόνιση ενός μοναδικού σημείου από μια κάμερα (Nelson et al., 2013)

Το ύψος απεικονίζεται στο άξονα Z της εικόνας 11, ενώ οι ταχύτητες φαίνονται στους άξονες Y και X. Η ταχύτητα του ανέμου κάθετα της τροχιάς είναι αρνητική προς τα Δυτικά, ενώ κατά μήκος της τροχιάς αρνητική προς το Νότο.

Μετά τη ψηφιοποίηση του καπνού, ο χρήστης καλείται να ορίσει τη κατεύθυνση του ανέμου, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα με το κίτρινο βέλος. Η κόκκινη περιοχή απεικονίζει το σύνολο των δεδομένων από τις κάμερες, ενώ το η περιοχή που τονίζεται με πράσινο δείχνει το ύψος και τον άνεμο ενός συγκεκριμένου σημείου.

Για την απόκτηση της τελικής πληροφορίας ενώνονται τα δεδομένα από όλες τις κάμερες και δημιουργείται μια τελική εικόνα από το ύψος και τον άνεμο στη περιοχή μελέτης. Έτσι δημιουργείται ένα προφίλ από το μέσο ύψος και δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου, τα οποία εμφανίζουν μεγαλύτερη διασπορά κοντά στις μέσες τιμές. Το κατώτερο όριο της τροχιάς υπολογίζεται με γραμμική εξίσωση της οποίας ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η μέση τιμή του ύψους και η ταχύτητα του ανέμου.

Κατά τη διάρκεια της πρώτης μετρήσεως (ομαδοποιημένου περάσματος) η κλίση της εξίσωσης του ύψους υπολογίζεται σε 0,45 και η απόσταση αναχαίτισης του ανέμου σε 0,75 km. Στη δεύτερη μέτρηση υπολογίζονται αντίστοιχα 0,3 κλίση και απόσταση αναχαίτισης 0,5 km. Για την ταχύτητα του ανέμου με το πρώτο πέρασμα, έχουμε κλίση 1 και ταχύτητα 10,0 m/s. Η ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με το ύψος του, παρουσιάζει μεγαλύτερες διακυμάνσεις και για το λόγο αυτό το κατώτερο όριο της ταχύτητας ποικίλει.

Η διεύθυνση του ανέμου είναι το πιο σημαντικό στοιχείο που εισάγει ο χρήστης στο λογισμικό MINX, διότι με ένα λανθασμένο ορισμό της διεύθυνσης του ανέμου σε ένα σύνολο αερολυμάτων με γρήγορη κίνηση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την λανθασμένη διόρθωση κατά αρκετά χιλιόμετρα του ύψους λόγω του ανέμου («wind-corrected»).

Η κίνηση κάθετα στη τροχιά του δορυφόρου είναι ένας αξιόπιστος δείκτης της πραγματικής κάθετης τροχιάς, είναι ανέφικτο να χαρακτηριστούν τα αερολύματα με μόνο μια συνιστώσα της κίνησης κατά μήκος της τροχιάς του δορυφόρου. Σημαντική πηγή πληροφορίας για τον καθορισμό της διεύθυνσης του ανέμου αποτελούν οι σκιές από τα αερολύματα πάνω στην επιφάνεια του

εδάφους. Η κίνηση από τις σκιές συγκριτικά με το έδαφος δείχνει τη κατεύθυνση της κίνησης σε συνδυασμό με την κατά μήκος και την κάθετη τροχιά.

Πέρα από το ύψος του καπνού, αντλώνται, από τη χρήση του λογισμικού MINX, πληροφορίες σχετικά με τη ταχύτητα του ανέμου και τα αερολύματα (όπως το μέγεθος τους) από τα τυποποιημένα προϊόντα αερολυμάτων που μας παρέχει το εργαλείο MISR.²⁵

2.3.1 Ψηφιοποίηση καπνού

Όταν λαμβάνει χώρα μια πυρκαγιά σε μια περιοχή εκπέμπεται σημαντικός αριθμός σωματιδίων και αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα. Τα προϊόντα που παράγονται κατά τη καύση, αντιδρούν με το περιβάλλον και δημιουργούνται διάφοροι στροβιλισμοί, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά του καπνού που δημιουργείται από τις πυρκαγιές. Η μετακίνηση και το τελικό ύψος του καπνού εξαρτάται από τις εκάστοτε κλιματολογικές συνθήκες, την αεροδυναμική σταθερότητα και την ένταση της φωτιάς.

Ο καπνός κινείται μαζί με τη γενική κυκλοφορία της ατμόσφαιρας, οπότε αναμιγνύεται με την ελεύθερη ατμόσφαιρα, έτσι έχουμε πιο έντονη μετακίνηση των σωματιδίων του καπνού. Ενώ τα πλούμια του καπνού, απομακρύνονται γρήγορα από τη πηγή, τα σωματίδια παραμένουν για περισσότερο χρόνο στην ατμόσφαιρα. Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τον τρόπο διασποράς του καπνού και τη χωρική του κατανομή είναι: ο άνεμος στην περιοχή, η ένταση του καπνού και επιπλέον η γεωμορφολογία της περιοχής. Η διασπορά του καπνού έχει παρεμφερή συμπεριφορά με τη διασπορά των ρύπων στην ατμόσφαιρα.²⁶

Μελετώντας τα αποτελέσματα του μοντέλου του MISR διαπιστώνεται ότι η κατανομή των αερολυμάτων δεν είναι ομοιόμορφη στην ατμόσφαιρα, σε ένα μέγιστο ύψος. Τα αερολύματα απορροφούν ενέργεια (όπως παρατηρείται από το φασματόμετρο του TERRA-MODIS), η θερμότητα επηρεάζει την ανοδική κίνηση του καπνού.²⁷ Ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης του καπνού επηρεάζεται από το υψόμετρο που εισέρχεται ο καπνός στην ατμόσφαιρα. Για

²⁵ Nelson et al., 2013

²⁶ Amiridis V. et al., 2010

²⁷ Kahn et al., 2008

να υπολογιστεί το ύψος του στρώματος των αερολυμάτων χρησιμοποιούνται στοιχεία από διαστημικό LIDAR, το οποίο παρέχει σημαντικά φτωχή οριζόντια δειγματοληψία και διαστημικές στερεογραφικές εικόνες, διαχωρίζοντας τα διακριτά χαρακτηριστικά του καπνού.²⁸

2.4 Lagrangian ατμοσφαιρικό μοντέλο FLEXPART

Το Lagrangian ατμοσφαιρικό μοντέλο FLEXPART έχει αναπτυχθεί με σκοπό τον υπολογισμό μακροχρόνιας και μικρής διάρκειας διασπορά της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από την πηγή του γεγονότος, όπως για παράδειγμα μετά από ένα επεισόδιο μόλυνσης, όπως μια πυρηνική έκρηξη.

Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει εξελιχθεί σε ένα ισχυρό εργαλείο για τη μοντελοποίηση της ατμόσφαιρας και τη μελέτη της σε διάφορες κλίμακες.

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο πρόβλεψης [Weather Research and Forecasting²⁹ (WRF)] είναι ένα σύστημα μοντελοποίησης που χρησιμοποιείται κυρίως για μετεωρολογικές προβλέψεις, από περιοχές μικρής κλίμακας μέχρι και σε παγκόσμιο επίπεδο. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει διάφορες παραμέτρους σχετικά με τα όρια των στρωμάτων, την ακτινοβολία, διάφορες διεργασίες στην επιφάνεια της γης, καθώς και αριθμητικά συστήματα.³⁰ Ο συνδυασμός των δεδομένων του WRF με το μοντέλο (FLEXPART) προσφέρει μια αποτελεσματική απεικόνιση της εκάστοτε περίπτωσης. Η δημιουργία ενός FLEXPART-WRF γίνεται σε δυαδική ή κοινό δίκτυο δεδομένων (NetCDF).³¹

Το μοντέλο FLEXPART-WRF μπορεί να είναι αξιόπιστο αν συνδεθεί με μετεωρολογικά δεδομένα. Πέρα από τα μετεωρολογικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για την δημιουργία ενός μοντέλου, απαιτείται επιπροσθέτως η γνώση της επιφάνειας της γης, η θερμοκρασία, η υγρασία και ο άνεμος μέσα από την τυρβώδη μεταφορά της μάζας του αέρα³² και την προσομοίωση του WRF στα ύψη αυτά.

²⁸ Kahn et al., 2007

²⁹ <http://www.wrf-model.org>

³⁰ Skamarock et al., 2008

³¹ Brioude et al. 2013

³² Britannica Encyclopedia

Ένα WRF μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οριζόντια πλέγματα διαστήματος μεγαλύτερου από 30 km. Τέτοια συστήματα δεν έχουν δημιουργηθεί για αποστάσεις μικρότερες από 10 km, με αποτέλεσμα να πρέπει να επιλυθεί εξ' ολοκλήρου από το μοντέλο. Για να μπορέσει να επιτευχθεί η μελέτη σε αποστάσεις μικρότερες των 10 km πρέπει να υπάρχει πολύ καλή ανάλυση της τάξης των 1-2 km ή μικρότερη. Για κάθε μελέτη πρέπει να επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο για την απεικόνιση της περιοχής μελέτης μας και να χρησιμοποιούμε ένα σύστημα ανάλογα με το μέγεθος του πλέγματος.

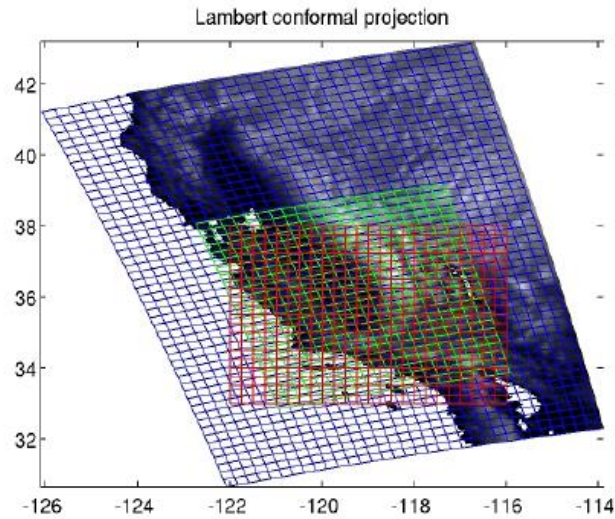
Γενικά δεν υπάρχει κάποιος κανόνας, όσον αφορά την απόσταση ανάμεσα στα πλέγματα. Ωστόσο, πρέπει ένα σύστημα WRF να είναι σε συναγωγή με ένα σύστημα FLEXPART, για να μπορεί να γίνει παραμετροποίηση των δεδομένων σε υποκλίμακα. Το μοντέλο FLEXPART έχει σχεδιαστεί για να μπορεί να χρησιμοποιεί ένα μεγάλο αριθμό σωματιδίων, ενώ ταυτόχρονα διατηρεί το υπολογιστικό κόστος.

Η νέα έκδοση του μοντέλου χρειάζεται λιγότερο από 1 sec για να υπολογίσει τη μεταφορά 100 χιλιάδων τροχιών ανά χρονικό βήμα, γεγονός που αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα όταν έχουμε πολυάριθμες πηγές ή μεγάλης έκτασης περιοχές, όπως και στη παρούσα μελέτη που έχουμε πολλές εστίες πυρκαγιάς. Ο αριθμός των σωματιδίων που θα ληφθούν υπόψη στο μοντέλο εξαρτάται από την ανάλυση που θέλουμε να επιτύχουμε, σχετικά με το χώρο και το χρόνο που επιθυμούμε να αναλύσουμε.

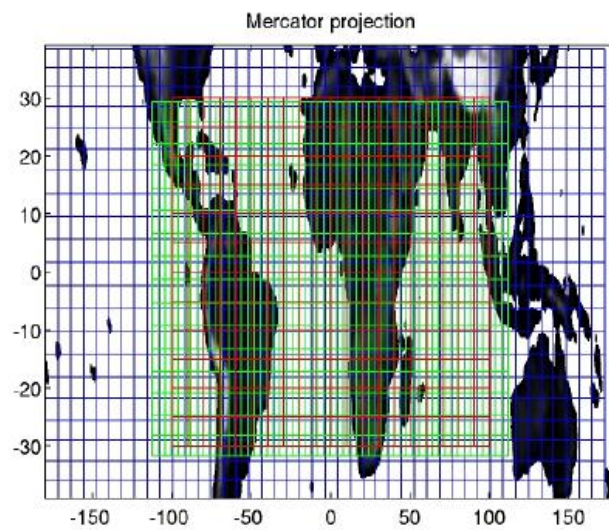
Το μοντέλο WRF μπορεί να χειριστεί διαφορετικές προβολές (όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες) και μπορεί να δημιουργήσει διαφορετικές προβολές ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες. Τα μπλε κελιά πλέγματος αντιπροσωπεύουν το πλέγμα Arakawa C που χρησιμοποιείται στο μοντέλο WRF.³³ Το πλέγμα Arakawa C είναι ένας διαφορετικός τρόπος απεικόνισης που εμφανίζει ορθογώνια φυσικές ποσότητες, χρησιμοποιεί το μοντέλο της γης για τη μετεωρολογία και την ωκεανογραφία της και εφαρμόστηκε για

³³ Brioude et al. 2013

πρώτη φορά το 1977. Οι περιοχές με το πράσινο και το κόκκινο πλέγμα αντιπροσωπεύουν τις δύο διαφορετικές FLEXPART προβολές.³⁴

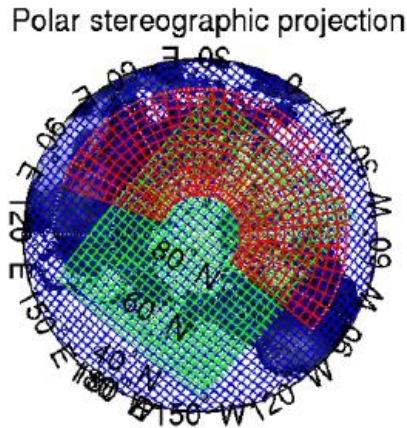


Εικόνα 12: Προβολή Lambert που χρησιμοποιεί το WRF (Πηγή: Brioude et al. 2013)



Εικόνα 13: Μερκατορική προβολή που χρησιμοποιεί το WRF (Πηγή: Brioude et al. 2013)

³⁴ Purser et al., 1988



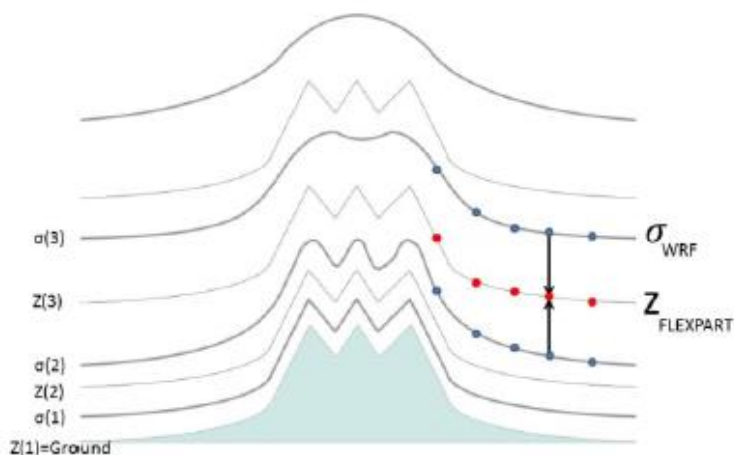
Εικόνα 14: Στερεογραφική προβολή των πόλων (Πηγή: Brioude et al. 2013)

Όταν έχουμε διαφορετικά μετεωρολογικά πεδία για να μπορέσουμε να χρησιμοποιήσουμε τα δύο μοντέλα FLEXPART και WRF, πρέπει να γίνουν κάποιες μετατροπές ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε μοντέλου και τις εκάστοτε μετεωρολογικές συνθήκες.

Συνήθως χρησιμοποιούνται μετεωρολογικά πεδία για τον υπολογισμό της οριζόντιας μεταφοράς του αέρα οριζόντια και κάθετα (3D). Πεδία γεωγραφικού μήκους και πλάτους, δύο διαστάσεων, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των FLEXPART προβολών, ενώ ο χάρτης των προβολών χρησιμοποιείται συνήθως για τη διόρθωση των μετατοπίσεων των τροχιών. Η τρισδιάστατη πίεση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας και για τον κάθετο μετασχηματισμό των συντεταγμένων. Η ειδική υγρασία χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη θερμοκρασία για τον υπολογισμό της πυκνότητας του αέρα, ανάλογα με τα επίπεδα του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (Planetary Boundary Layer-PBL).

Υπάρχουν και άλλες μεταβλητές οι οποίες δεν είναι απαραίτητες για τη δημιουργία του μοντέλου, όπως οι σχετικές με τη βροχόπτωση RAINNC, RAINC, οι οποίες είναι αναγκαίες εάν θέλουμε να υπολογίσουμε την υγρή εναπόθεση. Η ωριαία απεικόνιση με το μοντέλο (WRF με FLEXPART) φαίνεται να είναι επαρκής σε συνδυασμό με τη τοπογραφία. Έχοντας εισάγει την απαραίτητη πληροφορία σχετικά με τη μετεωρολογία της περιοχής και τις

πληροφορίες για το υπό μελέτη γεγονός (πχ. εστίες), τα αποτελέσματα του μοντέλου δίνονται σε μορφή ASCII αρχείων.³⁵



Εικόνα 15: Συντεταγμένες που χρησιμοποιούνται στα δύο συστήματα WRF (σ) και FLEXPART (z) με κάθετη απεικόνιση στο επίπεδο (Πηγή: Brioude et al., 2012b)

2.4.1 Δομή μοντέλου

Το FLEXPART χρειάζεται πέντε τρισδιάστατα πεδία, την οριζόντια και τη κατακόρυφη συνιστώσα του ανέμου, τη θερμοκρασία και την ειδική υγρασία της περιοχής.

Τα κατακόρυφα επίπεδα στα οποία χωρίζεται το μοντέλο και το μέρος της ατμόσφαιρας που προσομοιώνει υπολογίζονται με τη χρήση του τύπου:

$$\rho_k = A_k + B_k p_s$$

όπου A_k και B_k είναι οι συντελεστές που επιλέγονται για να αποδοθούν τα πλησιέστερα επίπεδα προς τη μορφολογία του εδάφους και p_s είναι η επιφανειακή πίεση.

Τα ύψη των επιφανειών δίνονται από τη σχέση:

$$h_k = A_k / \rho_0 + B_k$$

όπου h_k είναι η αξία του μοντέλου στο k επίπεδο του μοντέλου και $\rho_0 = 101325$ Pa (μέση τιμή επιφανειακής πίεσης).

Το σύνολο των θερμικών ροών στη επιφάνεια υπολογίζεται από τις διαθέσιμες προβλέψεις του Ευρωπαϊκού κέντρου μεσοπρόθεσμων

³⁵ Brioude et al., 2012b

μετεωρολογικών προβλέψεων- ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), όπου επιλέγονται οι συντομότερες διαθέσιμες προβλέψεις σύμφωνα με την ημερομηνία των αρχείων που συλλέγονται από το ECMWF.

Οι επιφανειακές τάσεις υπολογίζονται από τον τύπο:

$$\tau = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}$$

όπου τ_1 και τ_2 είναι οι επιφανειακές τάσεις ανατολικά/δυτικά και βόρεια/νότια αντίστοιχα και η ταχύτητα τριβής υπολογίζεται από τη σχέση:

$$u_* = \sqrt{\tau/\rho}$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα.³⁶

Τα ύψη του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος (PBL) υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το κρίσιμο αριθμό Richardson. Το ύψος του πρώτου επιπέδου για τις οποίες ο αριθμός Richardson υπερβαίνει τη κρίσιμη τιμή 0.25, δίνεται από τη σχέση:

$$Ri_l = \frac{(g/\Theta_{v1})(\Theta_{vl} - \Theta_{v1})(z_l - z_1)}{(u_l - u_1)^2 + (v_l - v_1)^2 + 100u_*^2}$$

όπου v_1 και v_l είναι το εικονικό δυναμικό των θερμοκρασιών, z_1 και z_l είναι τα ύψη και τέλος u_1 και u_l είναι οι συνιστώσες του ανέμου από το 1^ο και το l επίπεδο του μοντέλου. Μπορεί να βελτιωθεί το αποτέλεσμα με την αντικατάσταση της μεταβλητής Θ_{v1} με τη παρακάτω σχέση:

$$\Theta'_{v1} = \Theta_{v1} + 8.5 \frac{(\overline{w'\Theta'_v})_0}{w_* c_p}$$

$$w_* = \left[\frac{(\overline{w'\Theta'_v})_0 g h_{mix}}{\Theta_{v1} c_p} \right]^{1/3}$$

όπου

Το w_* μας δίνει τα επίπεδα συγκέντρωσης της ταχύτητας. Το Θ'_{v1} δίνει μια υπέρβαση της θερμοκρασίας, σε αύξηση της θερμοκρασίας. Το w είναι μια

³⁶ Wotawa et al., 1996

άγνωστη αρχικά μεταβλητή και για το λόγο αυτό υπολογίζονται επαναληπτικά οι μεταβλητές h_{mix} και w^* .

Χωροχρονικές μεταβολές των υψών του PBL δεν μπορούν να υπολογιστούν με το μοντέλο ECMWF, αλλά σημαντικό ρόλο παίζει το πάχος του στρώματος. Το ύψος του PBL παίρνει μια μέγιστη τιμή (περίπου 1500 m) το απόγευμα γύρω στις 17:00 τοπική ώρα. Αν έχουμε διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα μόνο δύο χρονικών στιγμών μέσα στην ημέρα, οι οποίες δεν συμπίπτουν με την ζητούμενη ώρα, προκύπτουν σοβαρά προβλήματα στη δημιουργία του μοντέλου.

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι έχουμε δεδομένα μετεωρολογικά μόνο στις 12:00 και στις 18:00 τοπική ώρα και τα ύψη του PBL στις παραπάνω ώρες είναι 1200 m και στα 200 m. Στη περίπτωση αυτή αν χρησιμοποιηθεί το PBL στις 17:00 τοπική ώρα θα οδηγηθούμε σε σημαντική υποτίμηση των 370 m αντί των 1500 m.. Παρόμοια προβλήματα δημιουργούνται για τις χωρικές μεταβολές των υψών του PBL, λόγω πολυπλοκότητας της τοπογραφίας, αλλαγών των χρήσεων γης και της εδαφικής υγρασίας.³⁷

Το οπτικό πάχος των σύννεφων που κινούνται πάνω από τη περιοχή θα πρέπει να καθορίζεται από το μέγιστο ύψος και όχι από το μέσο ύψος του PBL. Το μοντέλο FLEXPART χρησιμοποιεί μια κάπως αυθαίρετη παραμετροποίηση για να αποφύγει το πάχος από τα σύννεφα και των επιφανειακών συγκεντρώσεων. Με σκοπό να απεικονιστούν χωρικές μεταβολές που οφείλονται στη τοπογραφία της περιοχής χρησιμοποιούνται τα ύψη από το PBL (H_{env}), με τη χρήση του ακόλουθου τύπου:

$$H_{env} = h_{mix} + \min \left[\sigma_z, c \frac{V}{N} \right]$$

όπου σ_z είναι η τυπική απόκλιση του μοντέλου ECMWF με λεπτομερή τοπογραφία, c μια σταθερά, V είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος h_{mix} και N η συχνότητα Brunt-Vaisala (είναι η γωνιακή συχνότητα με την οποία γίνεται η κατακόρυφη μετατόπιση μιας μάζας που θα ταλαντεύεται μέσα σε ένα στατικά σταθερό περιβάλλον). Ο άνεμος υπό σταθερές συνθήκες έχει τη τάση

³⁷ Hubbe et al.,1997

να ρέει γύρω από τοπογραφικά εμπόδια και όχι πάνω από αυτά, αλλά μπορεί να εμφανίζεται κάποια ανύψωση λόγω της διαθέσιμης κινητικής ενέργειας. Το κλάσμα V/N εκφράζει τον τοπικό αριθμό Froude, που εκφράζει την αναλογία των αδρανειακών δυνάμεων. Το γινόμενο cV/N περιορίζει την επίδραση της τοπογραφίας από μικρού μεγέθους γήινα χαρακτηριστικά υπό σταθερές συνθήκες ($c=2$ είναι ένας υποκειμενικός συντελεστής κλίμακας). Η τιμή του H_{env} χρησιμοποιείται για όλους τους υπολογισμούς, η τιμή του οποίου μας δείχνει το μέγιστο αριθμό σημείων του πλέγματος γύρω από τη θέση ενός σωματιδίου χωροχρονικά και όχι τη παρεμβολή της θέσης των σωματιδίων.³⁸

2.5 Ατμοσφαιρικό Μοντέλο

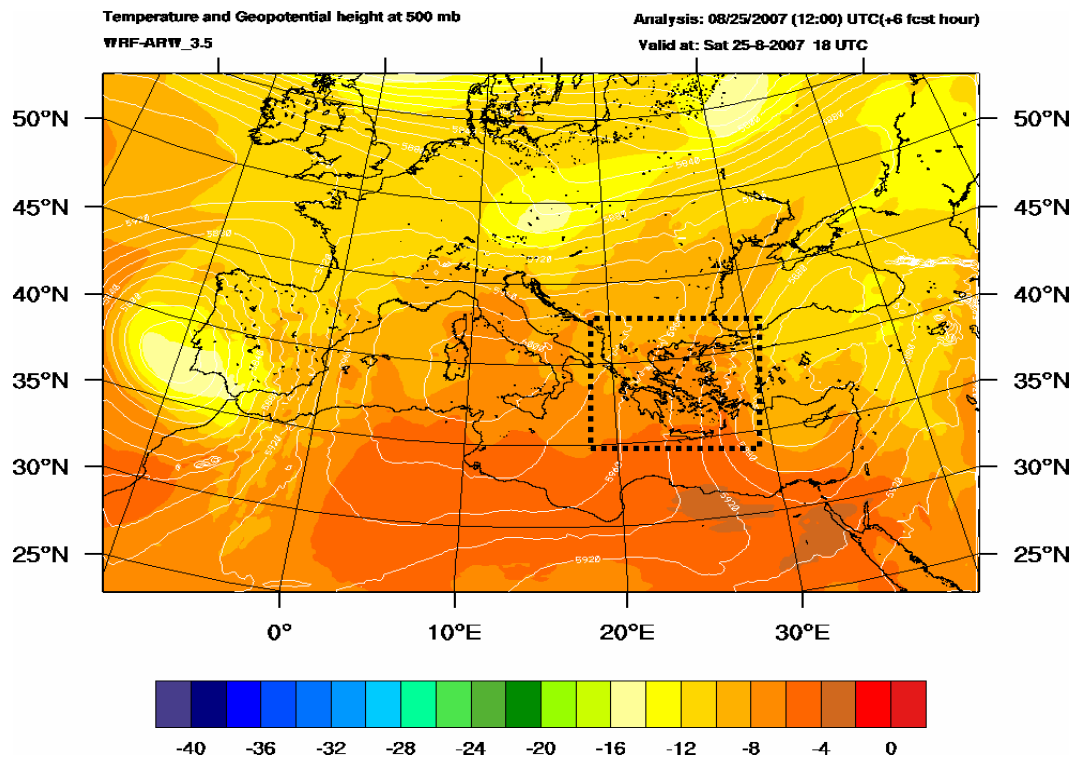
Το ατμοσφαιρικό μοντέλο Advanced Research WRF (ARW) έχει δημιουργηθεί για να παρέχει πληροφορίες για τα μετεωρολογικά πεδία που ευθύνονται για τη διασπορά του καπνού.

Οι συνθήκες που επικρατούν σε ένα συμβάν (τόσο οι αρχικές, όσο και κατά την εξέλιξη του εκάστοτε γεγονότος) για τη δημιουργία του ατμοσφαιρικού μοντέλου συλλέχθηκαν από τις εξομοιώσεις μετεωρολογικών παρατηρήσεων από το μετεωρολογικό κέντρο στην Αμερική NCEP Final Analysis³⁹ με ανάλυση σε $1^\circ \times 1^\circ$. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια της θάλασσας προέρχεται από τις εξομοιωμένες τιμές NCEP SST με ανάλυση $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Το ατμοσφαιρικό μοντέλο WRF-ARW (εικόνα 16) καταλαμβάνει περιοχή 18×18 km, με δύο εστιακούς κανάβους διαστάσεων 6×6 km και 31 κάθετα επίπεδα που εκτείνονται σε ύψος 18 km στην ατμόσφαιρα. Η διακύμανση των τμημάτων του καπνού υπολογίζεται με το μοντέλο διασποράς Lagrangian.⁴⁰

³⁸ Stohl et al., 2011

³⁹ FNL - <http://rda.ucar.edu/datasets>

⁴⁰ Brioude et al., 2013



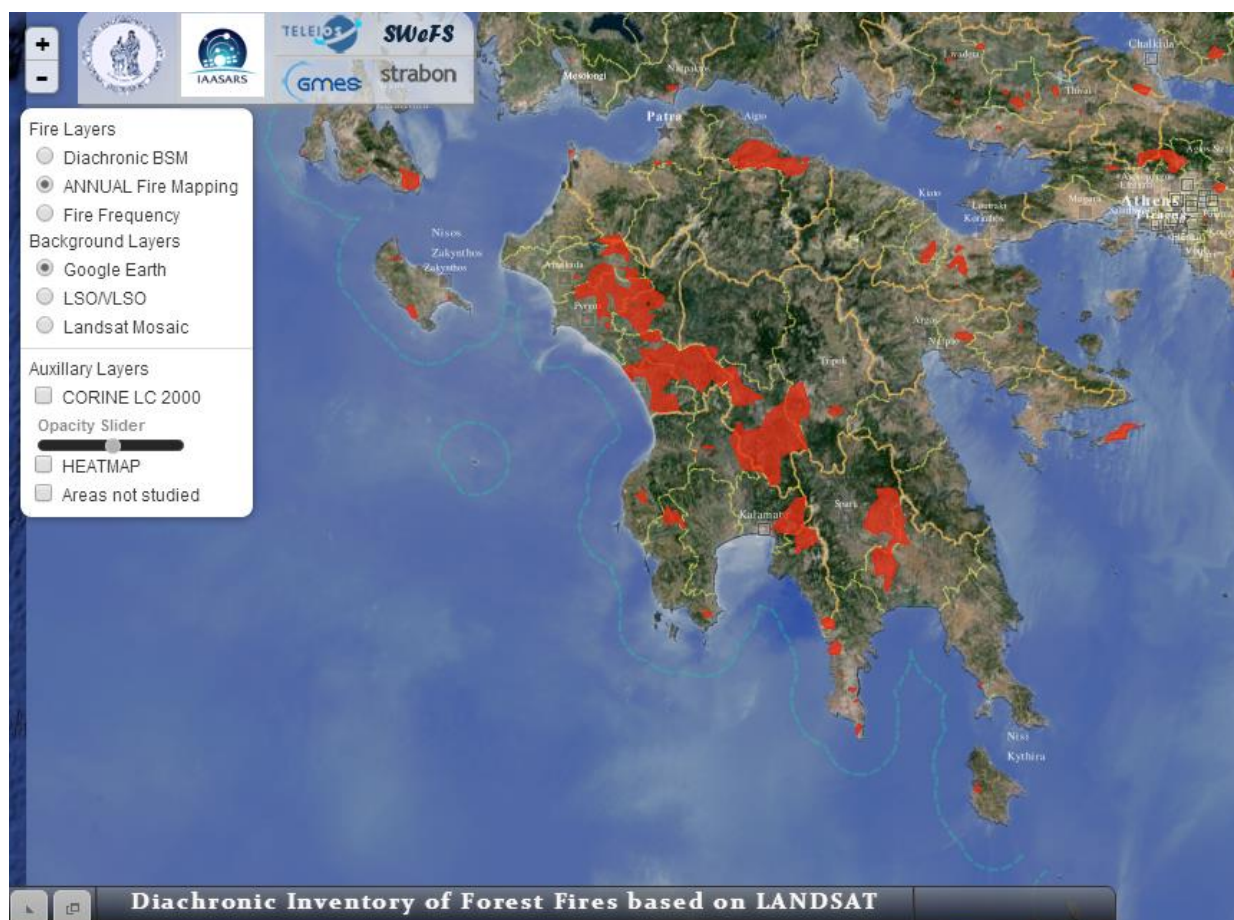
Εικόνα 16: Θερμοκρασία και ύψη στα 500mb, η διακεκομμένη περιοχή δείχνει τον ελλαδικό χώρο.

2.6 Πρόγραμμα BEYOND

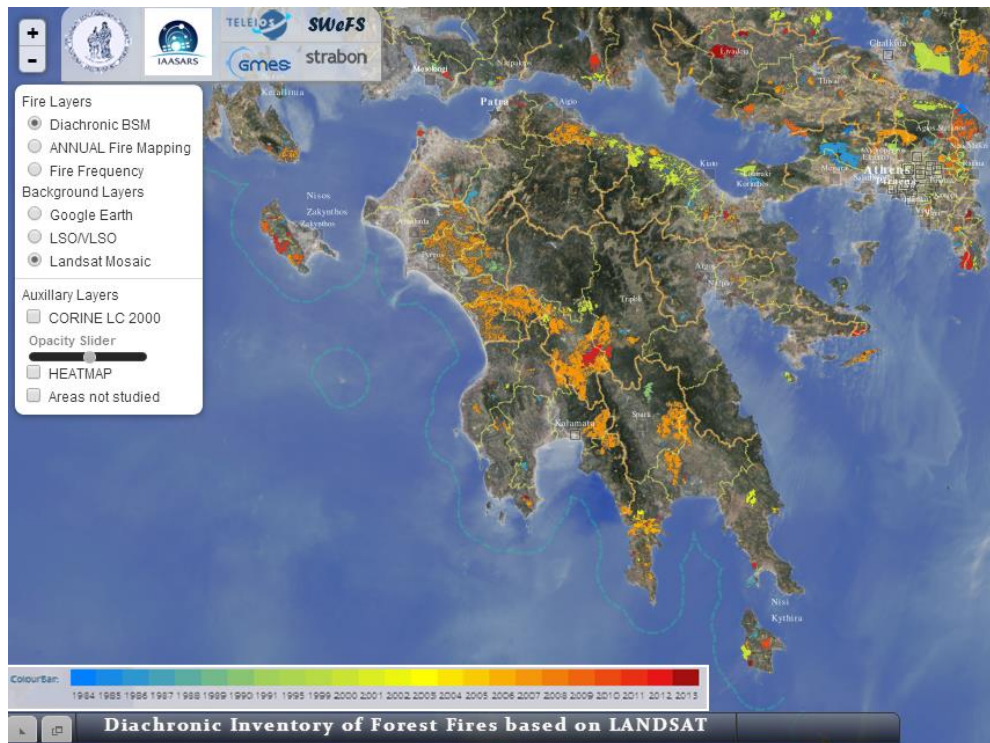
Το BEYOND είναι ένα διαδικτυακό κέντρο αριστείας για την παρακολούθηση φυσικών καταστροφών με βάση τις παρατηρήσεις της γης στη νότιο-ανατολική Ευρώπη που φιλοξενείται στο Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών (NOA) στο Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών και Τηλεπισκόπησης (ΙΑΣΑΡS). Ιδρύθηκε στα πλαίσια του προγράμματος FP7-REGPOT-2012-2013-1 δράσεων συντονισμού και στήριξης με θέμα «Unlocking and developing the research potential of research entities established in the EU's Convergence regions and Outermost regions». Στόχος της ίδρυσης του προγράμματος ήταν να διατηρήσει και να επεκτείνει τη σύγχρονη διεπιστημονική έρευνα. Οι εργασίες ξεκίνησαν επίσημα τον Ιούνιο του 2013 και θα διαρκέσουν μέχρι το 2016 ενώ ο προϋπολογισμός του ανέρχεται στα 2.305.650 ευρώ.

Το BEYOND ενσωματώνει πληροφορίες από διάφορες πηγές, δορυφορικά δεδομένα, μετεωρολογίας, φυσικής της ατμόσφαιρας, μοντελοποίηση, γεωλογία, γεωφυσική, σεισμολογία, ηφαιστειολογία και υδρολογία.

Εξασφαλίζει πολύπλοκη παρατήρηση της γης και μετατρέπει τις παρατηρήσεις σε προϊόντα έτοιμα για επεξεργασία που αφορούν τις φυσικές καταστροφές. Επιτρέπει την παρακολούθηση δικτύων τόσο από το ΝΟΑ, όσο και από άλλα συνεργαζόμενα ιδρύματα, με ταχεία παράδοση πληροφοριών στους χρήστες. Καλύπτει ένα ευρύ φάσμα φυσικών καταστροφών όπως σεισμούς, ηφαίστεια, ακραία καιρικά φαινόμενα, πλημμύρες, πυρκαγιές, καπνό από φωτιά και τοξικά αέρια με διασπορά στην ατμόσφαιρα, συγκεντρώσεις σκόνης καταιγίδες και ποιότητα αέρα με επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.



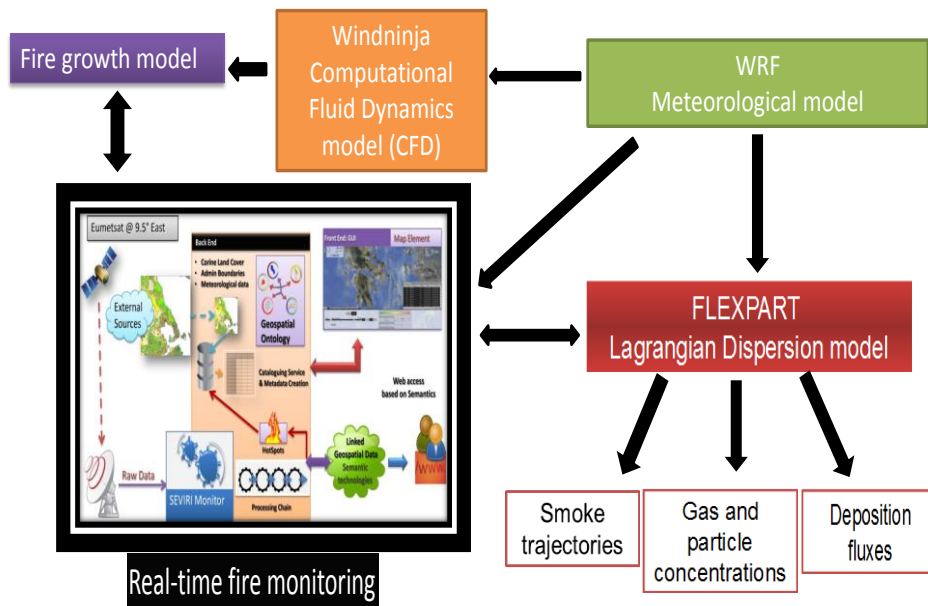
Εικόνα 17: Οι πυρκαγιές που έλαβαν χώρα στη Πελοπόννησο το 2007, με τη χρήση της διαδικτυακής εφαρμογής BEYOND



Εικόνα 18: Διαχρονική εξέλιξη των πυρκαγιών στη Πελοπόννησο, με πορτοκαλί χρώμα φαίνονται οι πυρκαγιές του 2007, ενώ με κόκκινο νεώτερες του 2012

Το σύστημα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο συλλέγει συνεχώς πληροφορίες από το δορυφόρο MSG/SEVIRI (EUMETSAT) κάθε πέντε λεπτά και μεταποιεί αυτόματα τα δεδομένα με τη χρήση αλγορίθμων για την επεξεργασία και ταξινόμηση των εικόνων. Πληροφορίες για την κατεύθυνση του ανέμου, για τη μορφολογία του εδάφους και για τις υψομετρικές ζώνες συλλέγονται από την αρχική παρατήρηση του αισθητήρα MSG SEVIRI από χωρική ανάλυση 3,5 km μέχρι 500 km. Οι χάρτες που δημιουργούνται με τη χρήση του web server, όπου με τη βοήθεια γεωχωρικών στρωμάτων (Google Earth, Corine CLC, τοπωνύμια κλπ.) συγχωνεύονται. Το σύστημα παρέχει σε πραγματικό χρόνο παρατηρήσεις με τη χρήση πληροφοριών από τη Πυροσβεστική της Ελλάδας, τη Διεύθυνση Δασικής Προστασίας και άλλους ελληνικούς φορείς.⁴¹

⁴¹ <http://ocean.space.noa.gr/BEYONDSite/>



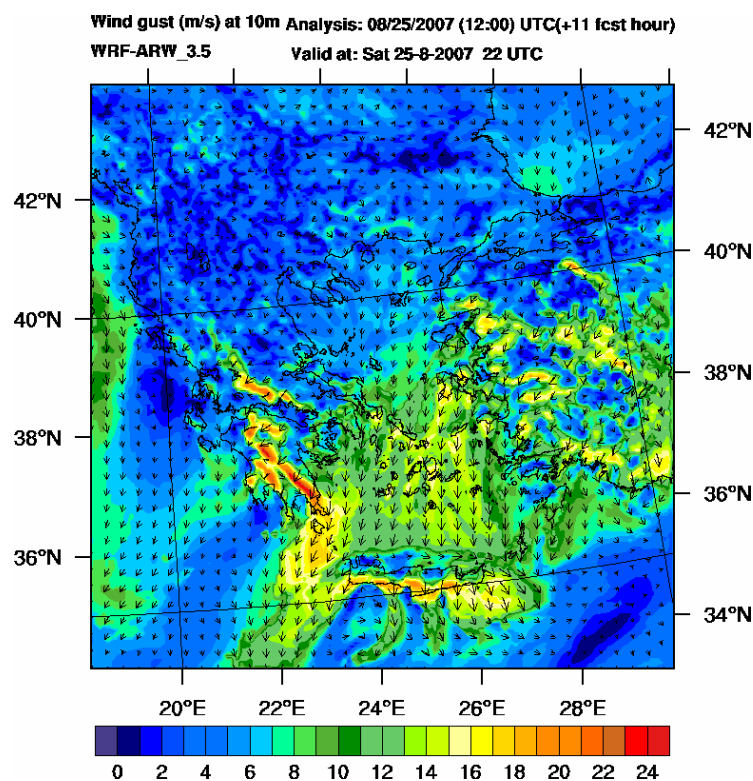
Εικόνα 19: Παρατήρηση της γης και μοντελοποίηση στα πλαίσια του κέντρου αριστείας BEYOND

Το MSG/SEVIRI χρησιμοποιήθηκε με σκοπό να εντοπισθεί η αναφλεξιμότητα της εκάστοτε πυρκαγιάς και η διάρκεια του κάθε γεγονότος.

3. Μέθοδος - Αποτελέσματα

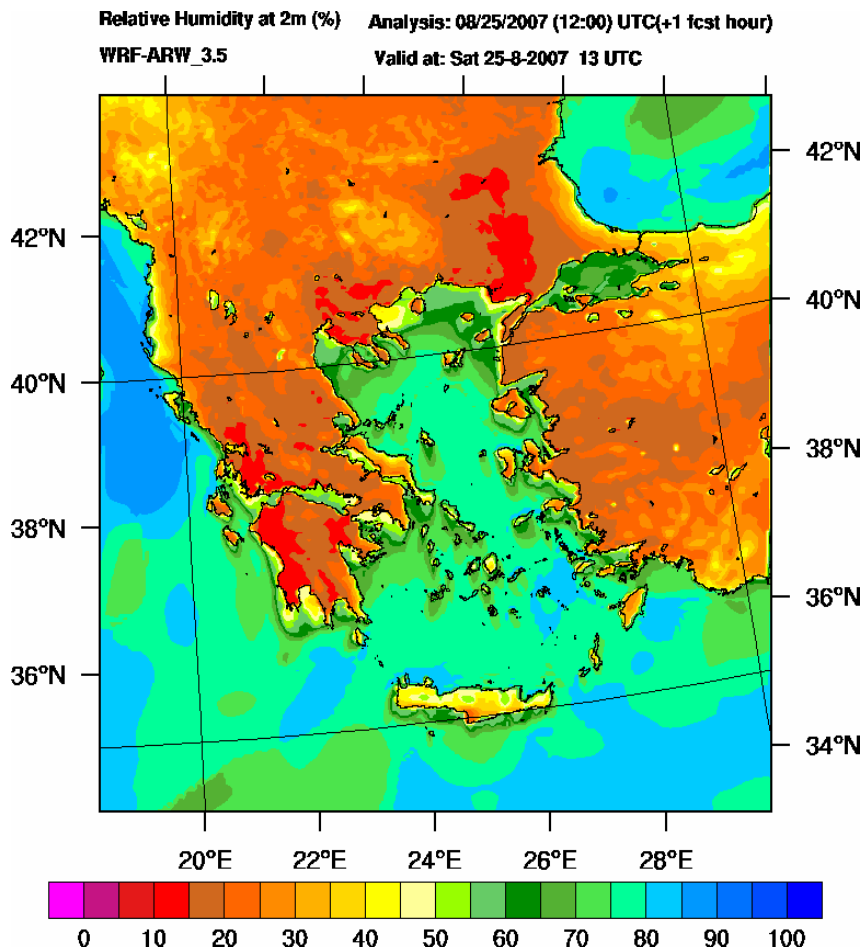
Το καλοκαίρι του 2007 έλαβαν χώρα πολλές ισχυρές πυρκαγιές σε όλο τον ελλαδικό χώρο, με σημαντικές περιβαλλοντικές, αλλά και οικονομικές καταστροφές.

Η παρούσα εργασία εστιάζεται στις πυρκαγιές της Δυτικής Πελοποννήσου που έλαβαν χώρα στις 25-27 Αυγούστου 2007. Η υψηλή πίεση στη κεντρική Μεσόγειο και η χαμηλή πίεση πάνω από τη Τουρκία έχει ως αποτέλεσμα υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή σχετική υγρασία και υψηλούς ανέμους στην Ελλάδα, που οδηγούν στην αύξηση των πυρκαγιών στην Ελλάδα.



Εικόνα 20: Άνεμος σε ύψος 10m (m/s)

Οι ισχυροί βορειοδυτικοί άνεμοι με ταχύτητα 20 m/s στην περιοχή της Πελοποννήσου και στο σύνολο της Ελλάδας (εικόνα 20), σε συνδυασμό με τις υψηλές θερμοκρασίες πάνω από 40°C τις υψηλές πιέσεις και τα χαμηλά επίπεδα υγρασίας επιδείνωσαν τη κατάσταση στη Πελοπόννησο, συντέλεσαν στην ταχεία δημιουργία και εξάπλωση των ισχυρών πυρκαγιών.



Εικόνα 21: Σύνδεση με την υγρασία στα 2m (%)

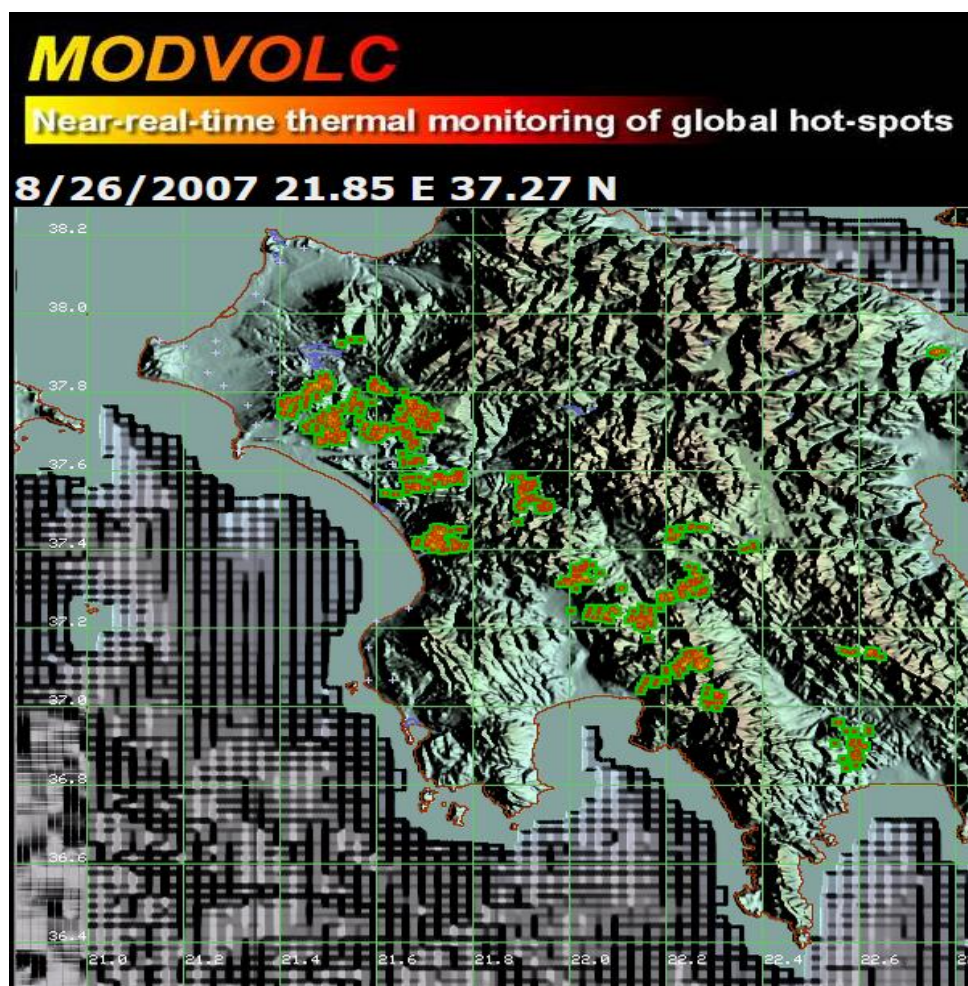
3.1 Δορυφορικά αποτελέσματα

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, οι δορυφορικές εικόνες από τις πυρκαγιές της Πελοποννήσου έχουν ψηφιοποιηθεί με τη χρήση του λογισμικού MINX. Ο δορυφόρος πέρασε πάνω από την Ελλάδα την δεύτερη ημέρα της φωτιάς, και οι εστίες των πυρκαγιών είναι ευδιάκριτες. Με την παρατήρηση των δορυφορικών εικόνων, φαίνεται ότι ο καπνός από τις πυρκαγιές μετακινείται νοτιοδυτικά από την Ελλάδα προς την υπόλοιπη Μεσόγειο.

Αρχικά, εντοπίστηκαν οι συντεταγμένες των εστιών από τις πυρκαγιές με τη χρήση του διαδικτυακού τόπου του πανεπιστημίου της Hawai, που ανέπτυξε ένα αυτόματο σύστημα παρακολούθησης των θερμών πηγών σε παγκόσμιο επίπεδο και την απεικόνισή τους σε χάρτες.⁴² Από αυτή τη πλατφόρμα συλλέγονται οι ακριβείς συντεταγμένες των εστιών της εκάστοτε πυρκαγιάς,

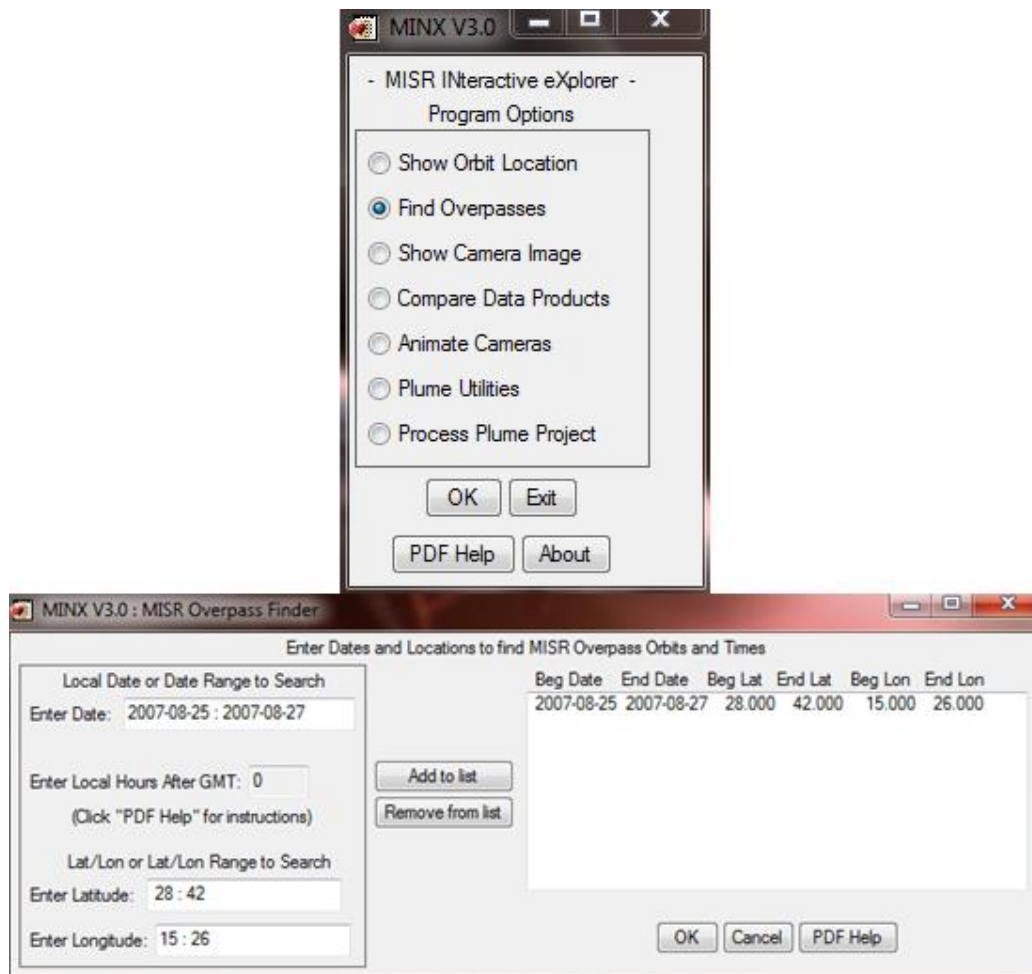
⁴² MODVOLC, 2014

ώστε να μπορέσουμε να τις χρησιμοποιήσουμε, μειώνοντας το ανθρώπινο σφάλμα.



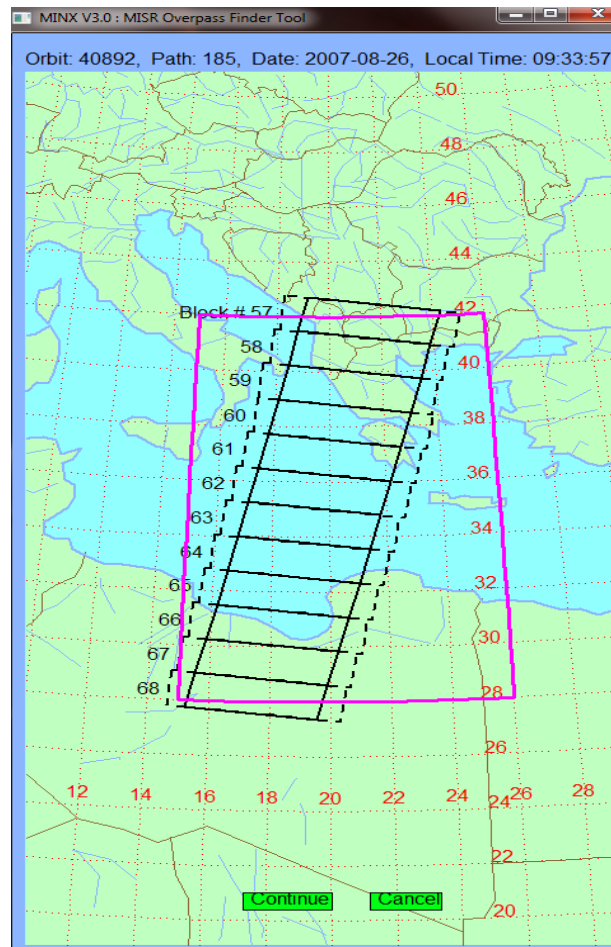
Εικόνα 22: Εστίες θερμών πηγών στην Πελοπόννησο στις 26/8/2007 (MODVOLC, 2014)

Στη συνέχεια, εντοπίζουμε τη τροχιά του δορυφόρου που έχουμε οπτική με την περιοχή που θέλουμε να εξετάσουμε, χρησιμοποιώντας το λογισμικό MINX που παρουσιάσαμε ανωτέρω. Για να μπορέσουμε να εντοπίσουμε λοιπόν, την επιθυμητή τροχιά, χρειάζεται να γνωρίζουμε το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής μελέτης μας και να περιορίσουμε την αναζήτηση στις επιθυμητές ημερομηνίες.



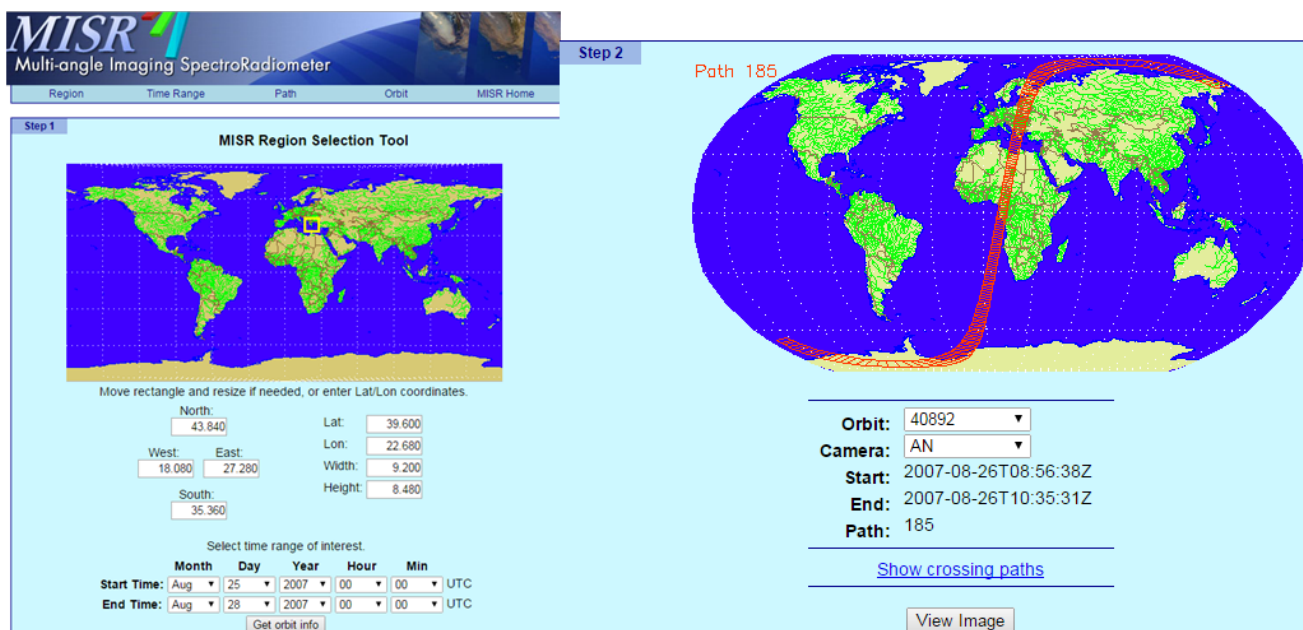
Εικόνα 23: Αναζήτηση επιθυμητής τροχιάς με τη χρήση του λογισμικού MINX

Με αυτόν τον τρόπο βρίσκουμε την επιθυμητή τροχιά που μελετήθηκε, η οποία είναι η τροχιά 40892, στις 26/08. Το υπόλοιπο διάστημα (25-27/08/2007) το εργαλείο MINX δεν είχε τροχιά τέτοια ώστε να υπάρχουν δεδομένα από τη περιοχή. Στην εικόνα 24, παρακάτω, απεικονίζεται η τροχιά που προαναφέρθηκε, ενώ με ρόζ χρώμα φαίνεται η επιλεγθείσα περιοχή.

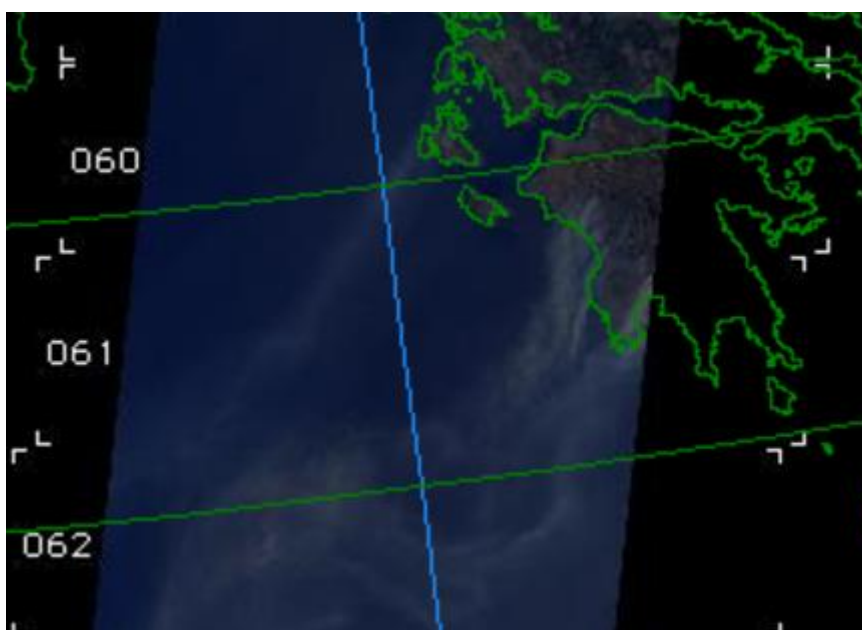


Εικόνα 24: Τροχιά 40892, 26/08/2007

Πριν κατεβάσουμε τα δεδομένα της τροχιάς για τη περαιτέρω εξέταση των δεδομένων, ελέγξαμε, με τη χρήση του διαδικτυακού εργαλείου περιήγησης του MISR, αν την ώρα που πέρασε ο δορυφόρος πάνω από τη περιοχή που θέλουμε να μελετήσουμε συλλέχθηκε πληροφορία για το γεγονός.



Εικόνα 25: Ορισμός επιθυμητών στοιχείων για την απεικόνιση της τροχιάς

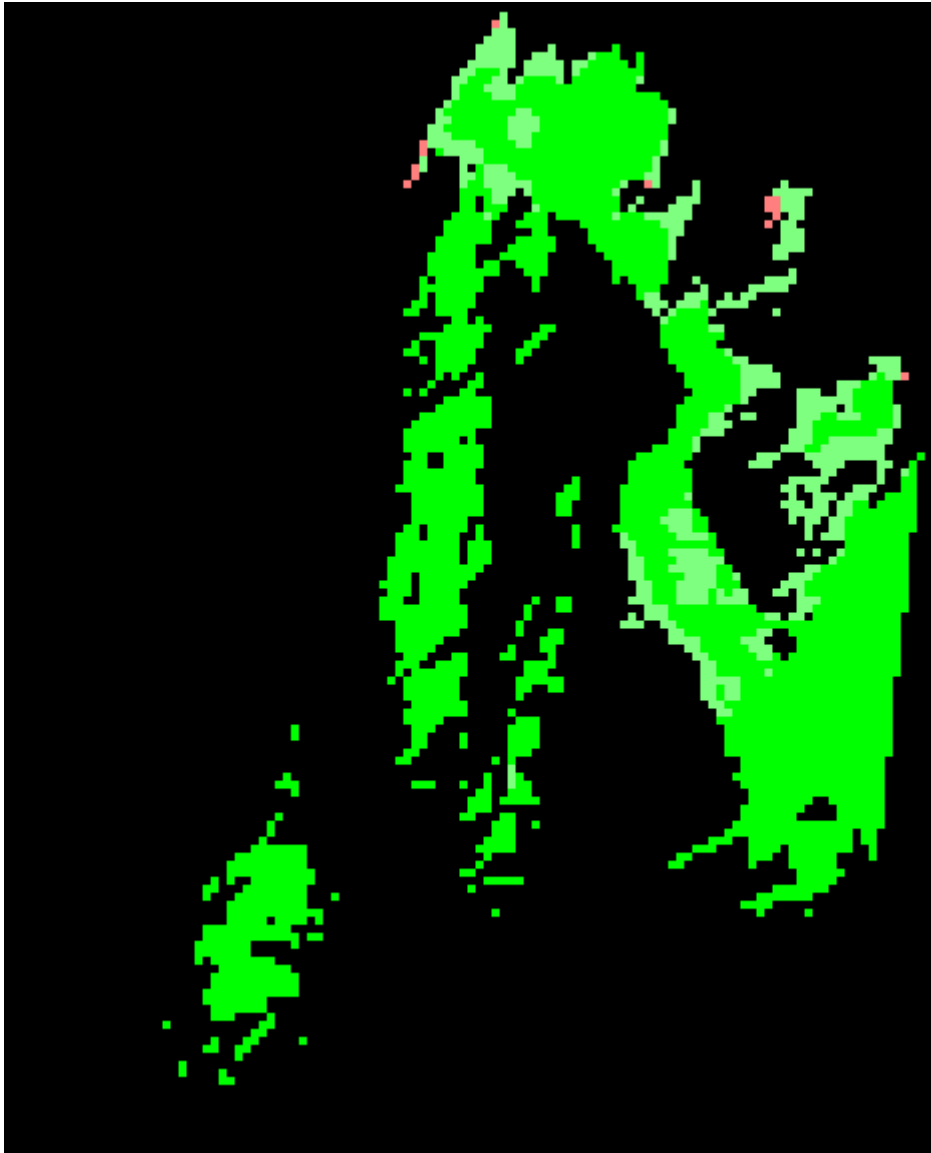


Εικόνα 26: Δορυφορική εικόνα της περιοχής μελέτης, με τη χρήση του διαδικτυακού εργαλείου περιήγησης του MISR (MISR Browse Tool, 2014)

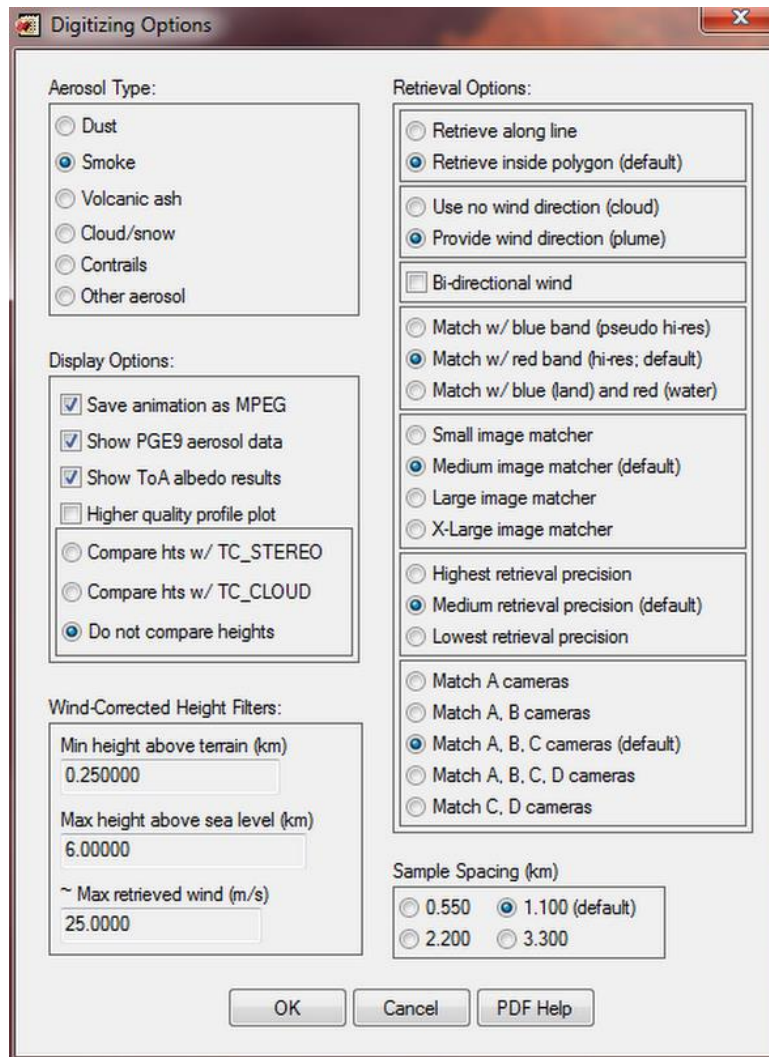
Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από το ατμοσφαιρικό κέντρο της NASA Atmospheric Science Data Center (ASDC), που είναι υπεύθυνο για τη συλλογή, επεξεργασία και διανομή των δεδομένων που αφορούν δεδομένα για την ακτινοβολία, τα σύννεφα, τα αερολύματα και τη τροπόσφαιρα.⁴³

⁴³ ASDC, 2014

Με τη χρήση του λογισμικού MINX v.3 ανακτώνται πληροφορίες σχετικά με το ύψος του καπνού. Μετά την επεξεργασία του πλουμίου, το λογισμικό μας δίνει δύο διαφορετικά είδη υψών: το ύψος μηδενικού ανέμου «zero-wind» (υποθέτοντας απουσία ανέμου) και το διορθωμένο ύψος για την ύπαρξη του ανέμου «wind-corrected» (όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.3).

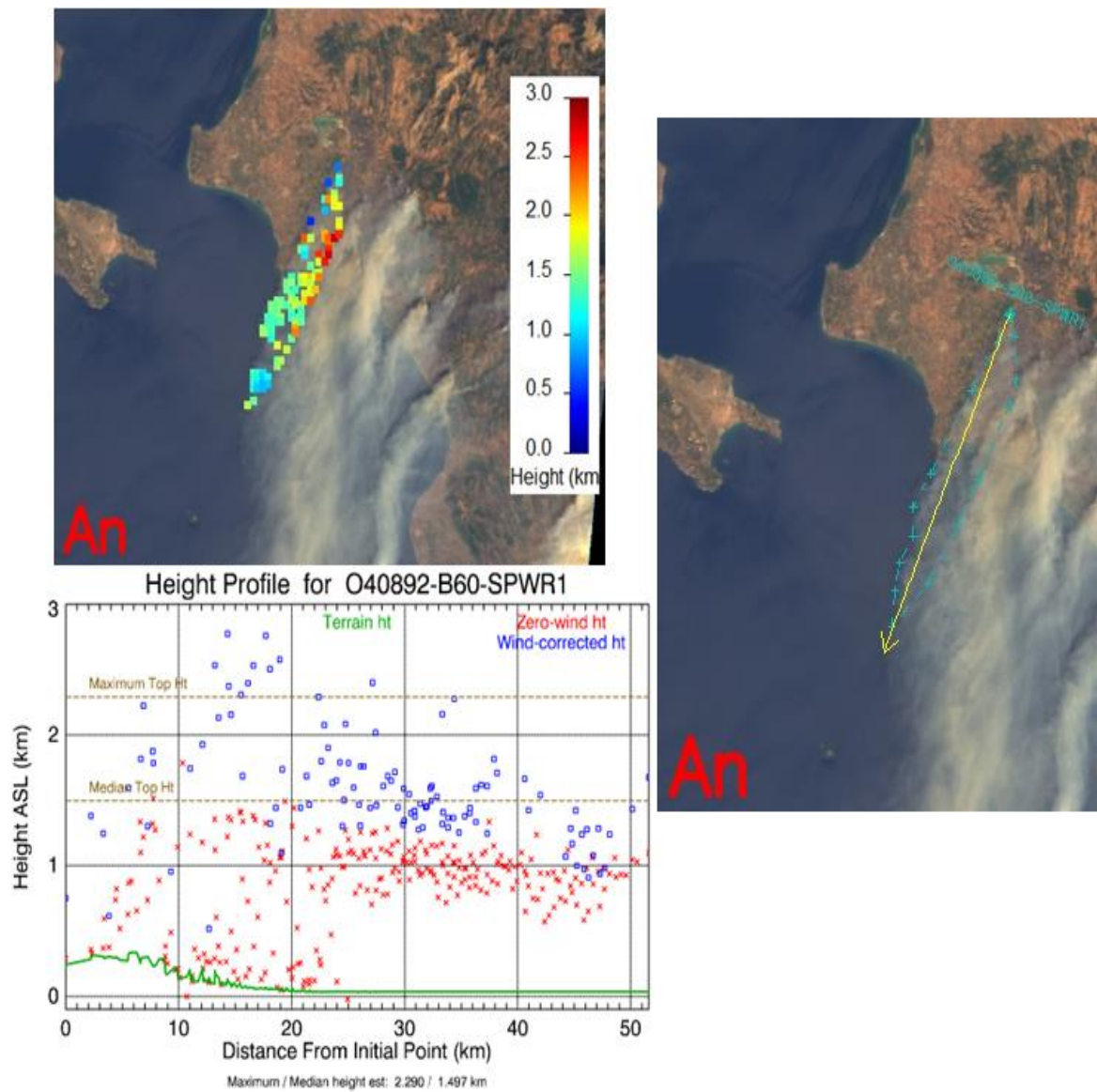


Εικόνα 27: Μάσκα καπνού με τη χρήση του λογισμικού MINX της περιοχής μελέτης



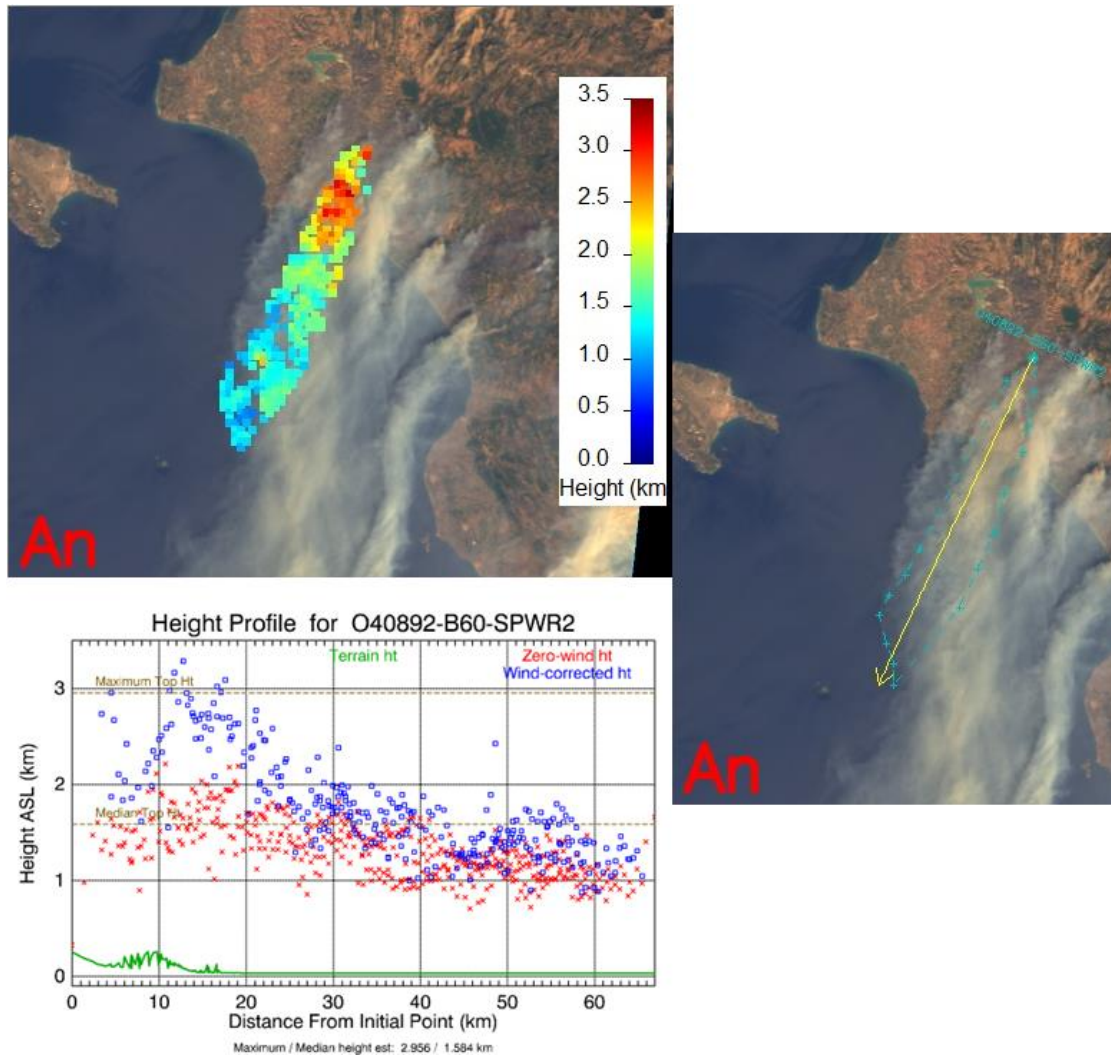
Εικόνα 28: Επιλογές για τη έναρξη της ψηφιοποίησης του καπνού

Στις ακόλουθες εικόνες (εικόνα 28-33) φαίνονται τα αποτελέσματα της ψηφιοποίησης του καπνού από τις διαφορετικές εστίες της πυρκαγιάς. Τα αποτελέσματα των υψών δίνονται σε χιλιόμετρα (km). Στο δεξί μέρος της εικόνας απεικονίζεται η διεύθυνση του ανέμου που έχει προκύψει όπως ήδη έχει αναφερθεί παραπάνω από διάφορα σημεία που ορίσαμε που δεν βρίσκονται απαραίτητα στην ίδια γραμμή. Στα διαγράμματα απεικονίζεται το ύψος των αερολυμάτων στη κατακόρυφη διεύθυνση του ανέμου που ορίστηκε.



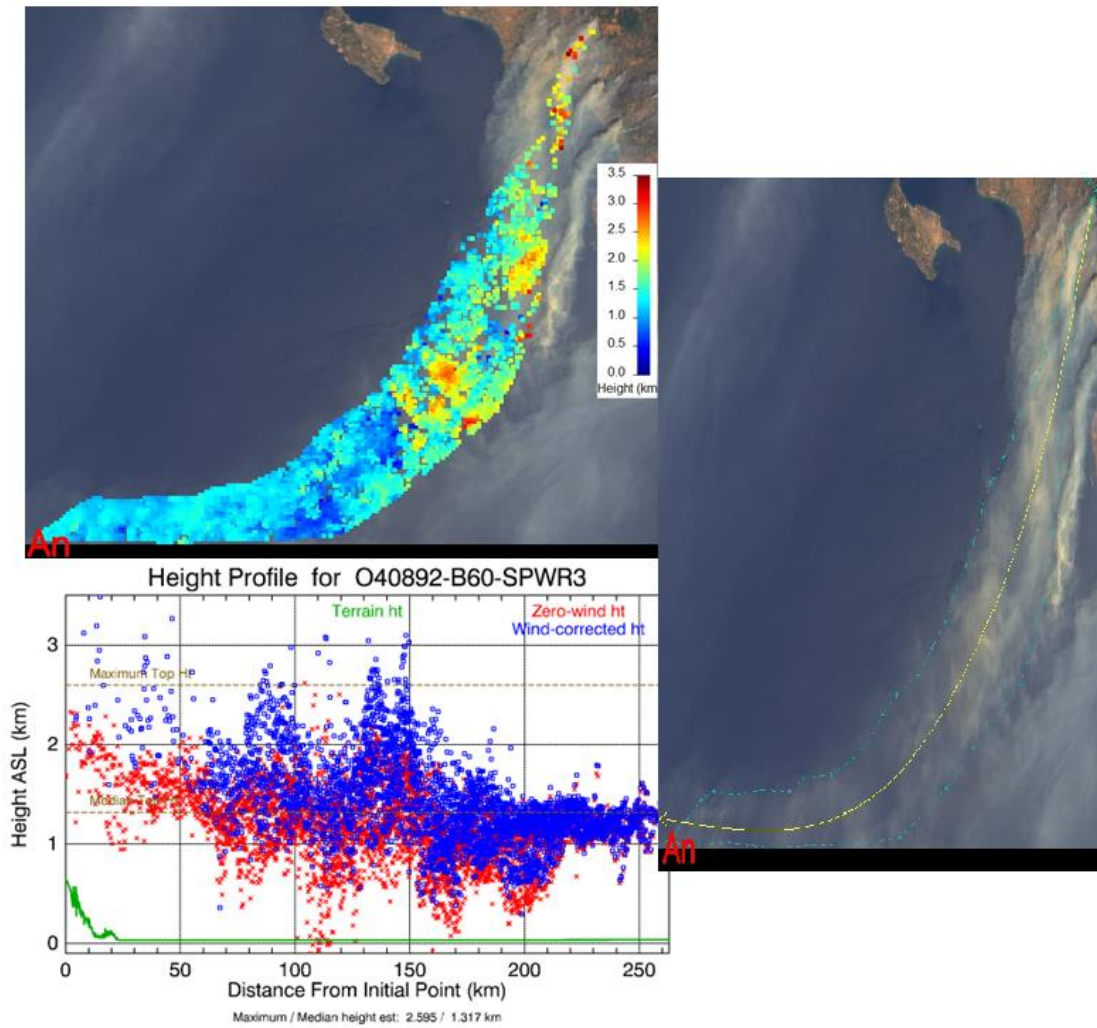
Εικόνα 29: Ύψος αερολυμάτων πρώτης εστίας στη κάμερα στο σημείο ναδίρ

Στη πρώτη εστία που ψηφιοποιήθηκε παρατηρούμε ότι ο καπνός φτάνει σε μέγιστο ύψος 2,2 km σε απόσταση περίπου 15 km από την εστία της πυρκαγιάς, στη συγκεκριμένη εστία τα αερολύματα δεν είναι ιδιαίτερα πυκνά, σε αντίθεση με άλλη εστία που εξετάστηκε.



Εικόνα 30: Ύψος αερολυμάτων δεύτερης εστίας

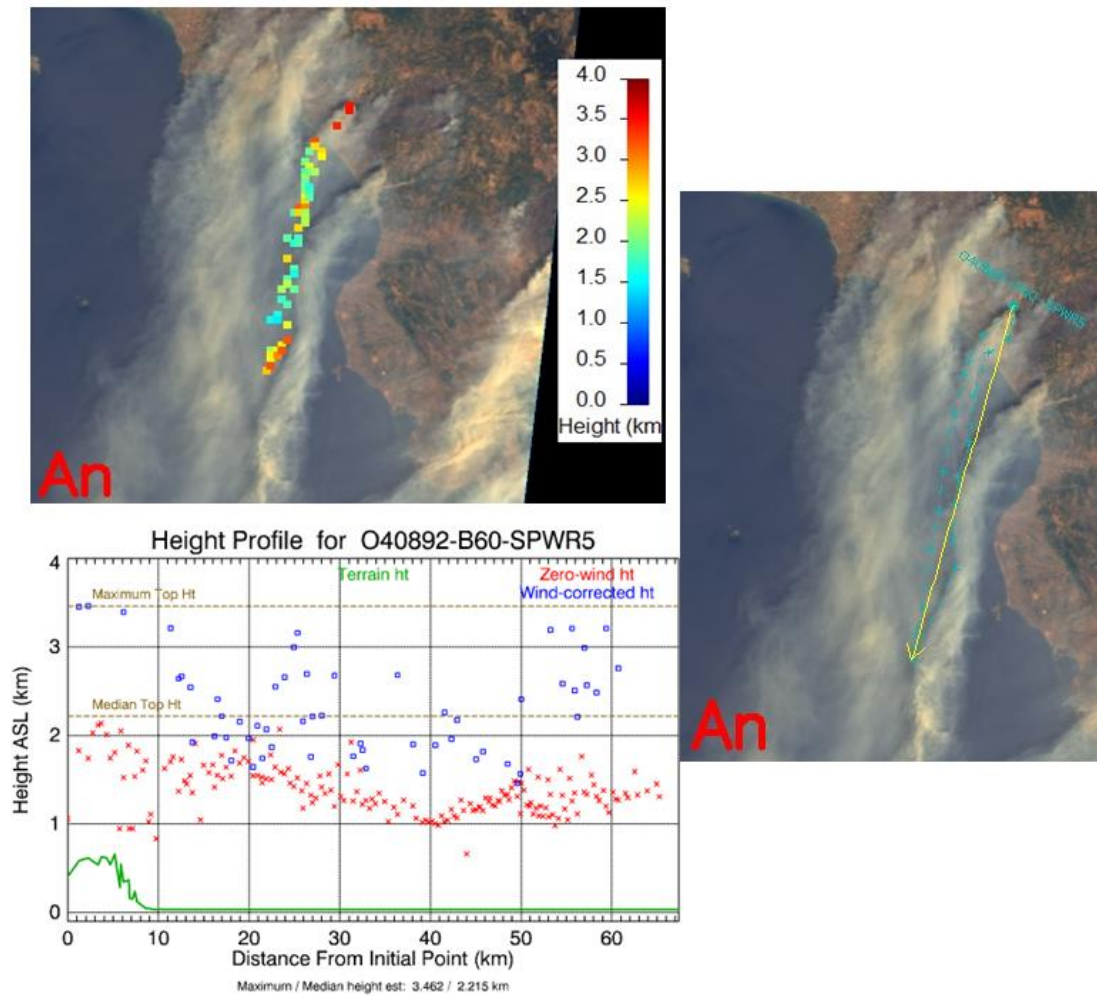
Η εστία αυτή είχε πιο πυκνό καπνό σε σχέση με την πρώτη και αυτό φαίνεται από το πλήθος των αερολυμάτων. Το μέγιστο ύψος των αερολυμάτων είναι στα 2,9 km και μπορούμε όσο απομακρυνόμαστε από το επίκεντρο της πυρκαγιάς το ύψος των αερολυμάτων μειώνεται σημαντικά, φτάνοντας κοντά στο 1 km.



Εικόνα 31: Ύψος αερολυμάτων τρίτης εστίας

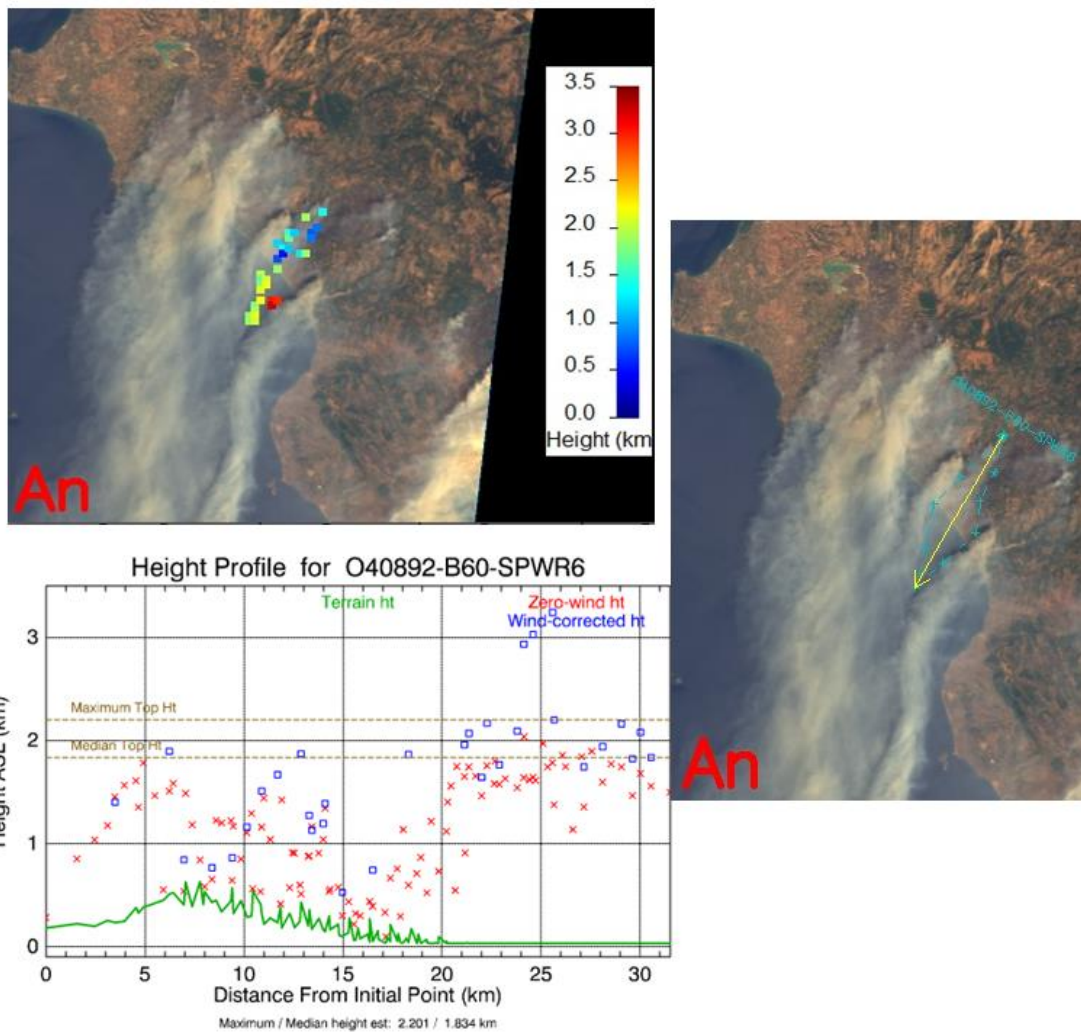
Η συγκεκριμένη εστία είναι η μεγαλύτερη σε ένταση πυρκαγιά από όλες που μελετήθηκαν, αν και το ύψος των αερολυμάτων δεν είναι πολύ υψηλό (περίπου 2,5 km). Παρατηρήθηκε μεγάλη συγκέντρωση, όχι τόσο κοντά στην εστία την πυρκαγιάς, αλλά σε μια απόσταση περίπου 50 km.

Η μεγάλη συγκέντρωση των αερολυμάτων, μπορεί να οφείλεται όχι μόνο στη μεγαλύτερη ένταση της πυρκαγιάς (και της γήινης έκτασης που έκαψε), αλλά και στο γεγονός ότι μελετάμε τη δεύτερη ημέρα της εξέλιξης του φαινομένου που σημαίνει ότι μεταφέρθηκαν αέριες μάζες από τις εστίες που βρίσκονται βορειότερα.



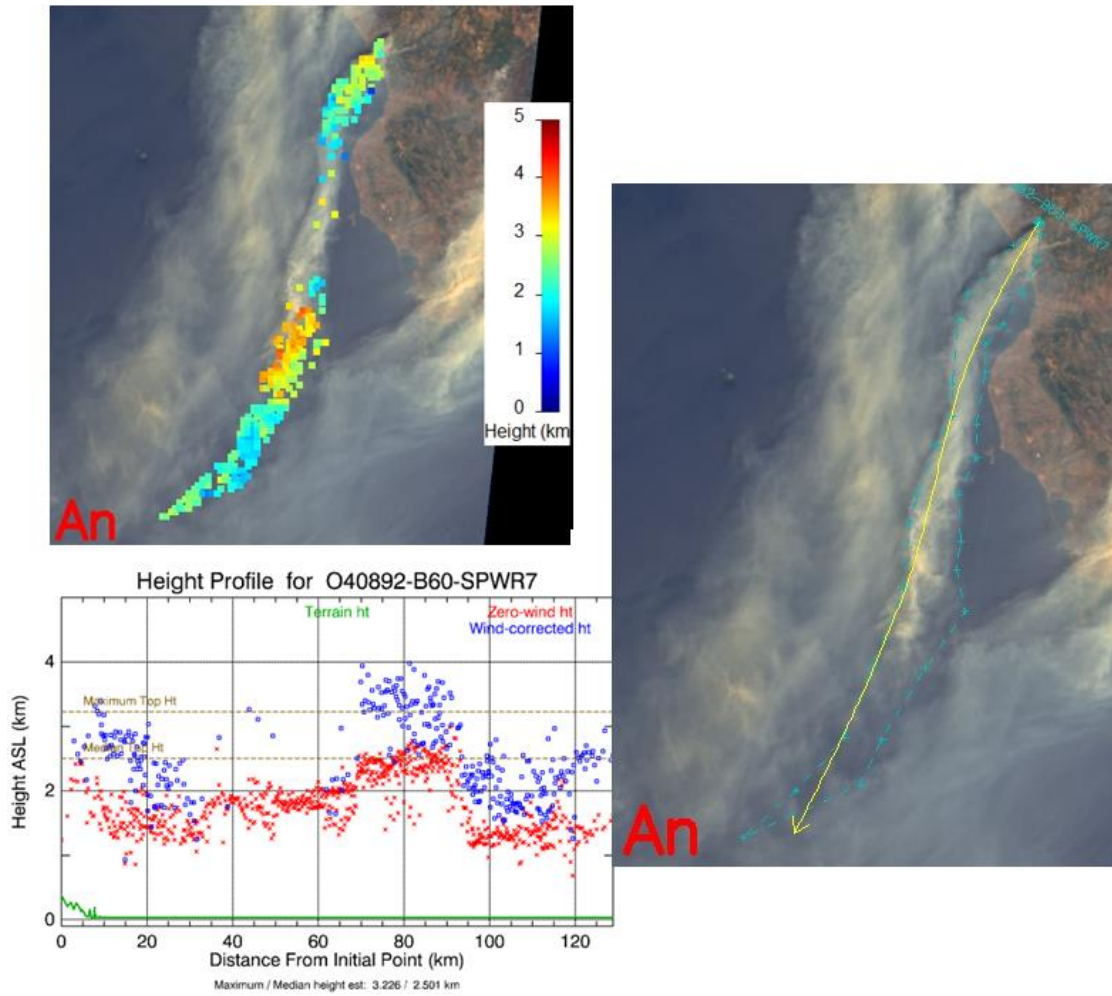
Εικόνα 32: Ύψος αερολυμάτων τέταρτης εστίας

Αρκετά ασθενής καπνός, χωρίς μεγάλη συγκέντρωση αερίων μαζών, με αρκετά υψηλές τιμές σε κάποια από τα αερολύματα. Το μέγιστο ύψος των αερολυμάτων φθάνει στα 3,4 km.



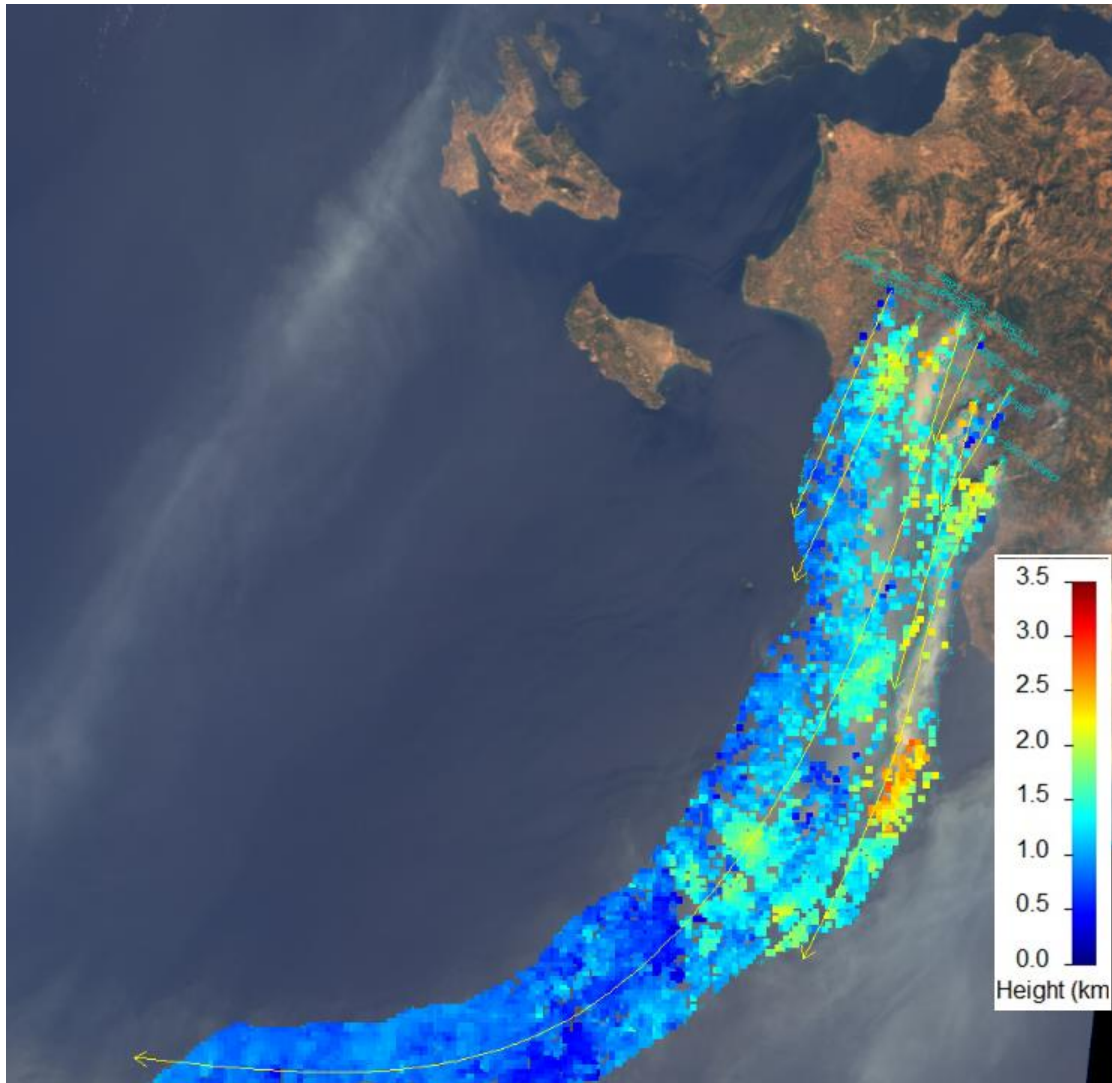
Εικόνα 33: Πέμπτη εστία πυρκαγιάς

Ελάχιστα αιρούμενα σωματίδια καπνού εντοπίστηκαν, με μέγιστο ύψος περίπου τα 2,2 km.



Εικόνα 34: Έκτη εστία πυρκαγιάς

Σημαντική εστία με αρκετά αερολύματα πλησίον της εστίας και συσσώρευση πάλι σημαντικού αριθμού αερολυμάτων σε απόσταση 70 km από την εστία με μέγιστο ύψος τα 3,2 km.



Εικόνα 35: Όλες οι εστίες με τα ύψη του καπνού στις πυρκαγιές της Δυτικής Πελοποννήσου

Συνδυάζοντας όλα τα αποτελέσματα από τις διαφορετικές εστίες δημιουργήθηκε η εικόνα 34 που βλέπουμε παραπάνω. Με την επεξεργασία, λοιπόν, των συγκεκριμένων παρατηρήσεων φαίνεται ένα κατακόρυφο νέφος που φθάνει σε ύψος μέχρι τα 3 km, αντίθετα όσο απομακρυνόμαστε από τις εστίες το ύψος του νέφους μειώνεται κοντά στο 1 km. ⁴⁴

⁴⁴ Sofiou et al., 2014

3.2 Αποτελέσματα ατμοσφαιρικού μοντέλου

Σημαντικές πληροφορίες για να μπορέσει να εξεταστεί ο καπνός των πυρκαγιών είναι αρχικά οι θερμές πηγές φωτιάς και η διάρκεια τους, πληροφορίες που παρέχονται από το εργαλείο MSF SEVIRI. Με σκοπό να υπολογιστεί, λοιπόν, η εκπομπή του καπνού απευθείας από την ένταση της ακτινοβολίας από το δορυφόρο (FRP) χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$E(\text{kg/s}) = C (\text{kg M/J}) * \text{FRP} (\text{MJ/s})$$

Για τη περιοχή μελέτης μας χρησιμοποιούμε τη σταθερά $C=0.026 \text{ kg M/J}$, και τις τιμές του FRP τις χρησιμοποιήθηκαν από τις μετρήσεις του MODIS.

Χρησιμοποιούνται στοιχεία για τις φωτιές διαθέσιμα κάθε πέντε λεπτά από το Fire Monitoring Service του IAASARS/NOA.⁴⁶ Η χωρική ανάλυση του δορυφόρου είναι $3.5 \times 3.5 \text{ km}$. Συμπεριλαμβάνονται επίσης, πληροφορίες σχετικές με τις χρήσεις γης της περιοχής και το τελικό προϊόν απεικονίζεται σε εικόνα ανάλυσης $500 \times 500 \text{ m}$.⁴⁷

Ο συνολικός αριθμός των πυρανιχνεύσεων σύμφωνα με τη βάση δεδομένων MSF SEVIRI του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών ανέρχεται στις 14 μεγάλες εστίες και η προσομοίωση της διασποράς του καπνού με το μοντέλο FLEXPART (εικόνα 35) είναι σε συμφωνία με τις διαθέσιμες παρατηρήσεις.

Το μοντέλο προγραμματίστηκε να τρέξει με θερμή εκκίνηση μιας και έχουμε μελέτη πυρκαγιών, που έχει ως αποτέλεσμα τη αύξηση της θερμοκρασίας και συνδυάστηκε με τα δεδομένα από το εργαλείο SEVIRI με μελέτη των εκπομπών κάθε ώρα.

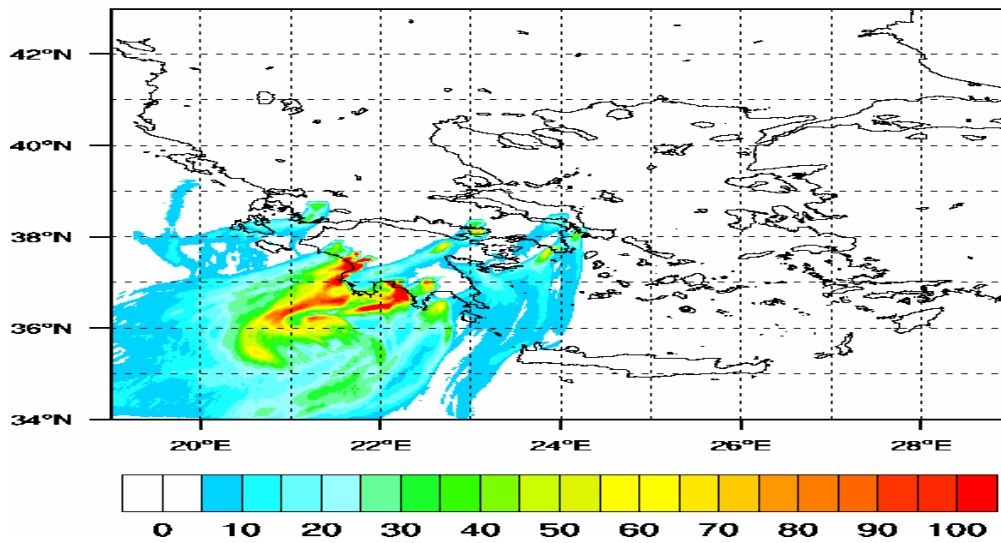
⁴⁵ Sofiev et al., 2014

⁴⁶ http://ocean.space.noa.gr/seviri/fend_new/index.php

⁴⁷ Sifakis et al., 2011; Kyzirakos et al., 2013; Kontoes et al., 2013

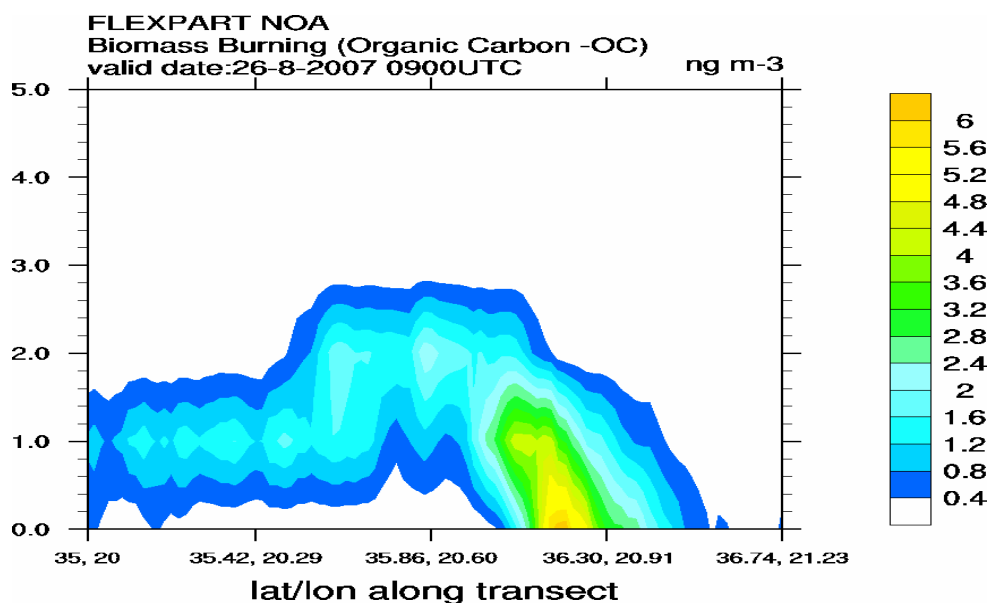
**FLEXPART - NOA
Biomass Burning (Organic Carbon -OC)**

valid date:26-08-2007 0900UTC
Model layer: Integrated Column (ng m⁻³)



Εικόνα 36: Συγκέντρωση σωματιδίων (ng m⁻³)

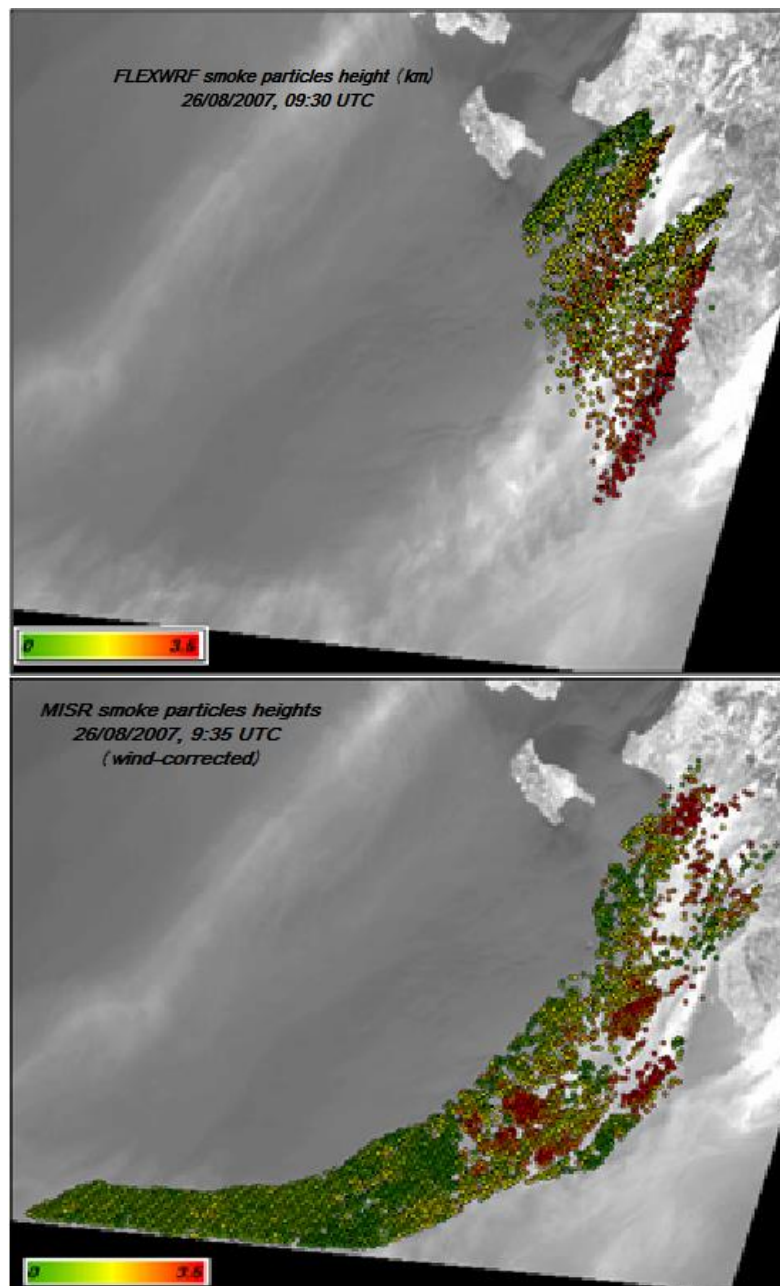
Η προσομοίωση της κατακόρυφης κατανομής των σωματιδίων του καπνού, δείχνει ότι τα σωματίδια του καπνού φθάνουν στα 3 km κοντά στις εστίες των πυρκαγιών (εικόνα 36). Το ίδιο συμβαίνει και στις περιοχές πάνω από τη γήινη επιφάνεια όπου μετακινείται ο καπνός, (στις περιοχές αυτές το στρώμα ανάμιξης είναι βαθύτερο). Αντίστοιχα με τις παρατηρήσεις και με τη χρήση του μοντέλου βλέπουμε ότι το ύψος του καπνού μειώνεται σε απόσταση περίπου 1 km από πάνω από τη θάλασσα.



Εικόνα 37: Κάθετη κατανομή των συγκεντρώσεων των σωματιδίων (ng m⁻³)

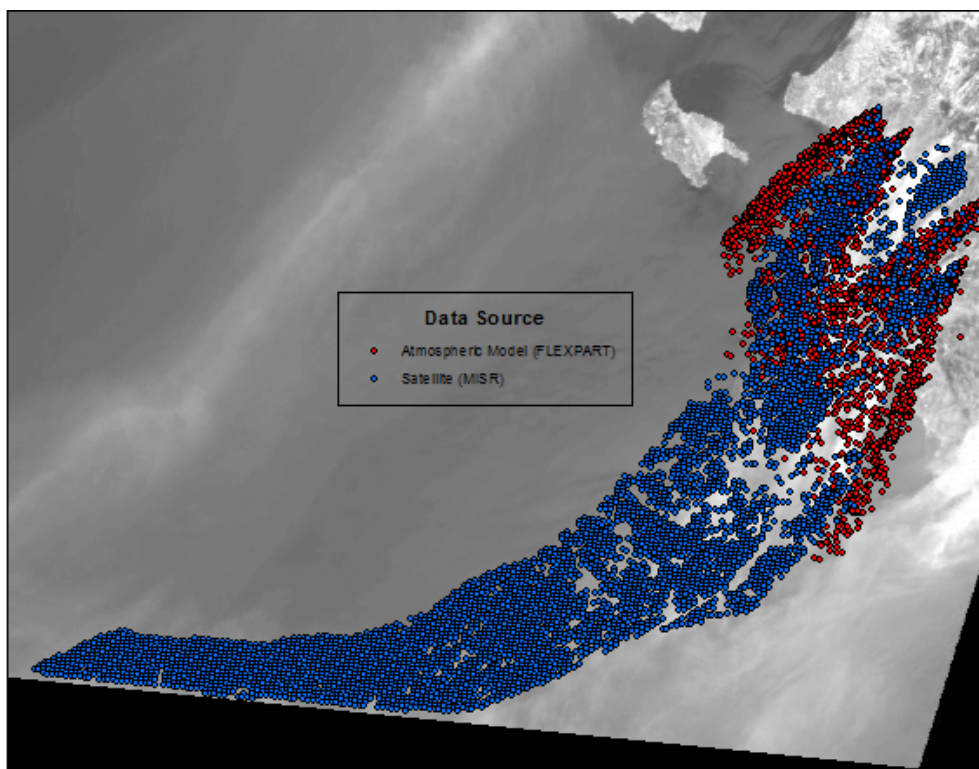
3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων δύο μεθόδων

Δεδομένα από την επεξεργασία των δορυφορικών εικόνων από το εργαλείο παρακολούθησης MISR μας δείχνουν τέσσερεις μεγάλες εστίες πυρκαγιάς στη δυτική Πελοπόννησο. Η διασπορά του καπνού από αυτές τις εστίες συγκρίνεται με τα αποτελέσματα του μοντέλου FLEXPART (εικόνα 37). Με την μελέτη των δύο αποτελεσμάτων βλέπουμε ότι πολλές από τις ιδιότητες του καπνού που ανακτήθηκαν από τις παρατηρήσεις του MISR, αναπαράγονται στο μοντέλο FLEXPART.



Εικόνα 38: Σύγκριση αποτελεσμάτων από τη χρήση των δύο μεθόδων: δορυφορική (κάτω), μοντέλο (επάνω)

Τα σωματίδια του καπνού και με τις δύο μεθόδους ανεβαίνουν σε ύψη μεγαλύτερα των 3 km, που απεικονίζονται με πορτοκαλί (2500 m) και με κόκκινο χρώμα (3000 m). Επιπλέον, παρατηρείται ότι η κατεύθυνση του ανέμου είναι ίδια με τα τμήματα του καπνού που είναι νοτιοδυτικά να φθάνουν το μεγαλύτερο ύψος, ενώ τα τμήματα του καπνού που βρίσκονται βορειότερα εμφανίζονται ασθενέστερα και ο καπνός φθάνει σε χαμηλότερα υψόμετρα στα 1000 m (πράσινο) με περίπου 1500 m (κίτρινα). Ωστόσο, η δημιουργία και διασπορά του καπνού της πυρκαγιάς είναι ένα δυναμικά εξελισσόμενο φαινόμενο και είναι δύσκολο να εξαχθούν γενικά αποτελέσματα από τη σύγκριση με τα δορυφορικά στιγμιότυπα.⁴⁸



Εικόνα 39: Απεικόνιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δύο εφαρμογές, δορυφορική επεξεργασία με μπλε χρώμα και ατμοσφαιρικό μοντέλο με κόκκινο χρώμα

Στην τελική εικόνα 39 των αποτελεσμάτων μας παρατηρούμε ότι και από τις δύο μεθόδους μπορούμε να συλλέξουμε τη σωστή κατεύθυνση του καπνού των πυρκαγιών. Στη περίπτωση της δορυφορικής επεξεργασίας βλέπουμε ότι μπορούμε να εξετάσουμε μεγαλύτερη έκταση του καπνού, απ' ότι με το μοντέλο, διότι το μοντέλο έτρεξε μόνο

⁴⁸ Sofiou et al., 2014

για την μια ημέρα που είχαμε πληροφορία από το δορυφόρο (26/8/07), ενώ ο καπνός που βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από τις εστίες είναι λογικό να προέρχεται από τη πρώτη ημέρα του συμβάντος, λόγω ατμοσφαιρικής μεταφοράς.

4. Συμπέρασμα - Προοπτικές

Στο πλαίσιο της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας εξετάστηκαν οι πυρκαγιές που έλαβαν χώρα στη περιοχή της δυτικής Πελοποννήσου το καλοκαίρι του 2007. Παρατηρήθηκε ο τρόπος μεταφοράς του καπνού από την εστία της εκάστοτε πυρκαγιάς σε συνδυασμό με τις κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής. Με τη χρήση δορυφορικών εικόνων από το εργαλείο MISR του δορυφόρου TERRA, δημιουργήθηκε μια πρώτη εικόνα της κατεύθυνσης του καπνού και με τη χρήση του λογισμικού MINX αποκτήθηκαν πληροφορίες για το ύψος των αεροσωματιδίων του καπνού. Στη συνέχεια με τη χρήση του μοντέλου FLEXPART μελετήθηκαν οι συγκεντρώσεις των σωματιδίων και το πώς διαχέονται στην ατμόσφαιρα.

Με την εφαρμογή του Lagrangian μοντέλου διασποράς FLEXPART σε συνδυασμό με το υψηλής ανάλυσης μοντέλο WRF, που στόχο έχει να υπολογισθεί ο τρόπος μετακίνησης του καπνού από τις πυρκαγιές, φάνηκε η ικανότητα του μοντέλου να αποδίδει ικανοποιητικά παρόμοια γεγονότα.

Σημαντικοί προβληματισμοί δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας που αφορούν τις ιδιότητες του καπνού των πυρκαγιών σε συνδυασμό με τα ύψη που εκπέμπονται. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου FLEXPART και της επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων, παρατηρούμε συμφωνία στα ύψη του καπνού πυρκαγιών στο μεγαλύτερο εύρος της περιοχής.

Η δημιουργία και διασπορά του καπνού, ωστόσο, είναι μια διαδικασία με σημαντική χωροχρονική μεταβλητότητα. Οι δορυφορικές παρατηρήσεις δίνουν μια αρκετά καλή εικόνα του γεγονότος, αλλά επειδή οι παρατηρήσεις του καπνού είναι πολλές φορές αραιές δυστυχώς μπορεί να οδηγηθούμε σε σημαντικές αβεβαιότητες κατά την παρατήρησή του. Ωστόσο, ο εντοπισμός των θέσεων των πυρκαγιών, μέσα από τη βάση δεδομένων MSG SEVIRI αυξάνει τη λεπτομέρεια του μοντέλου με στοιχεία θέσης και διάρκειας της εκάστοτε πυρκαγιάς. Τελικά, παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα και από τα δύο μέσα, τις δορυφορικές εικόνες και το μοντέλο μας, είναι κοινά.

Βιβλιογραφία

Ξένη Βιβλιογραφία

- Amiridis V., Giannakaki E., Balis D.S., Gerasopoulos E., Pytharoulis I., Zanis P., Kazadzis S., Melas D., and Zerefos C., Smoke injection heights from agricultural burning in Eastern Europe as seen by CALIPSO, *Atmos. Chem. Phys.*, 01/2010; 10(8), doi:10.5194/acpd-10-19247-2010, 2010
- Brioude J., D.Arnold, A. Stohl , M. Cassiani , D. Morton , P. Seibert , W. Angevine, S. Evan, A. Dingwell, J. D. Fast, R. C. Easter, I. Pisso, J. Burkhart, and G. Wotawa: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART-WRF version 3.1, *Geosci. Model Dev.*, 6, 1889-1904, /doi:10.5194/gmd-6-1889-2013, 2013
- Brioude, J., Angevine, W. M., McKeen, S. A., and Hsie, E.-Y.: Numerical uncertainty at mesoscale in a Lagrangian model in complex terrain, *Geosci. Model Dev.*, 5, 1127–1136, doi:10.5194/gmd-5-1127-2012, 2012b.
- Byram G.M., 1959, Combustion of forest fuels. In: Davis K.P. (ed.), *Forest Fire: control and use*. New York, McGraw Hill Book Co, pp. 61-89.
- Davies, R.; Horváth, Á.; Moroney, C.; Zhang, B.; Zhu, Y. Cloud motion vectors from MISR using sub-pixel enhancements. *Remote Sens. Environ.* 2007, 107, 194–199.
- DeBano L. F., Daniel G. L., Ffolliot P. F. 1998, *Fire's Effects on Ecosystems*, John Wiley & Sons
- Dokas I., Statheropoulos M and Karma S. 2007, Integration of field chemical data in initial risk assessment of forest fire smoke, *Sci Total Environ.*, 05/2007; 376(1-3):72-85, doi:10.1016/j.scitotenv.2007.01.064, 2007
- IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, 2013

- Jovanovic, V.; Moroney, C.; Nelson, D. Multi-angle geometric processing for globally geo-located and co-registered MISR image data. *Remote Sens. Environ.* 2007, 107, 22–32.
- Justice, C.O.; Giglio, L.; Korontzi, S.; Owens, J.; Morisette, J.T.; Roy, D.; Descloitres, J.; Alleaume, S.; Petitcolin, F.; Kaufman, Y. The MODIS fire products. *Remote Sens. Environ.* 2002, 83, 244–262.
- Kahn R., Chen Y., Nelson D., Leung F.-Y., Li Q., Diner D., Logan J., Wildfire smoke injection heights: Two perspectives from space, *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, L04809, doi: 10.1029/2007GL032165, 2008
- Kahn, R. A., W.-H. Li, C. Moroney, D. J. Diner, J. V. Martonchik, and E. Fishbein: Aerosol source plume physical characteristics from space-based multi-angle imaging, *J. Geophys. Res.*, 112, doi:10.1029/2006JD007647., 2007
- Kontoes C, I. Papoutsis, T. Herekakis, N. Sifakis. Wildfire Rapid Detection and Mapping and Post-fire Damage Assessment in Greece. In *Earthzine magazine*, 09/2013
- Kyzirakos K., M. Karpathiotakis G. Garbis, C. Nikolaou, K. Bereta, I. Papoutsis, T. Herekakis, D. Michail, M. Koubarakis, C. Kontoes, Wildfire monitoring using satellite images, ontologies and linked geospatial data, *Journal of Web Semantics*, 01/2014;24. doi: 10.1016/j.wenbsem.2013.12.002
- Miranda A.I., Amorim J.H., Martins V., Pimentel C., Rodrigues R., Tavares R., Borrego C. (2008) - Numerical modelling of the impact of wildland-urban interface fires on Coimbra air quality. *Proceedings of the 1th International Conference on Modelling, Monitoring and Management of Forest Fires (Forest Fires 2008)*. J. de las Heras, C.A. Brebbia, D. Viegas and V. Leone (Eds.). WITPress. 17-19 September, Toledo, Spain , Vol.19, pp. 333-342. DOI: 10.2495/FIVA080331

- Moroney, C.; Davies, R.; Muller, J.-P. Operational retrieval of cloud-top heights using MISR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 08/2002; doi: 10.1109/TGRS.2002.801150
- Nelson D., Averill C., MISR Interactive eXplorer (MINX) V1.2 User's Guide, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Published on the web @ <https://www.openchannelsoftware.com/projects/MINX> 2009
- Nelson D., Garay M., Kahn R., Dunst B., 2013, Stereoscopic height and wind MISR data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002, 40, 1532–1540.
- Nelson, D.L.; Chen, Y.; Kahn, R.A.; Diner, D.J.; Mazzone, D. Example applications of the MISR Interactive eXplorer (MINX) software tool to wildfire smoke plume analyses. *Proc. SPIE* 2008, 7089, 708909.
- Purser, R. J.; Leslie, L. M. (October 1988). "A Semi-Implicit, Semi-Lagrangian Finite-Difference Scheme Using High-Order Spatial Differencing on a Nonstaggered Grid". *Monthly Weather Review* 116 (10): 2069–2080. doi:10.1175/1520-0493(1988)116<2069:ASISLF>2.0.CO;2. ISSN 0027-064
- Sifakis N., Iossifidis C., Kontoes C., I. Kiremitsoglou, Wildfire detection and tracking over Greece using MSG-SEVIRI satellite data, *Remote Sens.*, 2011, 3, 524-238; doi: 10.3390/rs3030524
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D.M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W., and Powers, J. G.: A description of the advanced research WRF version 3, Tech.Note, NCAR/TN 475+STR, 125 pp., Natl. Cent. for Atmos.Res., Boulder, Colo., USA, 2008.
- Sofiou F. I., V. Amiridis, N. Mihalopoulos Smoke plume characteristics over Greece using space-based multiangle imaging, First International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of Environment (RSCy 2013), Paphos, Cyprus 8-10 April, 2013, Proceedings of SPIE Vol. 8795, 87950D (2013) SPIE Digital Library

- Sofiou F.I., Solomos S., Amiridis V., Herekakis T., Argialas D., Kontoes H., Evaluation of FLEXPART smoke dispersion using MISR plume heights - 12th International Conference on Meteorology, Climatology and Atmospheric Physics - Heraklion, Crete- May 28-31, 2014, Volume: e-book of proceedings ISBN-978-960-524-430-9
- Stohl, A., Sodemann H., Eckhardt S., Frank A., Seibert P., Wotawa G., The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 8.2, FLEXPART user guide, 2011, 1-32, <http://transport.nilu.no/flexpart>
- Val Martin M., Logan J. A., Kahn R. A., Leung F.-Y., Nelson D. L., and Diner D. J., "Smoke injection heights from fires in North America: analysis of 5 years of satellite observations", Atmospheric Chemistry and Physics, 10, 1491–1510, 2010
- Wotawa, G., Stohl, A. and Kromp-Kolb, H.: Parameterization of the planetary boundary layer over Europe - a data comparison between the observation based OML preprocessor and ECMWF model data. Contr. Atmos. Phys., 69, 273–284, 1996.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Γκόφας Α., 2001, Εγχειρίδιο Δασοπροστασίας, Γιαχούδη-Γιαπούλη
- Δουλακάκης Ν., 2013, Ο ρόλος της Δασικής Υπηρεσίας στη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών στον ελληνικό χώρο: παρελθόν, παρόν και μέλλον, Διπλωματική διατριβή, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο
- Ζούντας Ν. 2005, Παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο των πυρκαγιών. Η περίπτωση της Χίου, Διπλωματική διατριβή, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, σελ. 35-40
- Καϊλίδης Δ. 1990, Δασικές Πυρκαγιές (Γ΄ έκδοση), Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη, σελ. 400-450
- Μιμίκου Α.Μ. 1994, Τεχνολογία Υδάτινων Πόρων, Παπασωτηρίου, σελ.100-120

Διαδικτυακοί τόποι

Atmospheric Science Data Center (ASDC), <https://eosweb.larc.nasa.gov/>,
(20/03/2014)

MISR Browse Tool, http://l0dup05.larc.nasa.gov/MISR_BROWSE/
(20/03/2014)

MISR Science Team, <https://www-misr.jpl.nasa.gov/multimedia/misrInstrument/>, (25/03/2014)

NASA, http://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html#.U6WKBPI_sxF, (06/02/2014)

The Weather Research & Forecasting Model, <http://www.wrf-model.org/index.php>, (06/04/2014)

Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων, www.fria.gr, (16/05/2014)

Κωνσταντινίδης Π., 2007, Το πρόβλημα των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα, www.oikologio.gr, (25/02/2014)

Υπουργείο Εσωτερικής Δημόσιας Διοίκησης & Αποκέντρωσης, Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας, <http://civilprotection.gr/el>,
(10/02/2015)

NASA-Terra, <http://terra.nasa.gov/index.php?section=33> , (06/02/2014)

Πυροσβεστικό Σώμα Ελλάδος, www.fireservice.gr, (10/02/2014)

MODVOLC: <http://modis.higp.hawaii.edu/>, 19/03/2014

CILS Research Data Archive, <http://rda.ucar.edu/>, (20/03/2014)

Tribune, www.tribune.gr, (20/03/2014)

BEYOND, <http://ocean.space.noa.gr/BEYONDsite/>, (20/04/2014)

Britannica Encyclopedia, <http://www.britannica.com>, (26/04/2014)