



**ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
"ΠΡΟΗΓΜΕΝΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ"**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Ενιαίο σύστημα διαμόρφωσης πεδίων ροής ανέμου  
και προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών –  
Αξιολόγηση με πραγματικά δεδομένα**

**Ζήσης Μ. Τσιουμάρας**

**Επιβλέπων: Ηλίας Μανωλάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ  
Συνεπιβλέπων: Νίκος Μπόγδος, Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΚΠΑ**

**ΑΘΗΝΑ**

**ΜΑΪΟΣ 2014**



## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Ενιαίο σύστημα διαμόρφωσης πεδίων ροής ανέμου  
και προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών –  
Αξιολόγηση με πραγματικά δεδομένα

**Ζήσης Μ. Τσιουμάρας**

A.M.: 1101

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ηλίας Μανωλάκος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ**  
**ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Νίκος Μπόγδος, Υποψήφιος Διδάκτορας ΕΚΠΑ**



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Προσαρμόσαμε το WindNinja (WN), εργαλείο μοντελοποίησης και προσομοίωσης χωρικά μεταβαλλόμενων πεδίων ροής ανέμου βάσει της μορφολογίας του εδάφους, στις ανάγκες του FLogA, εργαλείου προσομοίωσης, πρόβλεψης και οπτικοποίησης της εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών. Βασικός στόχος μας ήταν να δωθεί στο FLogA η δυνατότητα χρήσης προσαρμοσμένων χωρικά δεδομένων ροής ανέμου ώστε να μην χρησιμοποιεί ενιαίες τιμές διεύθυνσης και ταχύτητας ανέμου για όλο το δάσος. Υλοποιήσαμε πρόγραμμα οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του πεδίου ροής ανέμου, προσαρμόζοντας τις δυνατότητες που παρέχει το WN στις ανάγκες του FLogA. Πραγματοποιήσαμε πολλές προσομοιώσεις με δασικές περιοχές διαφορετικών αναλύσεων, με διαφορετικές αρχικές τιμές ροής ανέμου, για να εκτιμήσουμε την επιβράδυνση που εισάγει η χρήση του WN, σε σχέση με την βελτίωση της ακρίβειας που παρέχει. Τέλος αξιολογήσαμε το ενοποιημένο σύστημα με πραγματικά δεδομένα από 10 δασικές πυρκαγιές στον ελλαδικό χώρο, που μας παρείχε το Αστεροσκοπείο Αθηνών, χρησιμοποιώντας 6 διαφορετικές μεθόδους σύγκρισης των πραγματικών δεδομένων και των αποτελεσμάτων προσομοιώσεων που αναπτύχθηκαν για τους σκοπούς της εργασίας. Τα εκτενή πειράματα έδειξαν πως τα αποτελέσματα της προσομοίωσης βελτιώνονται λίγο με την χρήση του WindNinja, με σημαντική όμως χρονική επιβάρυνση ως προς την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Μοντελοποίηση και προσομοίωση περιβαλλοντικών φαινομένων

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** μοντελοποίηση πεδίου ροής ανέμου, προσομοίωση δασικών πυρκαγιών, οπτικοποίηση



## **ABSTRACT**

In this graduate thesis we investigated the integration of WindNinja (WN), a tool for modeling and simulation of spatially varying wind flow based on the terrain's topography, to FLogA, a tool for realistic simulation and geo-animation of a wildfire's spread over Google Earth. The main objective was to allow FLogA to take advantage by using spatially varying fields (for wind direction and speed), instead of uniform values applied to the whole forest area. We developed a program to visualize wind flow simulation results and adjusted WN visualization capabilities to serve FLogA's needs. We conducted many simulation experiments with forest areas of different wind field and forest grid resolutions to assess the execution time overhead imposed by WN relatively to the expected improvement in simulation accuracy. Finally, we evaluated the integrated system's performance using real data from 10 major wildfires in Greece (data provided by the National Observatory of Athens). We used 6 methods to compare ground truth to simulation results, developed for the purposes of this work. The results of the extensive tests indicate a slight improvement of FlogA's simulation accuracy when using WN, but at the expense of a considerable increase in simulation execution time.

**SUBJECT AREA:** Modeling and Simulation of Physical phenomena

**KEYWORDS:** wind field modeling, modeling and simulation of spreading wildfires, visualization





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ηλία Μανωλάκο και τον υποψήφιο διδάκτορα Νίκο Μπόγδο του Τμήματος Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών για την όμορφη συνεργασία που είχαμε, την καθοδήγηση που μου παρείχαν, την εμπιστοσύνη και την κατανόηση που μου έδειξαν, και την βοήθεια που μου παρείχαν στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους δημιουργούς του WindNinja για τις πολύτιμες συμβουλές που μας έδωσαν στη χρήση των εργαλείων τους, καθώς και το Αστεροσκοπείο Αθηνών και συγκεκριμένα τους ερευνητές κυρίους Ιωάννη Παπουτσή και Θεμιστοκλή Χαιρακάκη της ομάδας του Δρ. Χάρη Κοντοέ οι οποίοι μας παρείχαν τα δεδομένα για τις δασικές πυρκαγιές του 2012, και τη Δρ. Βασιλική Κοτρώνη που μας παρείχε τα μετεωρολογικά δεδομένα.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κοντινούς μου ανθρώπους για την απαραίτητη υποστήριξη που μου προσέφεραν όλο αυτό τον καιρό.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>23</b>
1.1 Εργασία.....	23
1.2 Συνεισφορές της εργασίας.....	24
1.3 Οργάνωση της εργασίας.....	24
<b>2. ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΣΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ .....</b>	<b>25</b>
2.1 Διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού των πεδίων ανέμου.....	25
2.1.1 Μοντέλα που βασίζονται στη σταθερή μάζα .....	26
2.1.2 Μοντέλα Γραμμικής Ροής.....	26
2.1.3 Μοντέλα βασιζόμενα στην Υπολογιστική Ρευστομηχανική .....	26
2.1.4 Εξισώσεις Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS).....	26
2.1.5 Προσομοίωση Μεγάλης Δίνης (Large-eddy simulation, LES) .....	27
2.1.6 Προσομοίωση Ανεξάρτητης Δίνης (Detached eddy simulation, DES).....	27
2.2 Οι προσομοιωτές ανέμου σήμερα.....	27
2.2.1 WindStation .....	28
2.2.2 WindWizard .....	28
2.2.3 WEng.....	29
2.2.4 WindSim .....	29
2.3 Γιατί επιλέχθηκε ο WindNinja.....	29
<b>3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ WINDNINJA.....</b>	<b>31</b>
3.1 Λειτουργία του WindNinja με γραμμή εντολών.....	32
3.2 Ενσωμάτωση του WindNinja στο FLogA .....	34
3.3 Παραλλαγή οπτικοποίησης.....	35
<b>4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ – ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ .....</b>	<b>45</b>
4.1 Συμπεράσματα .....	57
<b>5. ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....</b>	<b>59</b>
5.1 Περιγραφή hotspot δεδομένων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.....	59

5.2 Μέθοδοι σύγκρισης για την ποσοτικοποίηση της ακρίβειας της προσομοίωσης.....	60
5.2.1 Προϋπάρχουσες μέθοδοι σύγκρισης.....	61
5.2.2 Μέθοδοι σύγκρισης που αναπτύχθηκαν.....	67
5.3 Συμπέρασμα.....	78
<b>6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ .....</b>	<b>79</b>
6.1 Μελλοντικές βελτιώσεις και επεκτάσεις.....	80
6.1.1 Ενοποίηση FLogA και WindNinja σε επίπεδο διεπαφής χρήστη.....	80
6.1.2 Νέες μέθοδοι σύγκρισης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων .....	81
6.1.3 Βελτίωση αναπαράστασης αποτελεσμάτων της προσομοίωσης πεδίου ανέμου .....	81
6.1.4 Εισαγωγή δεδομένων καιρού σε πραγματικό χρόνο.....	81
6.2 Εν τέλει.....	82
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....</b>	<b>83</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ.....</b>	<b>101</b>
<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ .....</b>	<b>103</b>
<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....</b>	<b>105</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 4.1: Ακρίβεια προσομοίωσης σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικές σχέσεις επιφάνειας κελιού εδάφους – κελιού ανέμου .....	47
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του WindNinja στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 500x500 κελιών και μέγεθος κελιού 54m x 54m.....	49
Σχήμα 4.3: Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του FLogA στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 500x500 κελιών και μέγεθος κελιού 54m x 54m.....	50
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα με τις τιμές ακρίβειας στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 500x500 κελιών με μέγεθος κελιού 54m x 54m.....	50
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του WindNinja στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 375x375 κελιών και μέγεθος κελιού 72m x 72m.....	51
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του FLogA στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 375x375 κελιών και μέγεθος κελιού 72m x 72m.....	51
Σχήμα 4.7: Διάγραμμα με τις τιμές ακρίβειας στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 375x375 κελιών με μέγεθος κελιού 72m x 72m.....	52
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του WindNinja στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 250x250 κελιών και μέγεθος κελιού 108m x 108m.....	52
Σχήμα 4.9: Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του FLogA στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 250x250 κελιών και μέγεθος κελιού 108m x 108m.....	53
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα με τις τιμές ακρίβειας στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 250x250 κελιών με μέγεθος κελιού 108m x 108m.....	53
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα με συγκεντρωτικά δεδομένα από τις πραγματοποιηθείσες προσομοιώσεις .....	55
Σχήμα 4.12: Ακρίβεια προσομοίωσης σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικές σχέσεις επιφάνειας κελιού εδάφους – κελιού στο δάσος μεγέθους πλέγματος 250x250, κελιού πλευράς 108m και ταχύτητας ανέμου 3m/s.....	57
Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο καλύτερου σεναρίου .....	62
Σχήμα 5.1: Γραφική παράσταση με τους μέσους όρους ανά πεντάλεπτο όλων των προσομοιώσεων των 10 δασικών πυρκαγιών του 2012 με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο καλύτερου σεναρίου .....	62
Σύγκριση ακρίβειας με τη μέθοδο καλύτερου σεναρίου .....	63

Σχήμα 5.2: Γραφική παράσταση μιας προσομοίωσης δασικής πυρκαγιάς στον FLogA με και χωρίς τη χρήση του WindNinja.....	63
Εικόνα 5.2: Παράδειγμα οπτικοποίησης των πιθανοτήτων καύσης (fire risk).....	64
Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο καλύτερου κατωφλίου (fire risk threshold) .....	65
Σχήμα 5.3: Γραφική παράσταση με τους μέσους όρους των Similarity Scores όλων των προσομοιώσεων με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο καλύτερου κατωφλίου (fire risk threshold) .....	65
Μέσοι όροι των καλύτερων κατωφλίων από τη μέθοδο καλύτερου κατωφλίου (fire risk threshold) .....	66
Σχήμα 5.4: Γραφική παράσταση με τους μέσους όρους της τιμής του βέλτιστου κατωφλίου (fire risk threshold) όλων των προσομοιώσεων των 10 δασικών περιοχών με και χωρίς τη χρήση του WindNinja .....	66
Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο μέσης πιθανότητας πυρκαγιάς κάθε πολυγώνου NOA.....	68
Σχήμα 5.5: Γραφική παράσταση με τους μέσους όρους όλων των προσομοιώσεων των 10 δασικών περιοχών για κάθε χρονική στιγμή με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο μέσης πιθανότητας πυρκαγιάς για κάθε πολυγώνου NOA .....	68
Σύγκριση ακρίβειας με τη μέθοδο μέσης πιθανότητας πυρκαγιάς κάθε πολυγώνου NOA .....	70
Σχήμα 5.6: Γραφική παράσταση μιας προσομοίωσης πυρκαγιάς στον FLogA με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο μέσης πιθανότητας πυρκαγιάς κάθε πολυγώνου NOA .....	70
Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο “μέσο κατώφλι πιθανότητας κάτω από το οποίο τουλάχιστον το 50% του NOA πολυγώνου έχει καεί!” .....	72
Σχήμα 5.7: Γραφική παράσταση με τους μέσους όρους για κάθε χρονική στιγμή όλων των προσομοιώσεων των 10 δασικών περιοχών με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο “μέσο κατώφλι πιθανότητας” .....	72
Σύγκριση ακρίβειας με τη μέθοδο “μέσο κατώφλι πιθανότητας” .....	73
Σχήμα 5.8: Γραφική παράσταση του κατωφλίου μιας προσομοίωσης πυρκαγιάς στον FLogA με και χωρίς τη χρήση του WindNinja χρησιμοποιώντας την μέθοδο “μέσο κατώφλι πιθανότητας” .....	73
Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο “λόγος των εξωτερικών/εσωτερικών καμένων κελιών” .....	75
Σχήμα 5.9: Γραφική παράσταση των μέσων όρων όλων των προσομοιώσεων για κάθε χρονική στιγμή με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο “λόγος των εξωτερικών/εσωτερικών καμένων κελιών” .....	75
Σύγκριση ακρίβειας με τη μέθοδο “λόγος των εξωτερικών/εσωτερικών καμένων κελιών” .....	75
Σχήμα 5.10: Γραφική παράσταση μιας προσομοίωσης πυρκαγιάς στον FLogA με και χωρίς τη χρήση του WindNinja χρησιμοποιώντας τη μέθοδο “λόγος των εξωτερικών/εσωτερικών καμένων κελιών” .....	76

Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο “λόγος των μέσων πιθανοτήτων πυρκαγιάς των εξωτερικών/εσωτερικά καμένα κελιά” .....	77
Σχήμα 5.11: Γραφική παράσταση των μέσων όρων όλων των προσομοιώσεων για κάθε χρονική στιγμή με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη Μέθοδο “ λόγος των μέσων πιθανοτήτων πυρκαγιάς των εξωτερικών/εσωτερικά καμένα κελιά” .....	77
Σύγκριση ακρίβειας με τη μέθοδο “λόγος των μέσων πιθανοτήτων πυρκαγιάς των εξωτερικών/εσωτερικά καμένα κελιά” .....	78
Σχήμα 5.12: Γραφική παράσταση μιας προσομοίωσης πυρκαγιάς στον FLogA με και χωρίς τη χρήση του WindNinja για την μέθοδο “λόγος των μέσων πιθανοτήτων πυρκαγιάς των εξωτερικών/εσωτερικά καμένα κελιά” .....	78





## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 3.1 Κοντινή άποψη της επιρροής του εδάφους στο WindNinja [27] .....	31
Εικόνα 3.2 Παράδειγμα επιρροής του εδάφους στο WindNinja όπως αυτή φαίνεται στο Google Earth [28] .....	31
Εικόνα 3.3: Τυπική έξοδος WindNinja .....	37
Εικόνα 3.4: Έξοδος του WNVisualization με χρήση του χρώματος για την αναπαράσταση της έντασης του ανέμου, με κάθε βέλος να αντιστοιχεί σε περιοχή 30 κελιών και με χρήση της μικρότερης τιμής έντασης ανέμου σαν ελάχιστη τιμή στα όρια της κβάντισης .....	38
Εικόνα 3.5: Έξοδος του WNVisualization με χρήση χρώματος για την οπτική αναπαράσταση της έντασης του ανέμου, με κάθε βέλος να αντιστοιχεί σε περιοχή 50 κελιών και με χρήση της μικρότερης τιμής έντασης ανέμου σαν ελάχιστη τιμή στα όρια της κβάντισης .....	39
Εικόνα 3.6: Έξοδος του WNVisualization με χρήση χρώματος για την οπτική αναπαράσταση της έντασης του ανέμου, με κάθε βέλος να αντιστοιχεί σε περιοχή 50 κελιών και με χρήση του μηδενός σαν ελάχιστη τιμή στα όρια της κβάντισης .....	40
Εικόνα 3.7: Έξοδος του WNVisualization με χρήση του μήκους του βέλους για την οπτική αναπαράσταση της έντασης του ανέμου, με κάθε βέλος να αντιστοιχεί σε περιοχή 50 κελιών κελιού και με χρήση της μικρότερης τιμής έντασης ανέμου σαν ελάχιστη τιμή στα όρια της κβάντισης .....	41
Εικόνα 3.8: Έξοδος του WNVisualization με χρήση του χρώματος για την οπτική αναπαράσταση της έντασης του ανέμου, με κάθε βέλος να αντιστοιχεί σε περιοχή 100 κελιών και με χρήση της μικρότερης τιμής έντασης ανέμου σαν ελάχιστη τιμή στα όρια της κβάντισης .....	42
Εικόνα 5.1: Στιγμιότυπο από την οπτικοποίηση στο Google Earth της προσομοίωσης της δασικής πυρκαγιάς της Χίου 2012. Τα πολύγωνα αναπαριστούν τα hotspots που δημοσιεύει το NOA και ανανεώνονται ανά 5 λεπτά .....	60
Εικόνα 5.3: Παράδειγμα απεικόνιση ίδιας δασικής περιοχής με τέσσερα πολύγωνα NOA και περιπτώσεις υποεκτίμησης, εκτίμησης κοντά στην πραγματικότητα και υπερεκτίμησης της δασικής πυρκαγιάς .....	69
Εικόνα 5.4: Οπτικοποίηση της εξόδου του FLogA στο 90ο λεπτό της προσομοίωσης. Αριστερά είναι η προσομοίωση χωρίς τη χρήση του WindNinja και δεξιά με χρήση του WindNinja .....	73
Εικόνα 1.1: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s .....	83
Εικόνα 1.2: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s .....	84
Εικόνα 1.3: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s .....	85
Εικόνα 1.4: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s .....	86
Εικόνα 1.5: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s .....	87

Εικόνα Ι.6: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s.....	88
Εικόνα Ι.7: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s.....	89
Εικόνα Ι.8: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s.....	90
Εικόνα Ι.9: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s.....	91
Εικόνα Ι.10: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s.....	92
Εικόνα Ι.11: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s.....	93
Εικόνα Ι.12: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s.....	94
Εικόνα Ι.13: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s.....	95
Εικόνα Ι.14: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s.....	96
Εικόνα Ι.15: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s.....	97
Εικόνα Ι.16: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s.....	98
Εικόνα Ι.17: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s.....	99
Εικόνα Ι.18: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s.....	100

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1: Βασικές παράμετροι εισόδου χρήσης του WindNinja .....	33
Πίνακας 3.2: Παράμετροι εισόδου του βοηθητικού προγράμματος WNVisualization .....	36
Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ένα μέγεθος δάσους και μία τιμή ανέμου όπως αυτά παράγονται από το αντίστοιχο rhp script.....	47
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ένα μέγεθος δάσους και μία τιμή ανέμου όπως αυτά παράγονται από το αντίστοιχο rhp script.....	48



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Εργαλεία μοντελοποίησης και προγράμματα προσομοίωσης κάνουν ευκολότερη την μελέτη και αντιμετώπιση επικίνδυνων περιβαλλοντικών φαινομένων, όπως είναι για παράδειγμα οι δασικές πυρκαγιές. Με τη σημερινή υπολογιστική ισχύ καθώς και την τεχνολογική πρόοδο στο επίπεδο των εφαρμογών, τα εργαλεία αυτά είναι άμεσα διαθέσιμα στους επιστήμονες για ακριβή πειράματα με ουσιαστικά αποτελέσματα. Όσον αφορά την μοντελοποίηση και την προσομοίωση του πεδίου του ανέμου γενικότερα, αλλά και το πώς αυτό επηρεάζει τις δασικές πυρκαγιές ειδικότερα, υπάρχουν αρκετές προσπάθειες από ερευνητικές και επιχειρηματικές ομάδες με διαφορετικές προσεγγίσεις στην κάθε υλοποίηση.

Σε αυτά τα πλαίσια η παρούσα εργασία, που πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Αθηνών υπό την καθοδήγηση των Ηλία Μανωλάκου, Αναπληρωτή Καθηγητή και Νίκου Μπόγδο, Υποψήφιου Διδάκτορα, παρουσιάζει την ενσωμάτωση του WindNinja, ενός εργαλείου προσομοίωσης του πεδίου του ανέμου βάσει της μορφολογίας του εδάφους που δημιουργήθηκε από ερευνητική ομάδα στο εργαστήριο Missoula Fire Sciences Laboratory της πόλης Missoula (Μοντάνα, Ηνωμένες Πολιτείες), και του FLogA, ενός εργαλείου ρεαλιστικής προσομοίωσης για την πρόβλεψη και οπτικοποίηση της εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών, που δημιουργήθηκε από τον υποψ. διδάκτορα Νίκο Μπόγδο στο Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου Αθηνών. Σκοπός της ενσωμάτωσης του δημόσια διαθέσιμου εργαλείου WindNinja στο εργαλείο FLogA ήταν η διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης σε προσομοιώσεις δασικών πυρκαγιών χωρικά μεταβαλλόμενων πεδίων έντασης και διεύθυνσης ανέμου που θα προκύπτουν βάσει της μορφολογίας του εδάφους και όχι μιας ομοιόμορφης τιμής ενιαίας για όλο το υπό εξέταση δάσος.



## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα φαινόμενο με μεγάλες κοινωνικές, οικολογικές και οικονομικές συνέπειες. Κάθε χρόνο, κυρίως σε περιοχές με ζεστό και ξηρό κλίμα, παρατηρούμε πυρκαγιές σε δασικές περιοχές που εκτός της περιβαλλοντικής καταστροφής μπορεί να κοστίζουν και ανθρώπινες ζωές. Είναι γεγονός πως οι δασικές πυρκαγιές είναι και ένας φυσικός τρόπος για το δάσος να ρυθμίζει την καύσιμη ύλη του και να ανανεώνεται, παρόλα αυτά η πλειοψηφία των δασικών πυρκαγιών έχουν σαν αιτία τους την ανθρώπινη δραστηριότητα και προκαλούν δυσάρεστες συνέπειες.

Καθοριστικός παράγοντας στην πρόκληση και την εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών είναι ο άνεμος. Η ένταση και η διεύθυνση του ανέμου μπορεί να θεωρηθεί σαν μια παράμετρος που, σχεδόν από μόνη της, μπορεί να καθορίσει της συνέπειες μιας δασικής πυρκαγιάς. Για αυτό και η μελέτη του πεδίου του ανέμου κατά την διάρκεια μιας δασικής πυρκαγιάς είναι πολύ σημαντική.

Στα πλαίσια της δημιουργίας ενός εργαλείου προσομοίωσης της συμπεριφοράς των δασικών περιοχών αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο Αθηνών ο FLogA, που είναι μία διαδραστική εφαρμογή ιστού η οποία δημιουργεί όλα τα απαραίτητα χωρικά αρχεία εισόδου για μια καθορισμένη δασική περιοχή που μπορεί να βρίσκεται οπουδήποτε στην Ευρώπη, και έχει τη δυνατότητα να προσομοιώνει και να οπτικοποιεί την εξάπλωση του μετώπου μιας δασικής πυρκαγιάς [1]. Ο FLogA αντιμετωπίζει τον άνεμο σαν μια ομοιόμορφη τιμή στο χώρο όσον αφορά την ένταση και την διεύθυνση του. Καθώς όμως η επιρροή που έχει ο άνεμος στις δασικές περιοχές, όπως είπαμε, είναι τεράστια, είναι πολύ χρήσιμη η ένταξη της έννοιας του μεταβαλλόμενου πεδίου ανέμου στην έκταση της δασικής περιοχής που μελετάμε. Αυτό αναμένεται να δώσει πιο ακριβή αποτελέσματα στην προσομοίωση της εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς. Επίσης και η οπτική αναπαράσταση των τιμών της έντασης και της διεύθυνσης του ανέμου σε όλη τη περιοχή θα βοηθούσε στην καλύτερη κατανόηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

### 1.1 Εργασία

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας ενσωματώθηκε στο εργαλείο FLogA, ο WindNinja [2], ένα πρόγραμμα λογισμικού που υπολογίζει χωρικά μεταβαλλόμενα πεδία ανέμου και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μοντελοποίησης φυσικών φαινομένων, όπως οι προσομοιωτές δασικών πυρκαγιών. Η βάση του συστήματος είναι ο

FLogA και με αυτόν εξακολουθεί να γίνεται η επικοινωνία με το χρήστη. Το εργαλείο WindNinja προετοιμάζει την είσοδο του ανέμου (ένταση και διεύθυνση) στις απαιτήσεις εκτέλεσης του FLogA. Ακόμα υλοποιήθηκε λογισμικό που οπτικοποιεί τα αποτελέσματα του ανέμου σε συνδυασμό με την οπτικοποίηση που παράγει ο WindNinja. Τέλος μετρήθηκε η χρονική επιβάρυνση που έχει η χρήση του WindNinja σε σχέση με την ακρίβεια που πρόσθετε στα αποτελέσματα και δοκιμάστηκε σε πραγματικά δεδομένα από τις 10 μεγαλύτερες φωτιές του καλοκαιριού του 2012 στον Ελλαδικό χώρο.

## 1.2 Συνεισφορές της εργασίας

Οι συνεισφορές της παρούσης εργασίας συνοψίζονται στα παρακάτω:

1. Επέκταση του εργαλείου ρεαλιστικής προσομοίωσης για την πρόβλεψη και οπτικοποίηση της εξάπλωσης δασικών πυρκαγιών FLogA ενσωματώνοντας στη λογική της προσομοίωσης το εργαλείο WindNinja για τον υπολογισμό χωρικά μεταβαλλόμενου ανέμου κατά την προσομοίωση.
2. Επέκταση των δυνατοτήτων οπτικοποίησης της εξόδου του WindNinja.
3. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων βάσει συνθετικών και πραγματικών δεδομένων από τις φωτιές το καλοκαίρι 2012.

## 1.3 Οργάνωση της εργασίας

Η υπόλοιπη εργασία είναι οργανωμένη ως εξής: Το κεφάλαιο 2 εστιάζει στην μοντελοποίηση του ανέμου στην προσομοίωση των δασικών πυρκαγιών κάνοντας αναφορά στα διάφορα εργαλεία που υπάρχουν διαθέσιμα και στους διαφορετικούς τύπους εργαλείων. Το κεφάλαιο 3 περιγράφει το εργαλείο WindNinja, τη λειτουργία του και το πως ενσωματώθηκε στον προσομοιωτή FLogA, μαζί με τις λεπτομέρειες της οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων του WindNinja. Το κεφάλαιο 4 ασχολείται με την διαδικασία σύγκρισης σχέσης μεγέθους κελιού δάσους και κελιού πλέγματος ανέμου όσον αφορά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων και της χρονικής καθυστέρησης που επιφέρει η αύξηση της ανάλυσης των κελιών. Στο κεφάλαιο 5 περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε πραγματικά δεδομένα από πυρκαγιές στην Ελλάδα το καλοκαίρι του 2012. Τέλος στο κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συμπεράσματα και περιγράφονται πιθανές κατευθυντήριες γραμμές για μελλοντικές βελτιώσεις.



## **2. ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΣΤΗΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ**

Οι δασικές πυρκαγιές είναι φαινόμενο που προκαλείται κυρίως από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Οι επιπτώσεις της είναι μεγάλες τόσο σε οικολογικό και περιβαλλοντολογικό επίπεδο, όσο και σε κοινωνικό και οικονομικό. Παγκοσμίως απαριθμούνται πολλά ανθρώπινα θύματα σε ετήσια βάση λόγω των δασικών πυρκαγιών. Όλα αυτά έχουν σαν συνέπεια η προσομοίωση των δασικών πυρκαγιών να είναι ένα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια των ειδικών για την μελέτη της συμπεριφοράς τους και τελικά για την αντιμετώπιση ή ακόμα και την πρόληψη τους. Καθώς ο άνεμος είναι ένας από τους βασικότερους παράγοντες που επηρεάζει την συμπεριφορά και την εξέλιξη των δασικών πυρκαγιών, η μοντελοποίηση του πεδίου ανέμου στα πλαίσια της προσομοίωσης των δασικών πυρκαγιών είναι πολύ σημαντική. Η χρήση πλεγμάτων πεδίων ανέμου που έχουν δημιουργηθεί βάσει της μορφολογίας του εδάφους, δηλαδή υψομετρικές διαφορές του εδάφους, κλίσεις κλπ., ενδέχεται να δίνει καλύτερα και πιο ακριβή αποτελέσματα προσομοίωσης πυρκαγιών σε σχέση με ομοιόμορφες τιμές εισόδου για την ένταση και την διεύθυνση του ανέμου. Βέβαια η παραγωγή αυτών των πλεγμάτων ανέμου μπορεί να πραγματοποιηθεί με διαφορετικούς τρόπους, κάποιοι από τους οποίους περιγράφονται στη συνέχεια.

### **2.1 Διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού των πεδίων ανέμου**

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό χωρικά μεταβαλλόμενων πεδίων ανέμου. Οι πιο σημαντικοί είναι οι ακόλουθοι [3-8,30,31].

- Χρήση μοντέλων που βασίζονται στη σταθερή μάζα (Mass-consistent models)
- Χρήση μοντέλων γραμμικής ροής (Linear flow models)
- Χρήση Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (Computational fluid dynamics, CFD)
- Χρήση εξισώσεων Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)
- Προσομοίωση Μεγάλης Δίνης (Large-eddy simulation, LES)
- Προσομοίωση Ανεξάρτητης Δίνης (Detached eddy simulation, DES)

### **2.1.1 Μοντέλα που βασίζονται στη σταθερή μάζα**

Τα μοντέλα που βασίζονται στη σταθερή μάζα (mass-consistent models) [3] προβλέπουν πεδία ροής ανέμου που προκύπτουν από μετεωρολογικές μετρήσεις διεσπαρμένες στο επίπεδο. Οι ενδιάμεσες τιμές προκύπτουν από παρεμβολή που ακολουθείται από μεθόδους (αλγορίθμους) διόρθωσης σφάλματος [4]. Η πρόβλεψη είναι κινητικά (αν και όχι απαραίτητα φυσικώς) σωστή, καθώς αγνοούνται εξισώσεις ορμής. Τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν αρχικές συνθήκες σε πιο εξελιγμένα μοντέλα ροής ανέμου ή σε συστήματα μειωμένης υπολογιστικής ισχύς που χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης και υπάρχει απαίτηση για γρήγορα αποτελέσματα. Προφανώς η ακρίβεια της παρεμβολής είναι μεγαλύτερη σε περιοχές γειτονικές των μετεωρολογικών μετρήσεων.

### **2.1.2 Μοντέλα Γραμμικής Ροής**

Τα μοντέλα γραμμικής ροής προβλέπουν μικρές αποκλίσεις από μια λύση αναφοράς (reference solution). Οι μη γραμμικοί όροι προσεγγίζονται από πράξεις μεταξύ των εκάστοτε καταστάσεων και των διαταραχών και αντιμετωπίζονται σαν γραμμικοί. Αυτό επιτρέπει την υπέρθεση των λύσεων και συχνά είναι δυνατόν να απλοποιηθεί το πρόβλημα σε δύο μέρη και να λυθεί για μεμονωμένα κύματα με χρήση μεθόδων Fourier [5].

### **2.1.3 Μοντέλα βασιζόμενα στην Υπολογιστική Ρευστομηχανική**

Η Υπολογιστή Ρευστομηχανική [6] είναι ένας γενικότερος όρος για την αριθμητική πρόβλεψη της ροής της ταχύτητας σε ένα υπολογιστικό πλέγμα. Αυτά τα μοντέλα είναι ικανά να κάνουν υπολογισμούς χωριστά για ροή και για στροβιλισμούς.

### **2.1.4 Εξισώσεις Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)**

Οι εξισώσεις Reynolds-averaged Navier-Stokes [7] περιγράφουν την μέση κίνηση μιας ταραχώδους ροής (στροβιλισμοί). Η ταχύτητα και η πίεση στις εξισώσεις Navier-Stokes διαχωρίζονται σε μέσες και τυχαίες διαταραχές, υπολογίζονται οι μέσες τιμές αυτών και οι όροι που προκύπτουν από συσχετιζόμενες διαταραχές ερμηνεύονται ως δυνάμεις στροβιλισμού. Η τυρβώδης τάση Reynolds [8] αποτελεί σημαντική συμβολή και διαμορφώνεται από ένα κλειστό μοντέλο στροβιλισμού. Το άμεσο αποτέλεσμα του

ιξώδους τριβής για την μέση ροή είναι ασήμαντο σε πλήρως ανεπτυγμένες τυρβώδης ροές.

### **2.1.5 Προσομοίωση Μεγάλης Δίνης (Large-eddy simulation, LES)**

Η προσομοίωση μεγάλης δίνης [30] είναι παρόμοια με τις εξισώσεις *Reynolds-averaged Navier-Stokes* με την διαφορά ότι μόνο οι μικρής κλίμακας αναταραχές συμβάλλουν στις δυνάμεις Reynolds, ενώ οι εξαρτώμενες από το χρόνο μεγάλης κλίμακας κινήσεις επιλύονται αριθμητικά. Η συγκεκριμένη προσομοίωση (LES) είναι χρήσιμη σε ασταθή φαινόμενα ροής, αλλά είναι υπολογιστικά ακριβή.

### **2.1.6 Προσομοίωση Ανεξάρτητης Δίνης (Detached eddy simulation, DES)**

Η προσομοίωση Ανεξάρτητης Δίνης είναι ένα υβριδικό μοντέλο το οποίο αλλάζει αυτόματα από την προσέγγιση LES, όταν έχουμε εξωτερική ροή, στην προσέγγιση RANS για την ροή κοντά στα οριακά επίπεδα. Το κίνητρο είναι ότι η κλίμακα μήκους (scale length) της τυρβώδους ροής μικραίνει κοντά στα όρια και δημιουργείται πρόβλημα σε μια κλασική υλοποίηση της προσομοίωσης LES σε πλέγματα πεπερασμένης ανάλυσης [31].

## **2.2 Οι προσομοιωτές ανέμου σήμερα**

Με χρήση των τρόπων υπολογισμού του προηγούμενου εδαφίου έχουν αναπτυχθεί συστήματα ανάλυσης, υπολογισμού και σε κάποιες περιπτώσεις, πρόβλεψης της ροής του ανέμου σε σχέση με το περιβάλλον (επίπεδο ή χώρος) στο οποίο κινείται. Η μορφολογία του εδάφους, η ανύψωση, η τραχύτητα, η βλάστηση, καθώς και η ανάλυση στην οποία αυτά θα δοθούν, σε συνδυασμό με την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου σε κάποια σημείο του πλέγματος του εδάφους (αν δοθούν μετεωρολογικά δεδομένα) είναι τα δεδομένα που θα χρειαστούν ώστε να μπορέσουμε να έχουμε αποτέλεσμα στους υπολογισμούς μας. Ο όγκος των δεδομένων αυτών αλλά και το μέθοδος της ανάλυσης που θα χρησιμοποιηθεί στο κάθε σύστημα, καθορίζουν το κατά πόσο τα αποτελέσματα είναι ακριβή και λεπτομερή ή όχι. Παρακάτω παρουσιάζονται οι κυριότεροι προσομοιωτές ανέμου που υπάρχουν σήμερα και τα βασικότερα χαρακτηριστικά τους. Οι πιο πολλοί από αυτούς είναι εμπορικοί και ανήκουν σε σύνολα προγραμμάτων (program suites) που περιλαμβάνουν και προσομοιωτές δασικών πυρκαγιών.

### 2.2.1 WindStation

Το WindStation [9] χρησιμοποιεί δυο μοντέλα ανέμου, το NUATMOS [10] και το CANYON [11] και ο χρήστης μπορεί να επιλέξει πιο από τα δύο θα χρησιμοποιήσει. Και τα δύο μοντέλα δέχονται περιγραφή του εδάφους (συνήθως με τη μορφή πλέγματος τιμών), μια ενιαία τιμή τραχύτητας του εδάφους (terrain roughness), και μετρήσεις έντασης και διεύθυνσης ανέμου από μετεωρολογικούς σταθμούς της περιοχής. Το αποτέλεσμα είναι πίνακες τιμών έντασης και διεύθυνσης ανέμου που αναπαριστούν το πλέγμα της υπό εξέταση περιοχής.

Το μοντέλο NUATMOS ανήκει στην κατηγορία μοντέλων συνέπειας μάζας και είναι γρήγορο στην εκτέλεσή του. Το μοντέλο CANYON υπερτερεί σε ακρίβεια πρόβλεψης της αλλαγής κατεύθυνσης του ανέμου και της συμπεριφοράς του στην υπήνεμη πλευρά των λόφων αλλά υστερεί σε ταχύτητα υπολογισμών και εκτέλεσης καθώς είναι ένας 3D Navier-Stokes επιλυτής (solver). Είναι τόσο αργό ώστε να μην είναι δυνατή η χρήση του σε εφαρμογές προσομοίωσης πυρκαγιάς πραγματικού χρόνου. Και τα δύο μοντέλα έχουν δοκιμαστεί αρκετά χωρίς όμως να τυγχάνουν καλών εντυπώσεων από ερευνητές του χώρου [29].

Η υλοποίηση του WindStation είναι αρκετά παλιά και δεν είναι διαθέσιμη για χρήση.

### 2.2.2 WindWizard

Το πρόγραμμα *WindWizard* [12] είναι κομμάτι της σουίτας προγραμμάτων *FARSITE fire modelling* [13] και χρησιμοποιείται για να δημιουργήσει χάρτες ανέμου οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν σαν δεδομένα εισόδου στα προγράμματα προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών *FARSITE* και *FlamMap* [14]. Ακόμα οι χάρτες ανέμου που δημιουργεί μπορεί να φανούν πολύ χρήσιμοι στους πυροσβέστες στη διάρκεια κατάσβεσης πυρκαγιών ή στην οργάνωση του τρόπου δράσης τους.

Το μοντέλο χρειάζεται την πληροφορία του υπό εξέταση εδάφους σε μορφή πλέγματος, μια αρχική τιμή για την ένταση και την διεύθυνση του ανέμου καθώς και να επιλεγθεί μια τιμή για της κύρια βλάστηση της περιοχής (δέντρα, θάμνοι ή γρασίδι). Σαν αποτέλεσμα εξάγει ένα πλέγμα τιμών ταχύτητας και διευθύνσεων ανέμου. Για την επίλυση της μοντελοποίησης χρησιμοποιεί υπολογιστική ρευστομηχανική και είναι πολύ απαιτητικό σε υπολογιστική ισχύ, παρέχει όμως αρκετά ακριβή αποτελέσματα.

Το πρόγραμμα *WindWizard* είναι εμπορικό και επομένως χρειάζεται άδεια χρήσης.

### 2.2.3 WEng

Σε αυτή την εφαρμογή (WEng [15]) ο χρήστης εισάγει τις αρχικές συνθήκες μοντελοποιημένες μέσω ενός χάρτη που περιγράφει τη διαμόρφωση του εδάφους και την τραχύτητα της επιφάνειας. Αφού δοθούν η ένταση και η διεύθυνση του ανέμου σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χάρτη, το πρόγραμμα προβλέπει την ταχύτητα και τη διεύθυνση του ανέμου σε οποιοδήποτε άλλο σημείο. Σε εδάφη με πολύπλοκη διαμόρφωση η πρόβλεψη δεν είναι ακριβής. Το πρόγραμμα εσωτερικά χρησιμοποιεί μοντέλο ροής LINCOM [16] που ανήκει στην κατηγορία των μοντέλων γραμμικής ροής. Θετικό στοιχείο είναι η ταχύτητα στους υπολογισμούς (λόγω του μοντέλου γραμμικής ροής) ενώ στα αρνητικά του είναι οι περιορισμοί που έχει σε υπολογισμούς μέχρι κλίσεις 25%, αφού σε μεγαλύτερες κλίσεις έχει μικρή αξιοπιστία, τα γνωστά προβλήματα σε πολύπλοκους σχηματισμούς εδάφους και το γεγονός ότι χρειάζεται άδεια χρήσης με μεγάλο κόστος.

### 2.2.4 WindSim

Με την ίδια λογική λειτουργεί και το WindSim [17]. Ένας χάρτης με τη μορφολογία του εδάφους και την τραχύτητα στα διάφορα σημεία του είναι τα δεδομένα που εισάγονται. Για συγκεκριμένες παραμέτρους του ανέμου εξάγει ένα πλέγμα με προβλέψεις για το κάθε σημείο του χάρτη. Ο χρόνος υπολογισμού εξαρτάται άμεσα από το πόσο αναλυτικά είναι τα δεδομένα που θα εισαχθούν για να επεξεργαστούν. Το πρόγραμμα WindSim είναι υλοποιημένο με βάση ένα RANS CDF μοντέλο (βλέπε παράγραφο 2.1.4). Και αυτό το πρόγραμμα είναι εμπορικά διαθέσιμο και το κόστος του κινείται στα ίδια επίπεδα με τις προηγούμενες εφαρμογές.

## 2.3 Γιατί επιλέχθηκε ο WindNinja

Μεταξύ των προσομοιωτών που αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα βρίσκεται και ο WindNinja [2]. Ο WindNinja είναι μια εφαρμογή με την οποία μπορούμε να υπολογίσουμε και να προσομοιώσουμε την επίδραση της μορφολογίας του εδάφους στη ροή του ανέμου. Υπήρξαν πολλοί παράγοντες που οδήγησαν στην επιλογή για χρήση του στην παρούσα διπλωματική εργασία, κυρίως λειτουργικοί και οικονομικοί.

Σε αντίθεση με άλλα μοντέλα ανέμου, ο WindNinja, δεν προβλέπει τον άνεμο, αλλά προσομοιώνει τη χωρική μεταβολή του σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Ωστόσο, έχοντας τη δυνατότητα να εισάγουμε μετεωρολογικά δεδομένα από προγνωστικά για τον καιρό, ουσιαστικά θα μπορούσαμε και να προσομοιώσουμε την πρόβλεψη της ροής του ανέμου

στο υπό εξέταση δάσος. Μια ακόμα διαφορά σε σχέση με τα άλλα μοντέλα ανέμου είναι ότι στον WindNinja η ανάλυση του πλέγματος του εδάφους είναι συνήθως της τάξεως των 100-200 μέτρων σε αντίθεση με άλλους προσομοιωτές όπου έχουμε μικρότερη ανάλυση, κάποιες φορές επάνω και από 12km. Συνδυάζοντας τον παραπάνω τρόπο λειτουργίας με τη δυνατότητα που δίνεται στον χρήστη να εισάγει σημεία ελέγχου του ανέμου (δηλαδή σημεία στα οποία να δίνεται η πραγματική τιμή της έντασης και της διεύθυνσης του ανέμου), σε συγκεκριμένες τοποθεσίες πάνω στο πλέγμα βάσει πραγματικών μετρήσεων στα σημεία αυτά, έχουμε πιο πιστή προσομοίωση της ροής του ανέμου.

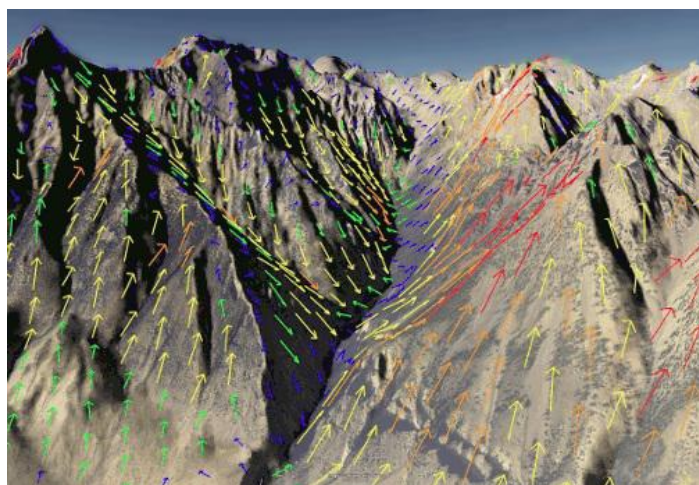
Ένα άλλο πλεονέκτημα της εφαρμογής είναι ότι απαιτείται μικρός αριθμός δεδομένων εισόδου, καθιστώντας την προσομοίωση πιο εύκολη. Τα ελάχιστα στοιχεία που χρειάζονται για να μπορέσει ο WindNinja να κάνει υπολογισμούς είναι τα εξής: αρχείο περιγραφής της υψομετρικής διαμόρφωσης του εδάφους, αρχικές τιμές ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου και η κύρια μορφή της βλάστησης της περιοχής. Με αυτόν τον τρόπο η προσομοίωση δεν χρειάζεται παραπάνω από μερικά δευτερόλεπτα. Σε αυτό συμβάλει και η απλούστευση της εξίσωσης της ορμής, αλλά και η δυνατότητα που παρέχεται να επιλέγεται αυτόματα ένα πιο απλοποιημένο μοντέλο πρόβλεψης καιρού.

Πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή του WindNinja έπαιξε και το γεγονός πως μπορεί να χρησιμοποιηθεί από γραμμή εντολών (command line interface, cli) παρακάμπτοντας την διεπαφή χρήστη και έτσι να ενσωματωθεί χωρίς ιδιαίτερες αλλαγές στο σύστημα του FLogA. Τέλος καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της εφαρμογής ήταν και το κόστος. Ο WindNinja είναι ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα και συνεπώς δεν υπήρχε κάποια οικονομική επιβάρυνση από τη χρήση του, σε αντίθεση με άλλους προσομοιωτές, εμπορικού σκοπού, το κόστος των οποίων είναι αρκετά υψηλό.

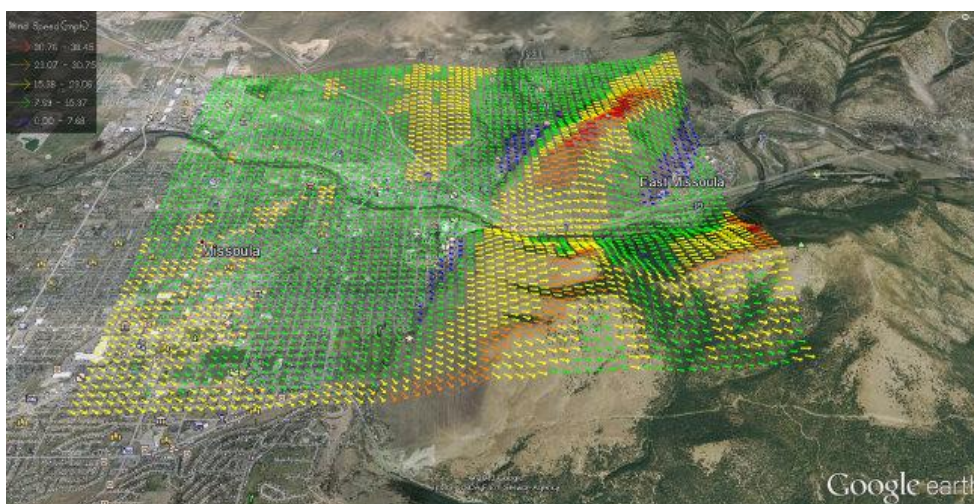
Το επόμενο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στο WindNinja. Περιγράφονται τα χαρακτηριστικά του, ο τρόπος ενσωμάτωσής του στον FLogA καθώς και ένα πρόγραμμα που υλοποιήθηκε για οπτικοποίηση της έντασης και της διεύθυνσης του ανέμου.

### 3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ WINDNINJA

Το WindNinja είναι ένα πρόγραμμα που υπολογίζει χωρικά μεταβαλλόμενα πεδία ανέμου και χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μοντελοποίησης φυσικών φαινομένων όπως οι προσομοιωτές δασικών πυρκαγιών. Είναι σχεδιασμένο να προσομοιώνει την επίδραση της τοπογραφίας του εδάφους στη ροή του ανέμου. Οι δύο εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζουν από δύο διαφορετικές οπτικές γωνίες με χρήση του *Google Earth* [18] το αποτέλεσμα του WindNinja.



Εικόνα 3.1 Κοντινή άποψη της επιρροής του εδάφους στο WindNinja [27]



Εικόνα 3.2 Παράδειγμα επιρροής του εδάφους στο WindNinja όπως αυτή φαίνεται στο Google Earth [28]

Ο WindNinja δεν μπορεί να προβλέψει τον άνεμο σε μελλοντικές χρονικές στιγμές, αυτό που κάνει είναι να προσομοιώνει τις χωρικές διακυμάνσεις του ανέμου για ένα στιγμιότυπο στο χρόνο. Στο WindNinja υπάρχει η δυνατότητα να δοθούν κάποιες τιμές έντασης και διεύθυνσης ανέμου, μέσα ή κοντά στην περιοχή που εξετάζεται [19] βάσει των οποίων να γίνουν οι υπολογισμοί για τις υπόλοιπες τιμές του πεδίου. Αυτή η δυνατότητα χρησιμοποιήθηκε κατά κόρον από το σύστημά μας για να αξιοποιηθεί η πληροφορία από τους μετεωρολογικούς σταθμούς του Αστεροσκοπείου Αθηνών, όπως αναφέρουμε στο κεφάλαιο 5.

### **3.1 Λειτουργία του WindNinja με γραμμή εντολών**

Το WindNinja μπορεί να δεχθεί σαν είσοδο πληθώρα πληροφοριών, από μετεωρολογικά δεδομένα, μέχρι πληροφορίες καύσιμης ύλης και παραμέτρους ροής θερμότητας. Επίσης μπορεί να αξιοποιήσει δεδομένα από διάφορα προγράμματα προσομοίωσης δασικών πυρκαγιών, όπως το FARSITE, έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η χωρική κατανομή της καύσιμης ύλης στην επίδραση του ανέμου, αλλά τα χαρακτηριστικά αυτά δεν μπορούσαν να αξιοποιηθούν από το υπάρχον σύστημά μας και επομένως δεν θα αναφερθούμε σε αυτό περαιτέρω. Αναλυτική περιγραφή των εισόδων που μπορεί να δεχθεί βρίσκεται στα tutorial χρήσης του [20]. Στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στην περιγραφή της πληροφορίας εισόδου που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής. Αξίζει να αναφέρουμε πως οι παρακάτω τιμές δίνονταν στο εκτελέσιμο του WindNinja με την μορφή ενός αρχείου παραμετροποίησης (configuration file).

Οι πληροφορίες εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση μας περιγράφονται στη συνέχεια. Η περιγραφή για κάθε τιμή εισόδου ξεκινά με το όνομα της μεταβλητής, όπως τη δέχεται το WindNinja, και ακολουθεί η περιγραφή της.



**Πίνακας 3.1: Βασικές παράμετροι εισόδου χρήσης του WindNinja**

<i>elevation_file</i>	Η διαδρομή στην οποία είναι αποθηκευμένο το <i>ascii</i> αρχείο (επέκταση αρχείου <i>.asc</i> ) με την πληροφορία της τοπογραφίας της δασικής περιοχής
<i>mesh_resolution</i>	Το μέγεθος του κελιού στο οποίο θα υπολογιστούν οι τιμές έντασης και διεύθυνσης ανέμου. Αυτό μπορεί να είναι το ίδιο με το μέγεθος κελιού όπως περιγράφεται στο αρχείο <i>elevation_file</i> , μπορεί όμως να είναι και διαφορετικό, ανάλογα με το πόσο πυκνό πλέγμα τιμών χρειαζόμαστε
<i>ascii_out_resolution</i>	Η ανάλυση του παραγόμενου <i>ascii</i> αρχείου
<i>year, month, day, hour, minute, time_zone</i>	Χρονικός προσδιορισμός της προσομοίωσης
<i>uni_air_temp, air_temp_units</i>	Η τιμή θερμοκρασίας του ανέμου και η μονάδα μέτρησής της (χρησιμοποιήσαμε τιμή των 30 βαθμών Κελσίου)
<i>speed_units, units_mesh_resolution</i>	Μονάδες μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου και του μεγέθους των κελιών αντίστοιχα. Χρησιμοποιήσαμε μέτρα ανά δευτερόλεπτο για την ταχύτητα και μέτρα για την απόσταση
<i>num_threads</i>	Ακέραια τιμή που δήλωνε σε πόσα νήματα ταυτόχρονα να εκτελούνταν ο WindNinja. Χρησιμοποιήσαμε 4 νήματα εκτέλεσης
<i>initialization_method</i>	Από αυτή την μεταβλητή καθορίζεται ο τρόπος εκτέλεσης του WindNinja. Οι πιθανές τιμές είναι <i>domainAverageInitialization</i> , <i>pointInitialization</i> και <i>wxModelInitialization</i> . Από αυτές τις τιμές στα πλαίσια της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν οι δύο πρώτες, η μεν πρώτη δηλώνει την εκτέλεση του WindNinja βάσει αρχικών τιμών έντασης και διεύθυνσης ανέμου και η δε δεύτερη για εκτέλεση του WindNinja βάσει τιμών που δίνονται από μετεωρολογικούς σταθμούς. Περισσότερα στα κεφάλαια που ακολουθούν
<i>input_speed, input_direction</i>	Οι τιμές εισόδου για την ένταση και την διεύθυνση ανέμου όταν ο τρόπος εκτέλεσης του WindNinja είναι <i>domainAverageInitialization</i>
<i>wx_station_filename</i>	Η διαδρομή του αρχείου με τις τιμές έντασης και διεύθυνσης ανέμου όπως δίνονται από τους μετεωρολογικούς σταθμούς. Στο αρχείο αυτό (που είναι

	<p>ένα comma separated value, CSV αρχείο) υπάρχει ακόμα πληροφορία για τις συντεταγμένες των μετεωρολογικών σταθμών, για τις τιμές θερμοκρασίας και ύψους από το έδαφος κλπ. Το αρχείο αυτό είναι απαραίτητο όταν το WindNinja καλείται με τιμή <i>pointInitialization</i> στη μεταβλητή <i>initialization_method</i></p>
--	---

Σαν υλοποίηση το WindNinja προσφέρει μια διεπαφή (user interface) από την οποία μπορεί ο χρήστης, δίνοντας την κατάλληλη είσοδο, κατάλληλες τιμές στις παραπάνω μεταβλητές, να λάβει σαν έξοδο τις τιμές έντασης και διεύθυνσης ανέμου για την δασική περιοχή που εξετάζει. Παρόλα αυτά για τους σκοπούς της εργασίας χρησιμοποιήθηκε η δυνατότητα του WN να εκτελεστεί από γραμμή εντολών (command line). Με αυτό τον τρόπο μπορούσαμε να καλέσουμε το WN μέσα από rhp script και πρακτικά να τον ενσωματώσουμε πλήρως στο FLogA. Μέχρι τώρα η πληροφορία που χρησιμοποιούσε ο FLogA ήταν ενιαίες τιμές έντασης και διεύθυνσης σε όλη τη δασική περιοχή. Αυτή η πληροφορία κατά την εκτέλεση του rhp script αντικαθίσταται με τη έξοδο του Windninja.

### 3.2 Ενσωμάτωση του WindNinja στο FLogA

Όπως αναφέρουμε και προηγουμένως λόγω της δυνατότητας του WindNinja να τρέχει από γραμμή εντολών, η ενσωμάτωσή του με το FLogA έγινε με απευθείας κλήση του μέσα από rhp script [21]. Για την λειτουργία του FLogA είχε δημιουργηθεί ήδη ένα rhp script που εκτός των άλλων δημιουργούσε ascii raster αρχεία [22] με ενιαίες τιμές έντασης και διεύθυνσης ανέμου βάσει κάποιων τιμών εισόδου. Τα αρχεία αυτά έχουν συγκεκριμένα ονόματα (*winds.asc* και *windd.asc* αντίστοιχα) και περιέχουν τόσες τιμές έντασης και διεύθυνσης ανέμου όσα είναι και τα κελιά του εδάφους στο οποίο θα βασιστεί η προσομοίωση.

Κατά την ενσωμάτωση του WindNinja στη ροή επεξεργασίας του FLogA, ο WindNinja καλείται αφού προηγουμένως έχει δημιουργηθεί το κατάλληλο αρχείο διαμόρφωσης. Την έξοδό του, δηλαδή τα ascii raster αρχεία για την ένταση και την διεύθυνση του ανέμου που δημιουργεί ο WindNinja, την στέλνουμε στο κατάλληλο σημείο, εκεί δηλαδή που περιμένει ο FLogA να βρει τα αρχεία *winds.asc* και *windd.asc* για την εκτέλεσή του. Επειδή κάποιες φορές οι διαστάσεις του εδάφους σε συνδυασμό με την τιμή του μεγέθους του κελιού του εδάφους (cell size) και την τιμή του μεγέθους του κελιού του ανέμου (mesh resolution) δεν ταιριάζουν υλοποιήσαμε ένα βοηθητικό πρόγραμμα (AsciiResampler) που προσαρμόζει

τις διαστάσεις των αρχείων *winds.asc* και *windd.asc* στις διαστάσεις του *ascii* αρχείου με τις διαστάσεις του εδάφους.

### 3.3 Παραλλαγή οπτικοποίησης

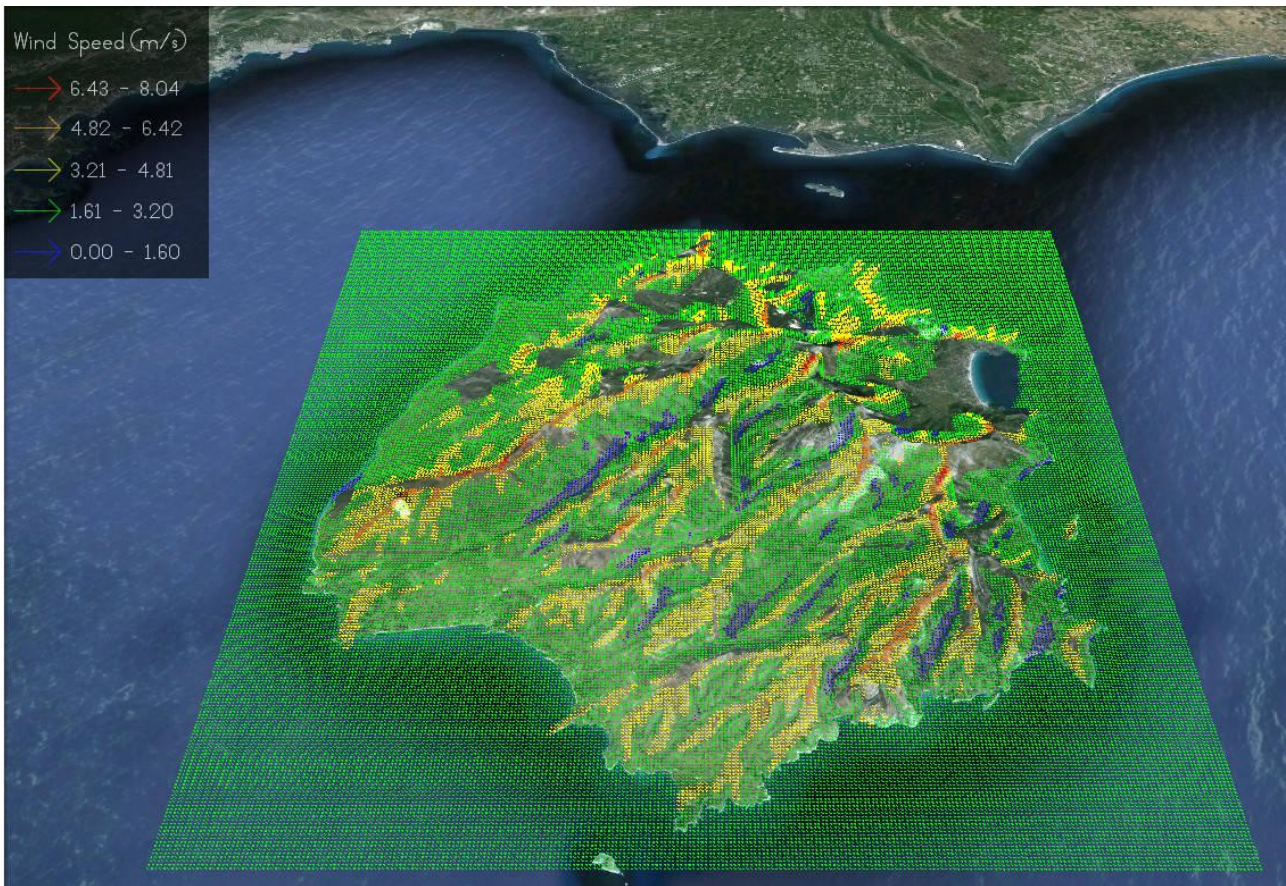
Ο FLogA εκμεταλλεύεται σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες του Google Earth να προβάλλει στην υδρόγειο σφαίρα διάφορες μορφές οπτικοποίησης της εξόδου του. Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης παράγονται KML αρχεία [23] συμβατά με το Google Earth που δείχνουν με την μορφή κινουμένου σχεδίου (*animation*) τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Παρόμοια δυνατότητα υπάρχει και στο WindNinja. Ο WindNinja μπορεί να αναπαριστά με την μορφή χρωματιστών βελών την ένταση και την διεύθυνση του ανέμου. Κατά την ενσωμάτωση του WindNinja στον FLogA όμως, και λόγω του γεγονότος ότι ο WindNinja ασχολείται μόνο με ορθογώνια εδάφη που είναι παράλληλα με τον ισημερινό και τον μεσημβρινό (μηδενικής δηλαδή περιστροφής), προέκυψε η ανάγκη δημιουργίας ενός προγράμματος που θα τροποποιούσε αυτή την έξοδο του WindNinja και θα την προσαρμόζε στις ανάγκες του FLogA. Έτσι λοιπόν στα πλαίσια της εργασίας υλοποιήθηκε και ένα πρόγραμμα (*WNVisualization*) που, βασιζόμενο στις συντεταγμένες των τεσσάρων γωνιών του εδάφους που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση και των αποτελεσμάτων έντασης και διεύθυνσης ανέμου (δύο *ascii raster* αρχεία), δημιουργεί αρχείο *kml* κατάλληλο για την προσομοίωση, έτοιμο να χρησιμοποιηθεί από το *Google Earth*.

Το *WNVisualization* έχει δυνατότητα να αναπαριστά την ένταση του ανέμου είτε με το μέγεθος του βέλους, είτε με το χρώμα του και την διεύθυνση με το που “δείχνει”. Αυτές οι δυνατότητες είναι εφικτές μέσα από τα ορίσματα που λαμβάνει σαν είσοδο κατά την κλήση του. Στην συνέχεια υπάρχει πίνακας που περιγράφει της παραμέτρους που δέχεται σαν είσοδο η μονάδα λογισμικού καθώς και κάποιες ενδεικτικές εκτελέσεις.

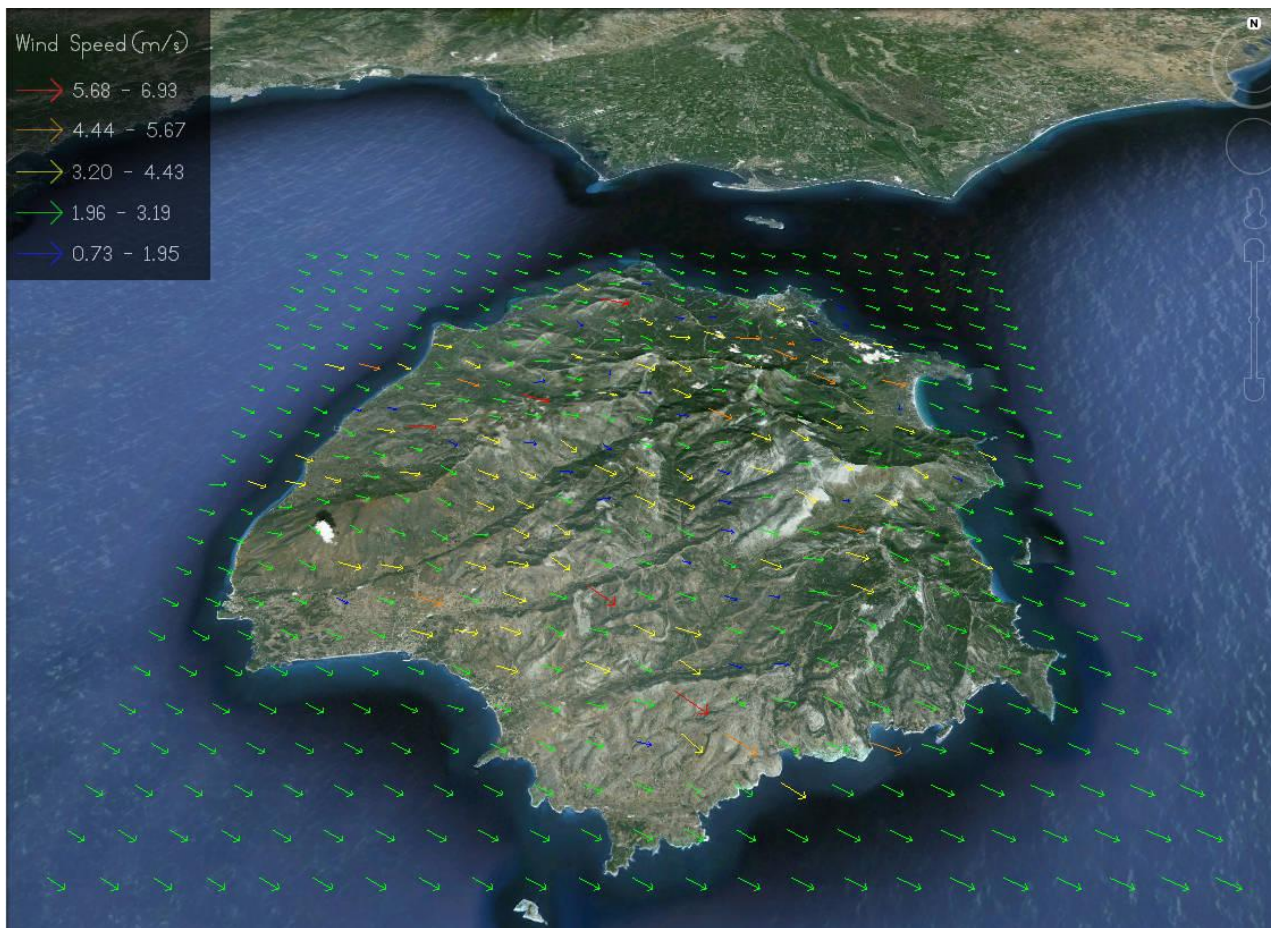
**Πίνακας 3.2: Παράμετροι εισόδου του βοηθητικού προγράμματος WNVisualization**

<i>northLatitude, northLongitude, eastLatitude, eastLongitude, southLatitude, southLongitude, westLatitude, westLongitude</i>	Οι συντεταγμένες των τεσσάρων σημείων που προσδιορίζουν το επίπεδο (οι τέσσερις κορυφές του δάσους)
<i>directionAsciiFilePath</i>	Η διαδρομή του ascii αρχείου με την πληροφορία της διεύθυνσης του ανέμου
<i>velocityAsciiFilePath</i>	Η διαδρομή του ascii αρχείου με την πληροφορία της έντασης του ανέμου
<i>cellIncreaseFactor</i>	Ακέραια τιμή που προσδιορίζει τις φορές αύξησης του μεγέθους του κελιού (και της μείωσης της ανάλυσης αντίστοιχα) ίδια και για τις δύο διαστάσεις
<i>outputDirectoryPath</i>	Διαδρομή του φακέλου εξόδου
<i>colorUseIndicator</i>	Τιμή (0,1) που δηλώνει αν θα χρησιμοποιηθεί το χρώμα για την κβάντιση της ταχύτητας του ανέμου ή το μέγεθος του βέλους
<i>isZeroStartingPoin</i>	Τιμή (0,1) που δηλώνει αν στη κβάντιση της ταχύτητας του ανέμου θα χρησιμοποιηθεί το μηδέν σαν ελάχιστη τιμή ή η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου στην περιοχή που θα υπολογίσει ο WindNinja

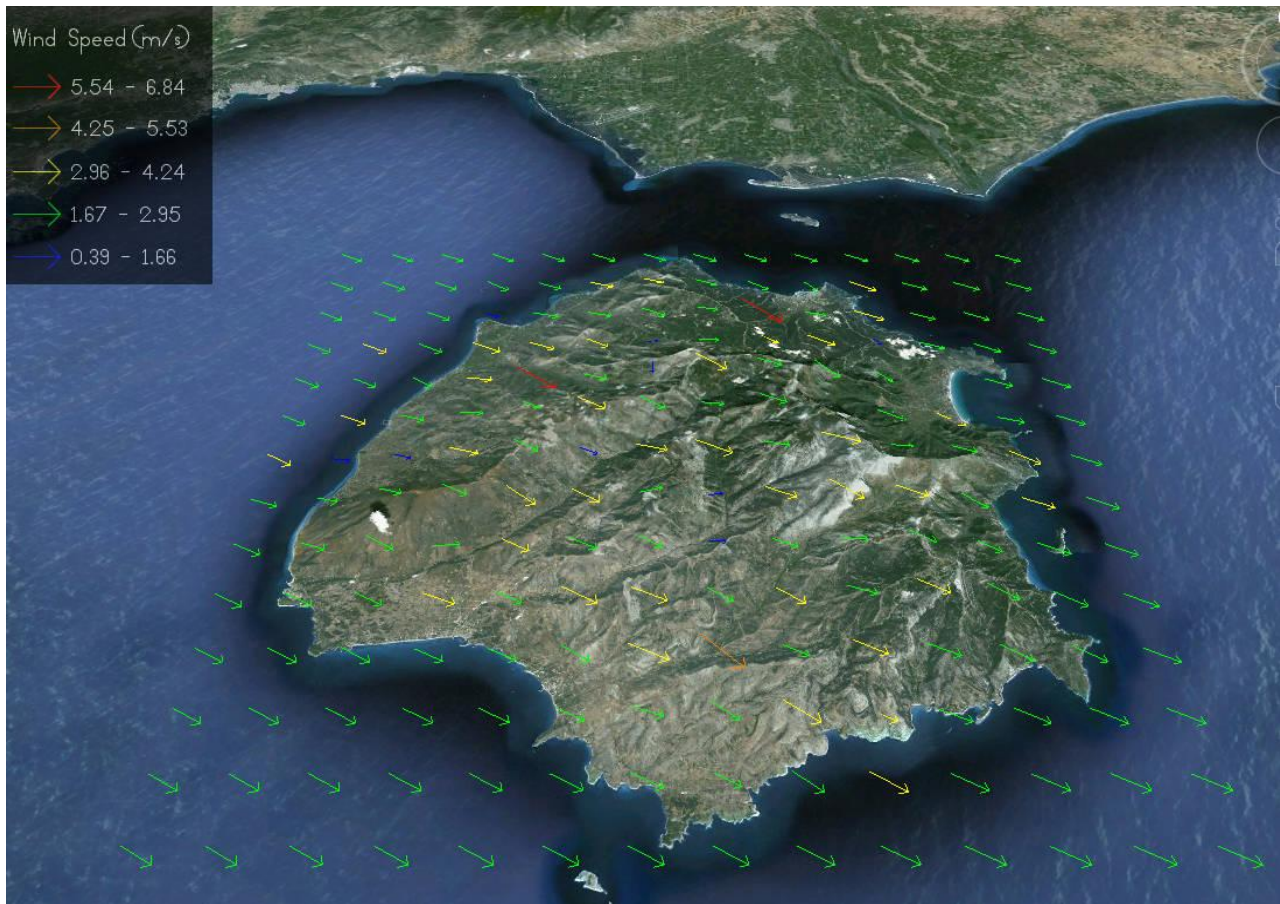
Ακολουθούν χαρακτηριστικά παραδείγματα που παρουσιάζουν την έξοδο του WNVisualization



Εικόνα 3.3: Τυπική έξοδος WindNinja



**Εικόνα 3.4:** Έξοδος του WNVisualization με χρήση του χρώματος για την αναπαράσταση της έντασης του ανέμου, με κάθε βέλος να αντιστοιχεί σε περιοχή 30 κελιών και με χρήση της μικρότερης τιμής έντασης ανέμου σαν ελάχιστη τιμή στα όρια της κβάντισης

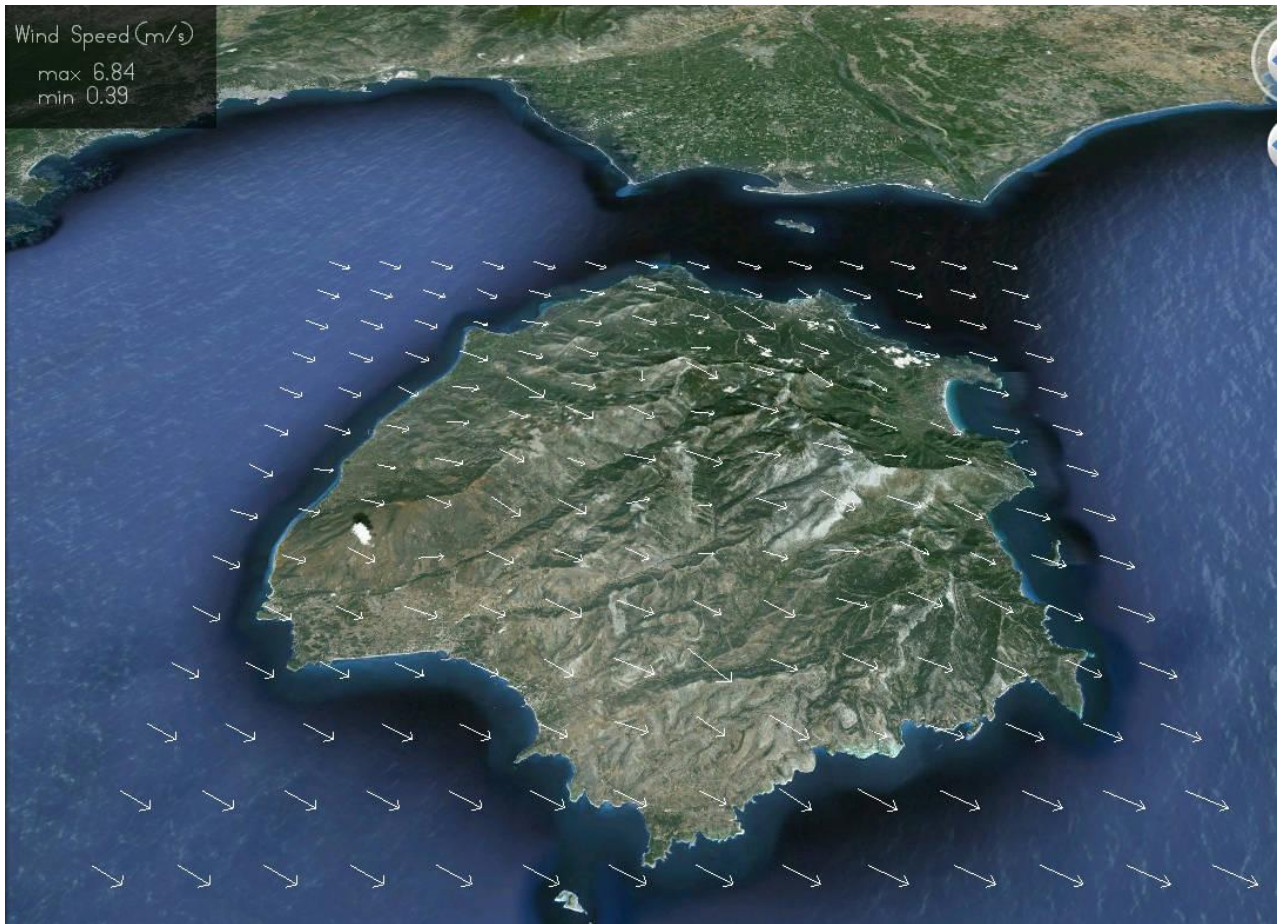


**Εικόνα 3.5:** Έξοδος του WNVisualization με χρήση χρώματος για την οπτική αναπαράσταση της έντασης του ανέμου, με κάθε βέλος να αντιστοιχεί σε περιοχή 50 κελιών και με χρήση της μικρότερης τιμής έντασης ανέμου σαν ελάχιστη τιμή στα όρια της κβάντισης

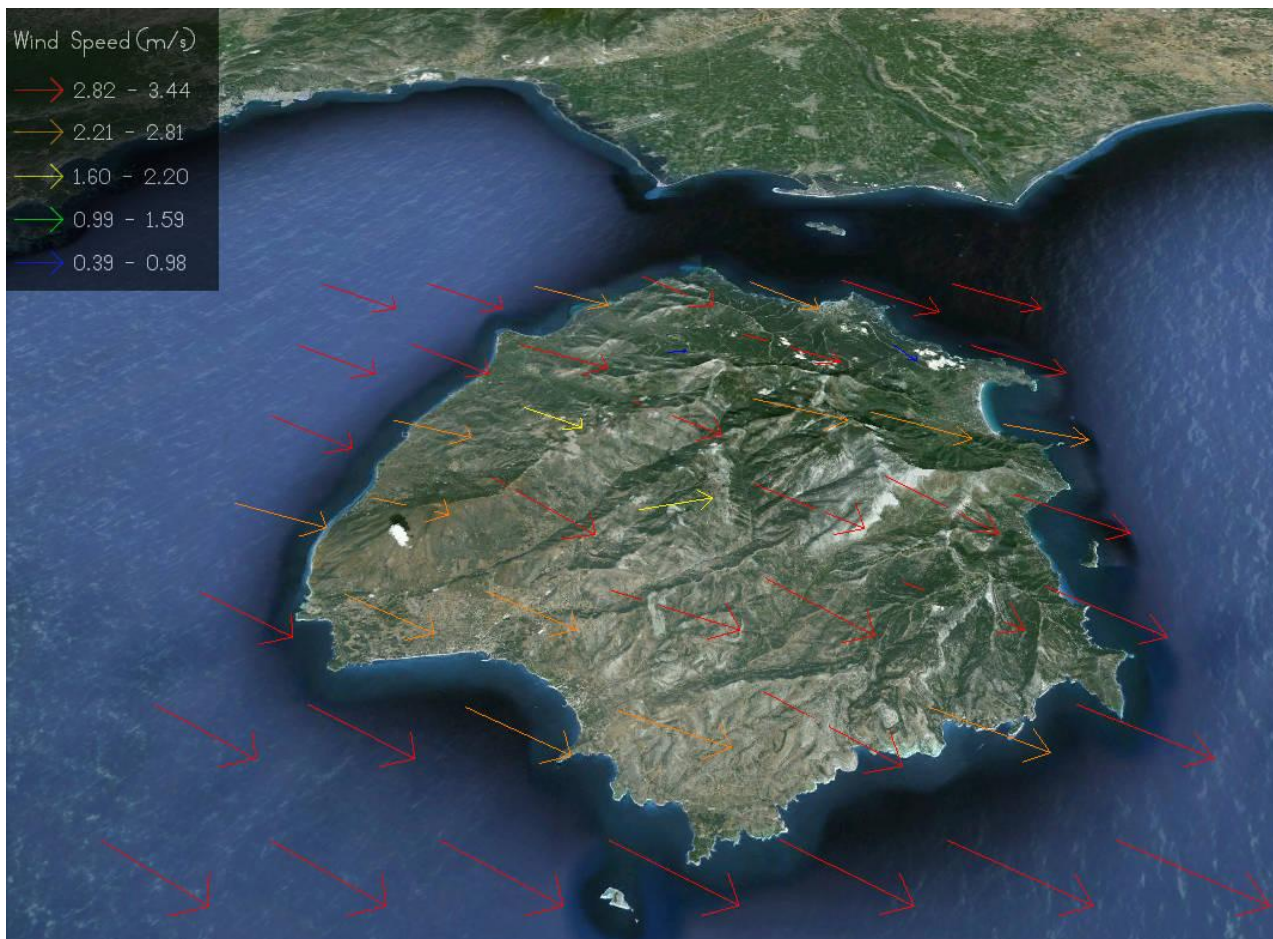


**Εικόνα 3.6:** Έξοδος του WNVisualization με χρήση χρώματος για την οπτική αναπαράσταση της έντασης του ανέμου, με κάθε βέλος να αντιστοιχεί σε περιοχή 50 κελιών και με χρήση του μηδενός σαν ελάχιστη τιμή στα όρια της κβάντισης





**Εικόνα 3.7:** Έξοδος του WNVisualization με χρήση του μήκους του βέλους για την οπτική αναπαράσταση της έντασης του ανέμου, με κάθε βέλος να αντιστοιχεί σε περιοχή 50 κελιών κελιού και με χρήση της μικρότερης τιμής έντασης ανέμου σαν ελάχιστη τιμή στα όρια της κβάντισης



**Εικόνα 3.8:** Έξοδος του WNVisualization με χρήση του χρώματος για την οπτική αναπαράσταση της έντασης του ανέμου, με κάθε βέλος να αντιστοιχεί σε περιοχή 100 κελιών και με χρήση της μικρότερης τιμής έντασης ανέμου σαν ελάχιστη τιμή στα όρια της κβάντισης

Στις προηγούμενες εικόνες, που παρουσιάζεται το νησί της Θάσου, φαίνεται πως όταν χρησιμοποιείται το χρώμα για την αναπαράσταση της έντασης του ανέμου το πεδίο των τιμών έντασης του ανέμου χωρίζεται σε πέντε ίσα διαστήματα στα οποία αντιστοιχεί ένα χρώμα (μπλε, πράσινο, κίτρινο, πορτοκαλί, κόκκινο, από τις μικρότερες στις μεγαλύτερες τιμές αντίστοιχα). Όταν χρησιμοποιείται το μήκος του βέλους για την αναπαράσταση της έντασης του ανέμου τα βέλη έχουν όλα λευκό χρώμα. Το κάτω όριο στην κβάντιση της έντασης του ανέμου καθορίζεται από την παράμετρο *isZeroStartingPoint* και επηρεάζει το μήκος των διαστημάτων. Αυτό συμβαίνει επειδή το συνολικό εύρος τιμών που αναπαρίσταται είναι μεγαλύτερο, αν επιλεγθεί το μηδέν σαν ελάχιστο όριο, από το να επιλεγθεί η ελάχιστη τιμή έντασης του ανέμου, τιμή δηλαδή μεγαλύτερη του μηδενός. Προφανώς αν η ελάχιστη τιμή έντασης του ανέμου είναι μηδέν δεν υπάρχει διαφοροποίηση στο αποτέλεσμα της οπτικοποίησης με τη χρήση ή όχι του μηδενός σαν κάτω όριο του διαστήματος τιμών οπτικοποίησης. Ποιοτικά η διαφορά στη χρήση του λευκού χρώματος στα βέλη (και κατ' επέκταση η χρήση του μήκους του βέλους για την

ποσοτικοποίηση της έντασης του ανέμου) από τη χρήση χρωμάτων για την κβάντιση της έντασης του ανέμου είναι εμφανής όταν συνδυάζεται και με αναπαράσταση της εξέλιξης της δασικής πυρκαγιάς (από την οπτικοποίηση της εξόδου του FLogA). Σε αυτή την περίπτωση, επειδή ήδη χρησιμοποιούνται χρώματα για την αναπαράσταση της δασικής πυρκαγιάς, η χρήση χρωμάτων και για την αναπαράσταση του ανέμου θα προκαλούσε σύγχυση και για αυτό προτιμάται η χρήση του λευκού χρώματος στα βέλη του ανέμου.

Εξαιτίας του μεγέθους των αρχείων της οπτικοποίησης, που αυξάνεται όσο μεγαλώνει η ανάλυση της δασικής περιοχής, υλοποιήσαμε λειτουργικότητα μείωσης της ανάλυσης της οπτικοποίησης μέσω του υπολογισμού των μέσων τιμών της διεύθυνσης και έντασης του ανέμου σε μια γειτονιά μεγαλύτερη από ένα κελί. Πρακτικά όσο μεγαλώνει η τιμή της παραμέτρου *cellIncreaseFactor* οπτικοποιείται η μέση τιμή γειτονικών κελιών σε όλο και μεγαλύτερη ακτίνα, και σαν αποτέλεσμα έχουμε την “τάση” του ανέμου (γενική αίσθηση) στην αντίστοιχη περιοχή.

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφονται πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια σύγκρισης του χρόνου εκτέλεσης του WindNinja και της ακρίβειας στα αποτελέσματα ανέμου, για διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και κελιού ανέμου.



## 4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ – ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΜΕ ΣΥΝΘΕΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στο πλαίσιο της εργασίας δημιουργήσαμε μια διαδικασία για να μελετήσουμε τις χρονικές καθυστερήσεις που επιφέρει η χρήση του WindNinja στην εκτέλεση της προσομοίωσης δασικής πυρκαγιάς με τη χρήση του FLogA, για διαφορετικές σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου. Επίσης θέλαμε να διερευνήσουμε πως επηρεάζεται η ακρίβεια της προσομοίωσης με την χρήση μεγαλύτερου πλέγματος ανέμου από την διάσταση του δάσους σε σχέση με την ίδια διάσταση πλέγματος ανέμου και δάσους. Θέλαμε δηλαδή να υπολογίσουμε τον χρόνο που χρειάζεται η εκτέλεση του WindNinja για διαφορετικά μεγέθη κελιού του πλέγματος ανέμου σε σχέση με την ακρίβεια που έχουν τα αποτελέσματα.

Για την διαδικασία της αξιολόγησης κάναμε την υπόθεση πως όταν το μέγεθος του κελιού στο πλέγμα του ανέμου είναι το ίδιο με αυτό του πλέγματος εδάφους του δάσους που μελετούμε, θα έχουμε την μέγιστη ακρίβεια και με βάση αυτό συγκρίναμε όλα τα υπόλοιπα (μεγαλύτερα) μεγέθη κελιών ανέμου. Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία που επιλέξαμε να ακολουθήσουμε ήταν η εξής: Χρησιμοποιώντας ένα δάσος με μέγεθος πλευράς κελιού  $x$ , εκτελούμε το WindNinja με κελιά ανέμου πλευράς  $x$ ,  $2x$ ,  $4x$ ,  $8x$ ,  $16x$ ,  $32x$  και  $64x$ . Ονομάζουμε τις εκτελέσεις αντίστοιχα 1-1, 1-2, 1-4, 1-8, 1-16, 1-32 και 1-64. Κατόπιν με δεδομένο ότι η περίπτωση 1-1 θεωρείται η πιο ακριβής, όλες οι υπόλοιπες περιπτώσεις συγκρίνονται μαζί της και η τιμή της ακρίβειας της κάθε περίπτωσης προκύπτει ως εξής:

Ακρίβεια Προσομοίωσης =  $(\#κελιών \Omega) / (\#κελιών U)$ , όπου  $(\#κελιών \Omega)$  είναι ο αριθμός των κελιών της τομής μεταξύ των εκτελέσεων προσομοίωσης για τις σχέσεις 1-1 και 1- $X$ , και  $(\#κελιών U)$  είναι ο αριθμός των κελιών της ένωσης των εκτελέσεων προσομοίωσης για τις σχέσεις 1-1 και 1- $X$ .

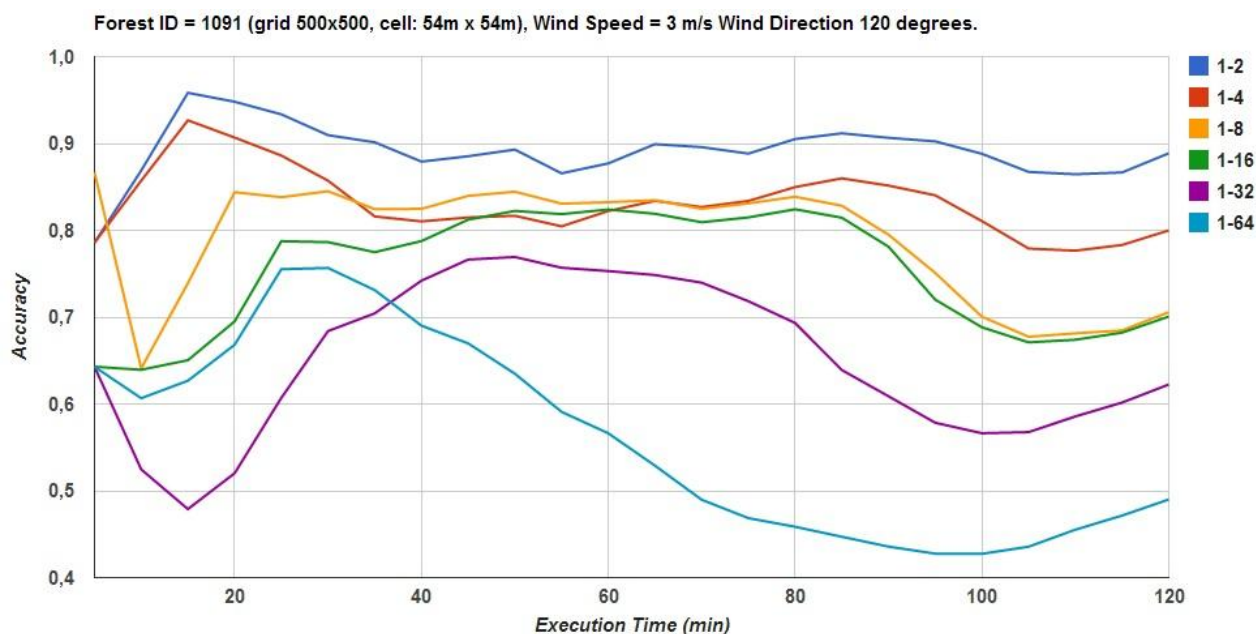
Το πεδίο τιμών της συνάρτησης ακρίβειας προσομοίωσης είναι το  $[0,1]$ , με την τιμή 1 να δηλώνει ότι η υπό εξέταση περιοχή είναι ίδια με την πραγματικά καμένη περιοχή (ελάχιστο σφάλμα), και η τιμή 0 να δηλώνει ότι η υπό εξέταση περιοχή δεν έχει κανένα κοινό σημείο με την πραγματικά καμένη περιοχή (μέγιστο σφάλμα).

Για το πείραμα χρησιμοποιήθηκαν τρία δάση της ίδιας περιοχής (νήσος Θάσος, μέγεθος  $27\text{km} \times 27\text{km}$ ) που παρουσιάζει έντονη γεωμορφολογία, με επεξεργασμένη καύσιμη ύλη έτσι ώστε να είναι ομοιόμορφη (δηλαδή να μην αποτελεί σημαντικό παράγοντα επιρροής). Τα τρία δάση είχαν διαφορετικές αναλύσεις (grid size) και άρα διαφορετικού μεγέθους κελί. Το πρώτο δάσος (ID=1091) έχει ανάλυση πλέγματος  $500 \times 500$  με μέγεθος κελιού  $54\text{m} \times$

54m, το δεύτερο (ID=1097) ανάλυση πλέγματος 375x375 με μέγεθος κελιού 72m x 72m και το τρίτο (ID=1093) ανάλυση πλέγματος 250x250 με μέγεθος κελιού 108m x 108m. Επίσης στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν τρεις τιμές ταχύτητας ανέμου 3m/s, 5m/s, 7m/s με την ίδια διεύθυνση (120°). Σε όλες τις εκτελέσεις χρησιμοποιήθηκε το ίδιο σημείο ανάφλεξης. Τέλος εξετάστηκαν, όπως είπαμε και παραπάνω, 7 διαφορετικές σχέσεις τιμών μεγέθους κελιού δάσους και κελιού πλέγματος ανέμου (1-1, 1-2, 1-4, 1-8, 1-16, 1-32, 1-64). Η σχέση, για παράδειγμα, 1-32 δηλώνει πως το μέγεθος της πλευράς του κελιού στο πλέγμα του ανέμου είναι 32 φορές μεγαλύτερο. Τέλος ο χρόνος προσομοίωσης για όλες τις περιπτώσεις ήταν 120 λεπτά.

Τα αποτελέσματα του πειράματος συνοψίζονται με γραφικές παραστάσεις που δείχνουν για κάθε διάσταση δάσους, για κάθε τιμή ανέμου και για κάθε σχέση μεγέθους κελιού δάσους και κελιού πλέγματος ανέμου την εξέλιξη στο χρόνο (με βήμα 5λέπτου) της ακρίβειας της προσομοίωσης. Τα διαγράμματα αυτά δημιουργούνται με χρήση javascript [24] που παράγεται από php script που έχουμε υλοποιήσει και βασίζονται στην τεχνολογία των Google Charts [25].

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται το γραφικό αποτέλεσμα από μια ενδεικτική εκτέλεση, συγκεκριμένα (όπως αναφέρεται και στον τίτλο του διαγράμματος) είναι η εκτέλεση με άνεμο 3m/s στο δάσος με μέγεθος κελιού 54m x 54m.



**Σχήμα 4.1: Ακρίβεια προσομοίωσης σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικές σχέσεις επιφάνειας κελιού εδάφους – κελιού ανέμου**

Σε συνδυασμό με τις γραφικές παραστάσεις έχουν δημιουργηθεί και πίνακες που παρουσιάζουν τιμές χρήσιμες από τις προσομοιώσεις. Ένα παράδειγμα τέτοιου πίνακα (ο αντίστοιχος της προηγούμενης γραφικής παράστασης) είναι ο ακόλουθος.

**Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ένα μέγεθος δάσους και μία τιμή ανέμου όπως αυτά παράγονται από το αντίστοιχο rhp script**

Sid	mesh - cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2730	1-1	80.57	10.03	0.07	9.15	2.91	1.000	0.0000
2731	1-2	19.80	9.48	0.16	7.87	2.91	0.8912	0.0327
2732	1-4	4.87	9.80	0.43	6.71	2.92	0.8312	0.0378
2733	1-8	1.36	10.17	1.04	5.47	2.93	0.7884	0.0680
2734	1-16	0.53	9.91	1.75	4.60	2.83	0.7517	0.0669
2735	1-32	0.33	10.30	2.16	3.82	2.92	0.6508	0.0862
2736	1-64	0.26	11.84	2.62	3.36	2.94	0.5614	0.1107

Αναλυτικά οι κολώνες του πίνακα περιγράφονται παρακάτω (πίνακας 4.2).

**Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα προσομοιώσεων για ένα μέγεθος δάσους και μία τιμή ανέμου όπως αυτά παράγονται από το αντίστοιχο php script**

<i>Sid</i>	Simulation ID (το ID της προσομοίωσης, όπως προκύπτει από την βάση του FLogA)
<i>mesh-cell</i>	Σχέση πλευράς κελιού δάσους με πλευρά κελιού πλέγματος ανέμου
<i>WindNinja exec time</i>	Χρόνος εκτέλεσης του WindNinja στην αντίστοιχη προσομοίωση (μετρημένος σε sec)
<i>FLogA exec time</i>	Χρόνος εκτέλεσης του FLogA στην αντίστοιχη προσομοίωση (μετρημένος σε sec)
<i>Min Wind</i>	Ελάχιστη τιμή ταχύτητας ανέμου (m/s) προσομοίωσης
<i>Max Wind</i>	Μέγιστη τιμή ταχύτητας ανέμου (m/s) προσομοίωσης
<i>Avg Wind</i>	Μέση τιμή ταχύτητας ανέμου (για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης) (m/s)
<i>Average Accuracy</i>	Μέση τιμή ακρίβειας (για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης) (καθαρός αριθμός)
<i>St Dev Accuracy</i>	Τυπική απόκλιση ακρίβειας (για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης) (καθαρός αριθμός)

Όσον αφορά τον υπολογισμό της ελάχιστης, μέγιστης και μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου της κάθε προσομοίωσης θα ήταν χρήσιμο να υπενθυμίσουμε πως η τιμή του ανέμου σε κάθε κελί δάσους προκύπτει από το WindNinja και παραμένει σταθερή καθόλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Επομένως η μέγιστη τιμή έντασης ανέμου που παρουσιάζεται στον πίνακα είναι η μέγιστη σε όλη την έκταση του δάσους, αντίστοιχα και η ελάχιστη, ενώ η μέση τιμή υπολογίζεται από την άθροιση όλων των τιμών ανέμου (σε όλη την έκταση του δάσους) διαιρούμενη με το πλήθος των τιμών αυτών.

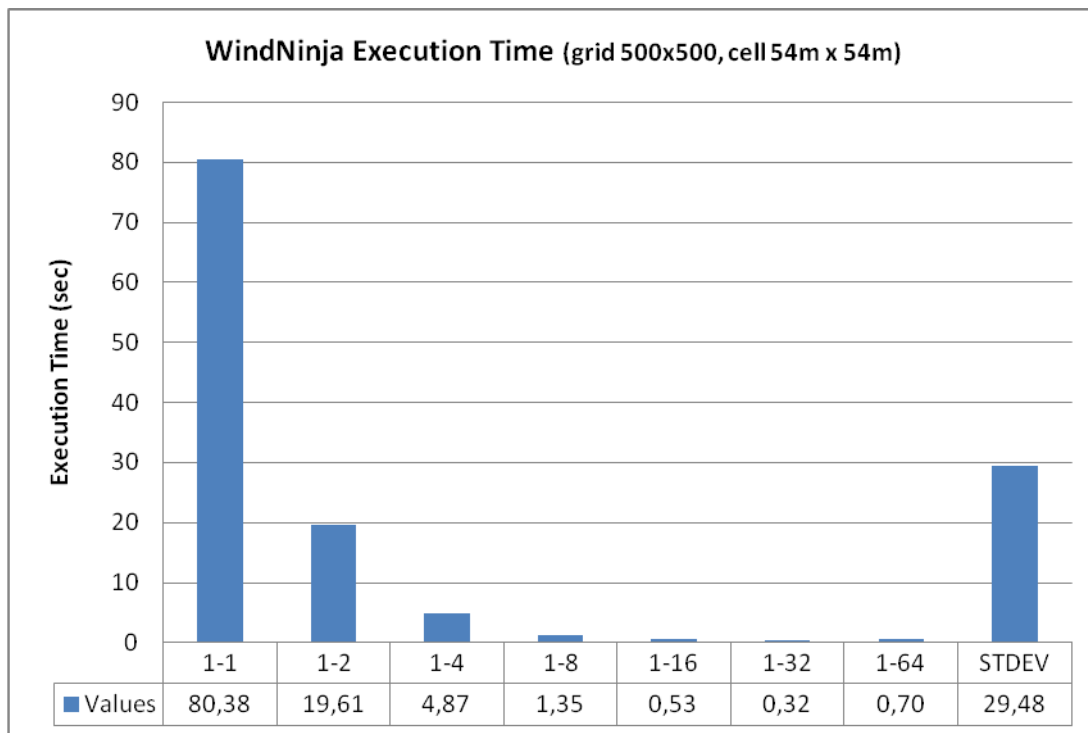
Στο τέλος όλων των προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται δημιουργείται ένα διάγραμμα με συγκεντρωτικά αποτελέσματα που συσχετίζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων με τον χρόνο εκτέλεσης. Στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήματα 4.2 – 4.11) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις εκτελέσεις που πραγματοποιήσαμε στα τρία δάση καταρχήν χωριστά αλλά και όλα μαζί (Σχήμα 4.11).

Ακολουθούν διαγράμματα που παρουσιάζουν για κάθε δάσος το χρόνο εκτέλεσης του WindNinja, του FLoga και την τιμή της ακρίβειας για κάθε σχέση μεγέθους κελιού δάσους

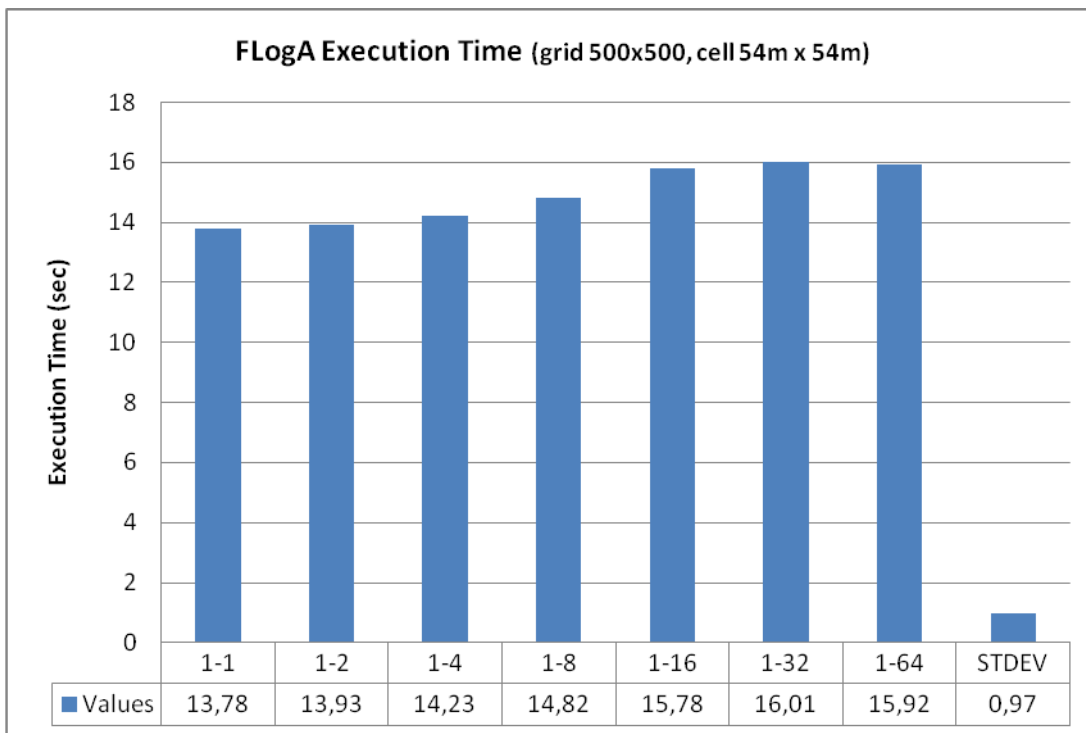


και πλέγματος ανέμου. Σε κάθε διάγραμμα έχει προστεθεί σαν τελευταία μπάρα η τυπική απόκλιση των τιμών των διάφορων σχέσεων (υπολοίπων μπαρών του διαγράμματος).

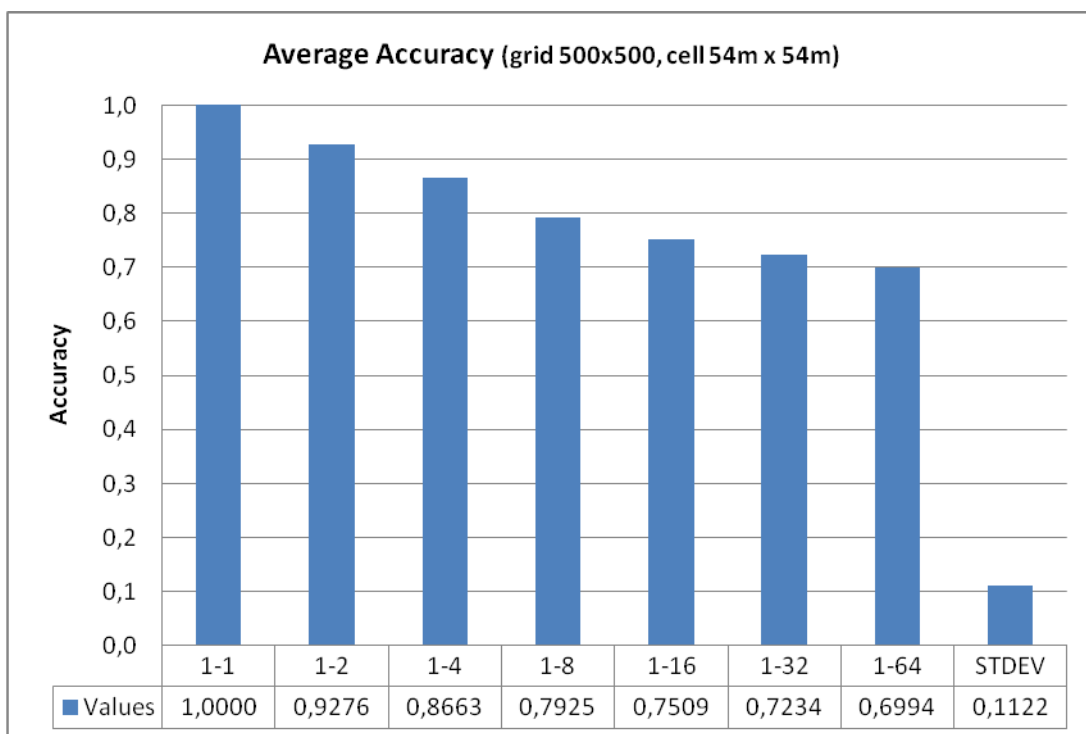
Αρχικά παρουσιάζονται τα διαγράμματα (χρόνος εκτέλεσης WindNinja, χρόνος εκτέλεσης FLogA και ακρίβεια) για τα αποτελέσματα των εκτελέσεων του δάσους πλέγματος 500x500 με μέγεθος κελιού 54m x 54m (ID=1091).



**Σχήμα 4.2: Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του WindNinja στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 500x500 κελιών και μέγεθος κελιού 54m x 54m**

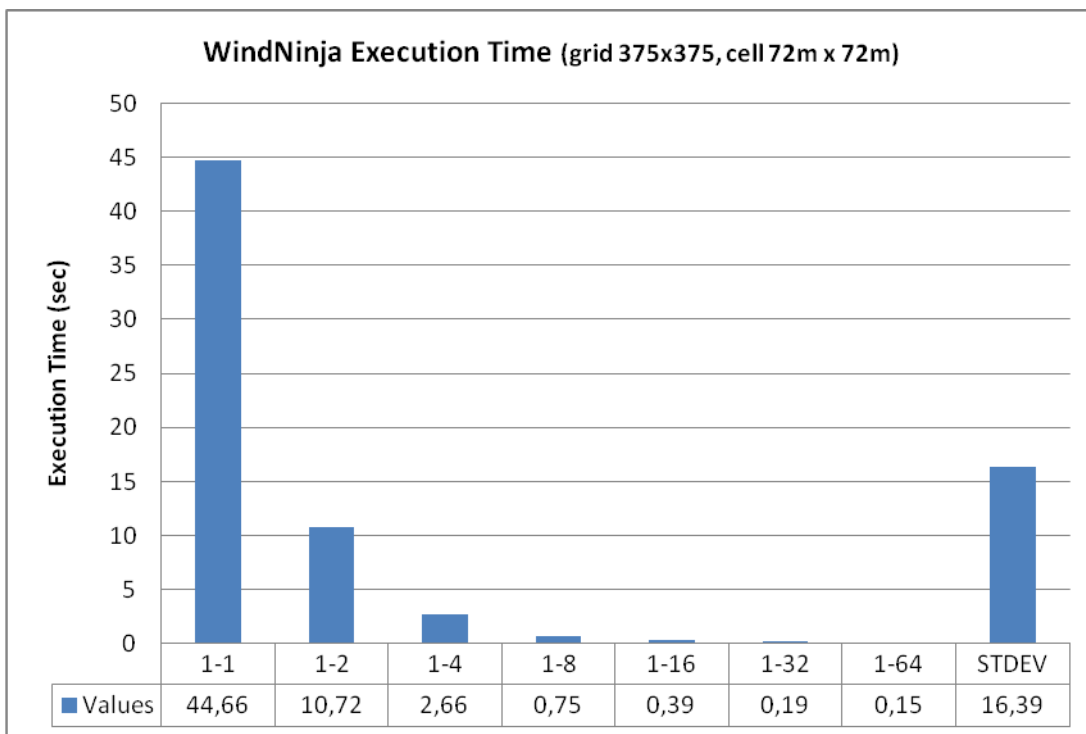


**Σχήμα 4.3:** Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του FLogA στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 500x500 κελιών και μέγεθος κελιού 54m x 54m

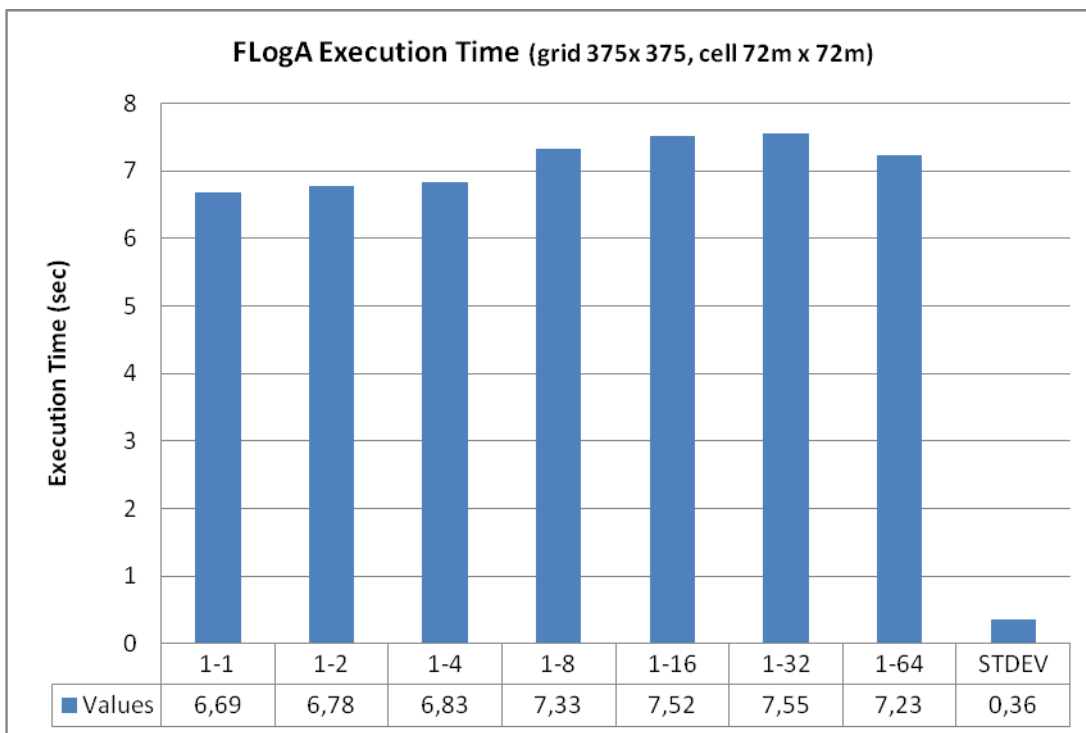


**Σχήμα 4.4:** Διάγραμμα με τις τιμές ακρίβειας στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 500x500 κελιών με μέγεθος κελιού 54m x 54m

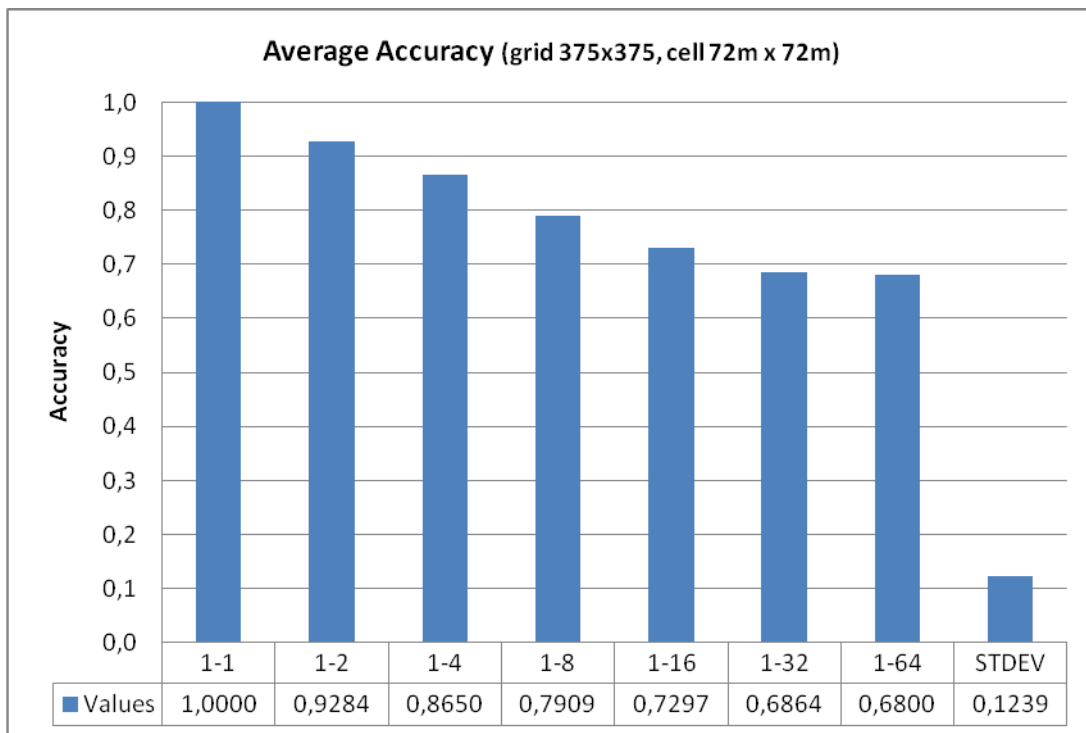
Ακολουθούν τα διαγράμματα για τα αποτελέσματα των εκτελέσεων του δάσους πλέγματος 375x375 με μέγεθος κελιού 72m x 72m (ID=1097).



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του WindNinja στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 375x375 κελιών και μέγεθος κελιού 72m x 72m

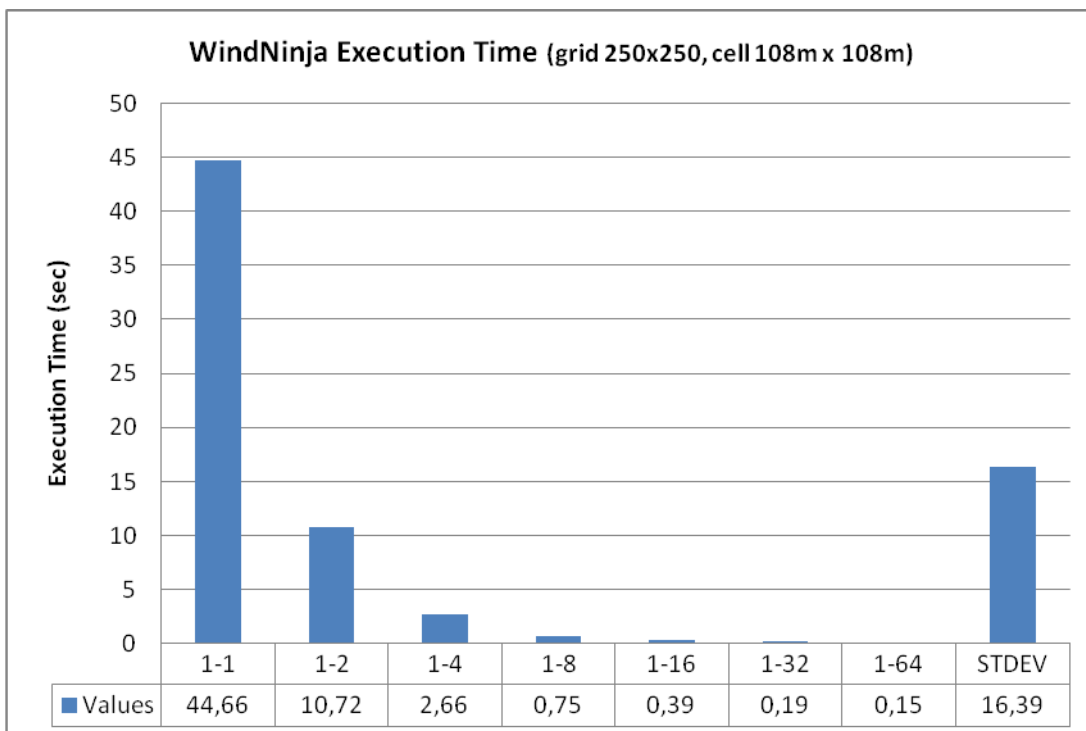


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του FLogA στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 375x375 κελιών και μέγεθος κελιού 72m x 72m

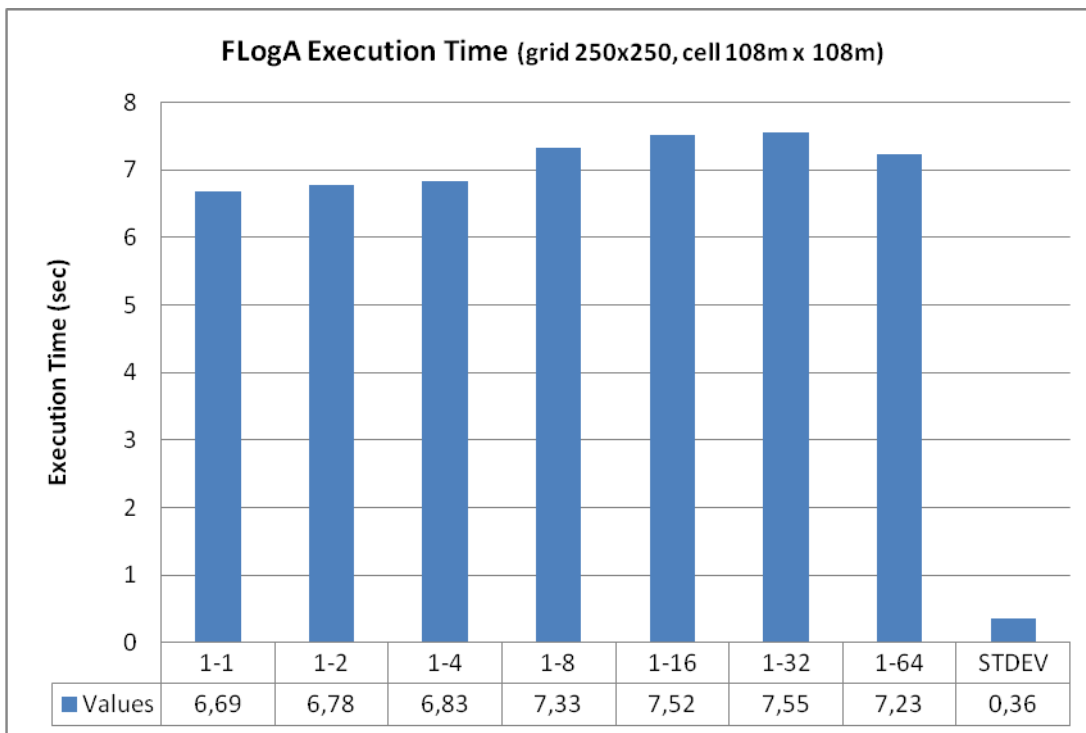


**Σχήμα 4.7:** Διάγραμμα με τις τιμές ακρίβειας στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 375x375 κελιών με μέγεθος κελίου 72m x 72m

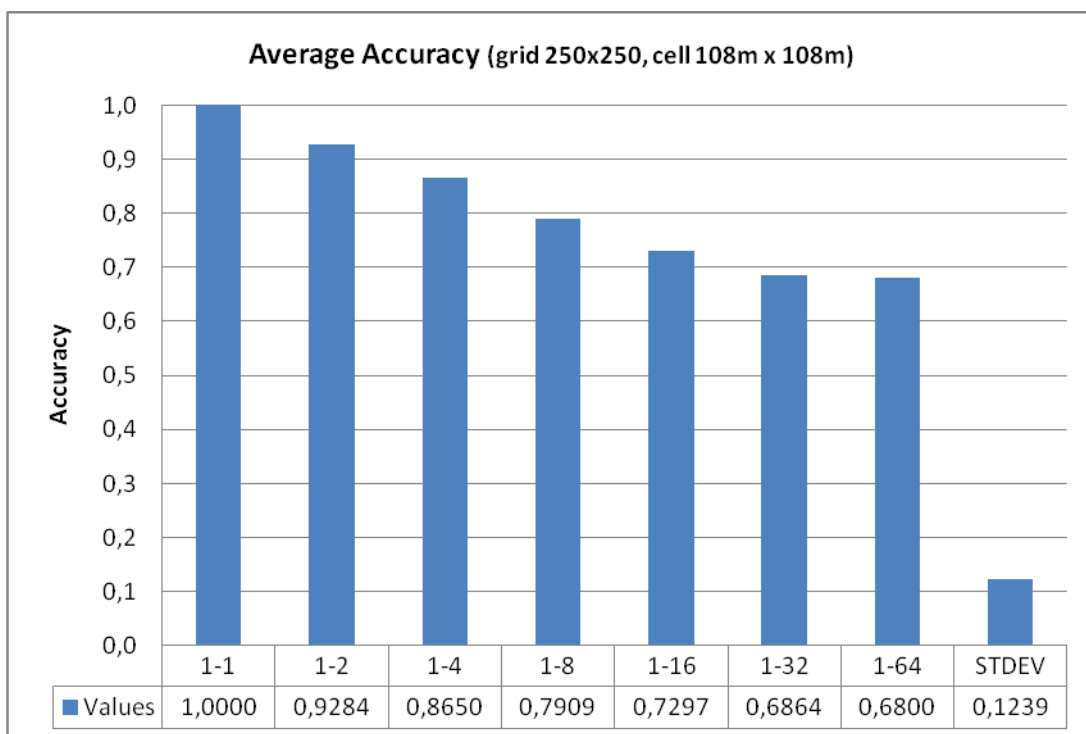
Ακολουθούν τα διαγράμματα μπάρας για τα αποτελέσματα των εκτελέσεων του δάσους πλέγματος 250x250 με μέγεθος κελιού 108m x 108m (ID=1093).



**Σχήμα 4.8:** Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του WindNinja στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 250x250 κελιών και μέγεθος κελίου 108m x 108m



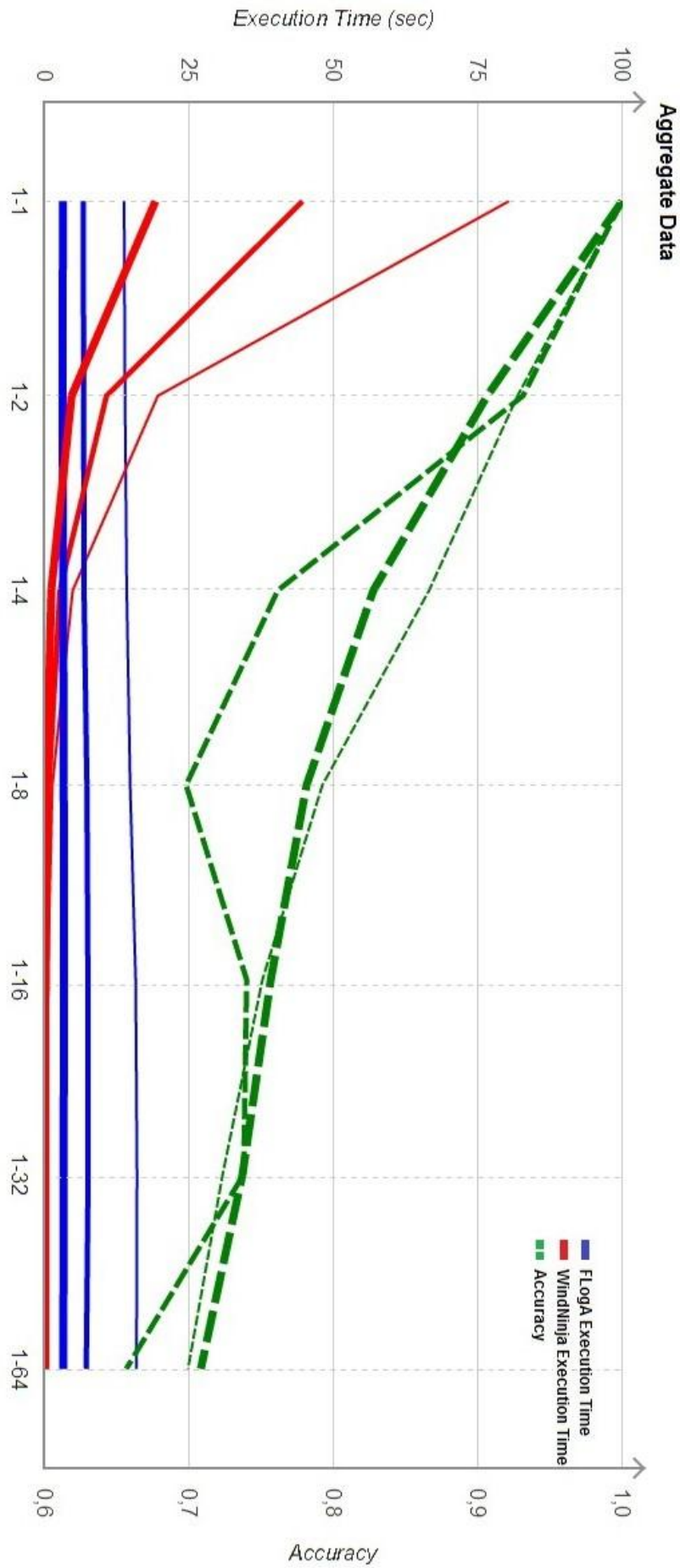
**Σχήμα 4.9: Διάγραμμα με το χρόνο εκτέλεσης του FLogA στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 250x250 κελιών και μέγεθος κελίου 108m x 108m**



**Σχήμα 4.10: Διάγραμμα με τις τιμές ακρίβειας στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου στο δάσος ανάλυσης 250x250 κελιών με μέγεθος κελίου 108m x 108m**

Στα διαγράμματα που προηγήθηκαν φαίνεται η μεγάλη διαφορά που έχουν σε χρόνο οι εκτελέσεις του WindNinja στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου και στα τρία δάση, κάτι που φαίνεται και από την μεγάλη τιμή της τυπικής απόκλισης. Ενδεικτικά για το δάσος ανάλυσης 500x500 κελιών με μέγεθος κελιού 54m x 54m ο μέσος χρόνος εκτέλεσης ξεκινάει από 80.38 δευτερόλεπτα όταν η σχέση είναι 1-1 και φτάνει να πέφτει στα 0.7 δευτερόλεπτα όταν η σχέση μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου είναι 1-64. Σε αντίθεση οι μέσοι χρόνοι εκτέλεσης του FLogA είναι πιο ομοιόμορφοι στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου. Επηρεάζονται σε ένα βαθμό από τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές του ανέμου στις επιμέρους εκτελέσεις, όπως αναφέρουμε παρακάτω στην παράγραφο 4.1. Τέλος η μέση τιμή της ακρίβειας μεγαλώνει γνήσια όσο πιο κοντά είναι τα μεγέθη των κελιών του δάσους και του πλέγματος του ανέμου.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους χρόνους εκτέλεσης του WindNinja και του FLogA και των τιμών της ακρίβειας από όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα με συγκεντρωτικά δεδομένα από τις πραγματοποιηθείσες προσομοιώσεις

Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζονται μέσες τιμές, ως προς τις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου, για τους χρόνους εκτέλεσης του WindNinja και του FLogA καθώς και της ακρίβειας της προσομοίωσης στις διάφορες σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου. Σκοπός αυτού το διαγράμματος είναι να παρουσιάσει τη συνολική εικόνα των μετρήσεων για όλες τις περιπτώσεις, δείχνοντας παράλληλα την πτώση της ακρίβειας των προσομοιώσεων με την πτώση των χρόνων εκτέλεσης όσο το μέγεθος κελιού πλέγματος ανέμου (βάσει του οποίου κάνει τους υπολογισμούς το WindNinja) γίνεται λιγότερο αναλυτικό. Το διάγραμμα έχει στον x-άξονα τις σχέσεις μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου που χρησιμοποιήθηκαν στο πείραμα. Ο ένας y-άξονας (με τίτλο *Execution Time*) χρησιμοποιείται για τις γραφικές παραστάσεις που αφορούν χρόνους εκτέλεσης, ενώ ο άλλος (με τίτλο *Accuracy*) χρησιμοποιείται για τις γραφικές παραστάσεις της ακρίβειας προσομοίωσης. Οι γραφικές παραστάσεις είναι 9, τρεις (χρόνος εκτέλεσης WindNinja, χρόνος εκτέλεσης FLogA και ακρίβεια προσομοίωσης) για κάθε μια από τις τρεις διαφορετικές διαστάσεις του δάσους (όσο μεγαλώνει η ανάλυση του δάσους, δηλαδή όσο έχουμε περισσότερα κελιά δάσους μικρότερης πλευράς κελιού, μεγαλώνει και το πάχος της γραμμής).

Στο διάγραμμα παρατηρούμε πως για τις περιπτώσεις 1-4 και κάτω οι χρόνοι εκτέλεσης του WindNinja είναι μικρότεροι από τους αντίστοιχους του FLogA, επομένως η χρήση του WindNinja, στις συγκεκριμένες σχέσεις, δεν επιβαρύνει ιδιαίτερα χρονικά την προσομοίωση. Ακόμα, για τις ίδιες σχέσεις τιμών μεγέθους κελιού δάσους και μεγέθους κελιού ανέμου, η τιμή της ακρίβειας κυμαίνεται πάνω από το 0.8 και για τις τρεις διαφορετικές αναλύσεις του δάσους. Συνεπώς η περίπτωση 1-4 κρίνεται ότι παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια χωρίς να επιβαρύνει σημαντικά τον χρόνο απόκρισης του προσομοιωτή.

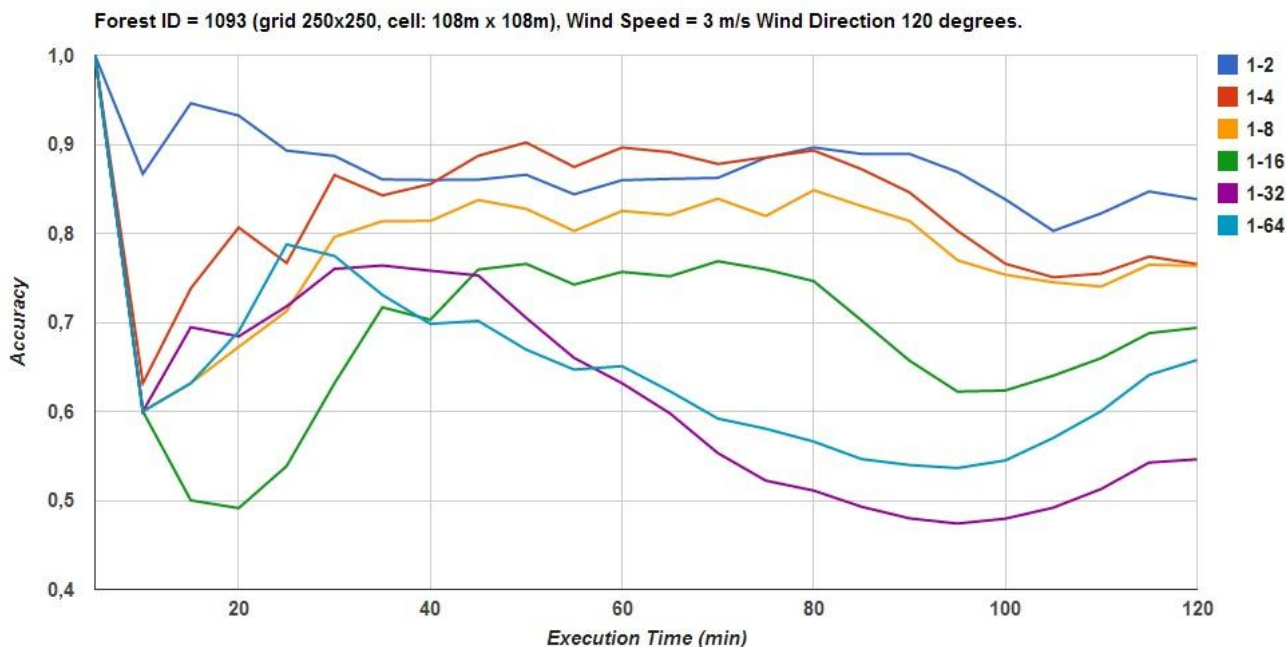
Στο Παράρτημα I δίνονται όλα τα διαγράμματα και οι σχετικοί πίνακες που παρήχθησαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση που έχει η διαφοροποίηση της έντασης του ανέμου, κάτι που φαίνεται στις εικόνες I.4, I.5 και I.6 από Παράρτημα I. Και οι τρεις εικόνες παρουσιάζουν το ίδιο δάσος (ID=1097), ανάλυσης πλέγματος 375x375 και μέγεθος κελιού 72m x 72m, αλλά με διαφορετικές τιμές ταχύτητας ανέμου (3m/s, 5m/s και 8m/s αντίστοιχα). Στις εικόνες παρατηρείται να μικραίνει η ακρίβεια προσομοίωσης όσο μικραίνει η ταχύτητα ανέμου, κάτι που κυρίως φαίνεται στις μεγάλες σχέσεις τιμών μεγέθους κελιού δάσους και μεγέθους κελιού ανέμου (1-32 και 1-64). Αυτό οφείλεται στο ότι όταν ο άνεμος είναι ασθενής, λιγότερα κελιά δάσους καίγονται σε σχέση με ένα αντίστοιχο σενάριο με δυνατότερο άνεμο. Επειδή όταν υπολογίζουμε την ακρίβεια



προσομοίωσης στην ουσία αθροίζουμε κελιά, οι διαφορές που βρίσκουμε όταν τα καμένα κελιά είναι λιγότερα επηρεάζουν πιο πολύ την ακρίβεια της προσομοίωσης. Αυτός είναι και ο λόγος που υπάρχουν εντονότερες διακυμάνσεις στις γραφικές παραστάσεις των διάφορων σχέσεων μεγέθους πλέγματος ανέμου και μεγέθους εδάφους δάσους.

#### 4.1 Συμπεράσματα

Αυτό που παρατηρούμε από τα διαγράμματα (Σχήμα 4.11) είναι ότι η ακρίβεια της προσομοίωσης μεγαλώνει όσο πιο κοντά είναι τα μεγέθη των κελιών του δάσους και του πλέγματος του ανέμου. Σε κάποιες περιπτώσεις (ειδικά όταν η ανάλυση του πλέγματος του δάσους είναι μικρή) μπορεί μεγαλύτερο μέγεθος στο κελί του πλέγματος ανέμου να παρουσιάζει μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση από μια εκτέλεση με μικρότερο μέγεθος κελιού, όπως για παράδειγμα στο διάγραμμα που αφορά τις προσομοιώσεις του δάσους διάστασης 250x250, με μέγεθος κελιού 108m x 108m και ταχύτητα ανέμου 3m/s (Σχήμα 4.12), στο οποίο μετά την χρονική στιγμή 60min η καμπύλη 1-64 (κυανή) βρίσκεται επάνω από την καμπύλη 1-32 (μωβ). Αυτό φαίνεται να είναι τυχαίο, στα πλαίσια της εργασίας όμως δεν έγιναν άλλα πειράματα. Μελλοντικά θα μπορούσαν να γίνουν και άλλα πειράματα για να επιβεβαιωθεί ο ισχυρισμός.



Σχήμα 4.12: Ακρίβεια προσομοίωσης σε σχέση με το χρόνο για διαφορετικές σχέσεις επιφάνειας κελιού εδάφους – κελιού στο δάσος μεγέθους πλέγματος 250x250, κελιού πλευράς 108m και ταχύτητας ανέμου 3m/s

Επίσης παρατηρούμε εντονότερες διακυμάνσεις στις αρχικές χρονικές στιγμές των προσομοιώσεων που οφείλεται στο ότι το πλήθος των υπό σύγκριση κελιών είναι ακόμα μικρό και άρα ελάχιστες διαφορές αρκούν για να κάνουν την τιμή της ακρίβειας της προσομοίωσης να έχει μεγάλες διακυμάνσεις. Αυτό φαίνεται και από το γεγονός όταν συγκρίνονται πανομοιότυπα τρεξίματα με διαφορετικό μέγεθος κελιού δάσους, όπου φαίνεται ότι οι διακυμάνσεις στην αρχή της προσομοίωσης είναι πιο ομαλές όσο το μέγεθος του κελιού του δάσους μικραίνει ακριβώς γιατί το πλήθος των υπό σύγκριση κελιών είναι μεγαλύτερο για το μικρότερο μέγεθος κελιού παρόλο που η έκταση της δασικής πυρκαγιάς είναι “ακριβώς” η ίδια.

Από την γραφική παράσταση με τις μέσες τιμές (Σχήμα 4.11) προκύπτει το συμπέρασμα ότι στις προσομοιώσεις με σχέσεις μεγέθους κελιών δάσους και πλέγματος ανέμου από 1-4 και μεγαλύτερες η εισαγωγή του WindNinja προσθέτει καθυστέρηση ίση με το χρόνο εκτέλεσης του FLogA. Αυτό φαίνεται από το γεγονός ότι οι αντίστοιχες καμπύλες είναι κοντά ως προς τις τιμές τους στον γ-άξονα. Στις σχέσεις 1-1, και 1-2 όμως η εισαγωγή του WindNinja επιφέρει μια σημαντική καθυστέρηση αφού ο χρόνος εκτέλεσής του είναι κατά πολύ μεγαλύτερος σε σχέση με το χρόνο εκτέλεσης του FLogA. Επίσης με τον τρόπο που παρουσιάζεται το διάγραμμα μπορούμε να δούμε το τι χάνουμε σε ακρίβεια προσομοίωσης από τη αύξηση της διαφοράς των κελιών του δάσους και του πλέγματος του ανέμου, και έτσι να έχουμε με οπτικό τρόπο άμεσα την πληροφορία του πόσο κοστίζει (σε ακρίβεια) η χρονική μείωση στην εκτέλεση του WindNinja, μέσω της αύξησης της διαφοράς των κελιών δάσους και πλέγματος ανέμου.

Τέλος στην τελευταία συγκεντρωτική γραφική παράσταση παρατηρείται μια μικρή αλλά ρητή αύξηση στο χρόνο εκτέλεσης του FLogA όσο το πλέγμα του ανέμου γίνεται λιγότερο αναλυτικό. Αυτή η παρατήρηση ήταν που μας έκανε να προσθέσουμε στους πίνακες των δεδομένων και τις min / max / avg τιμές της ταχύτητας του ανέμου που παράγει ο WindNinja καθώς πιστέψαμε πως η αύξηση στην ταχύτητα του ανέμου είναι η πιθανή αιτία που αυξάνει το χρόνο προσομοίωσης του FLogA. Τα δεδομένα επιβεβαιώνουν αυτή την υπόθεση κάτι που εξηγείται και διαισθητικά: όσο περισσότερα “εμπόδια” βρίσκει ο άνεμος στην πορεία του τόσο πιο πολύ επιβραδύνει.

Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε 10 δασικές πυρκαγιές το καλοκαίρι 2012 στον Ελλαδικό χώρο μαζί με τα αποτελέσματα των συγκρίσεων των προσομοιώσεων και των πραγματικών δεδομένων από το Αστεροσκοπείο Αθηνών.

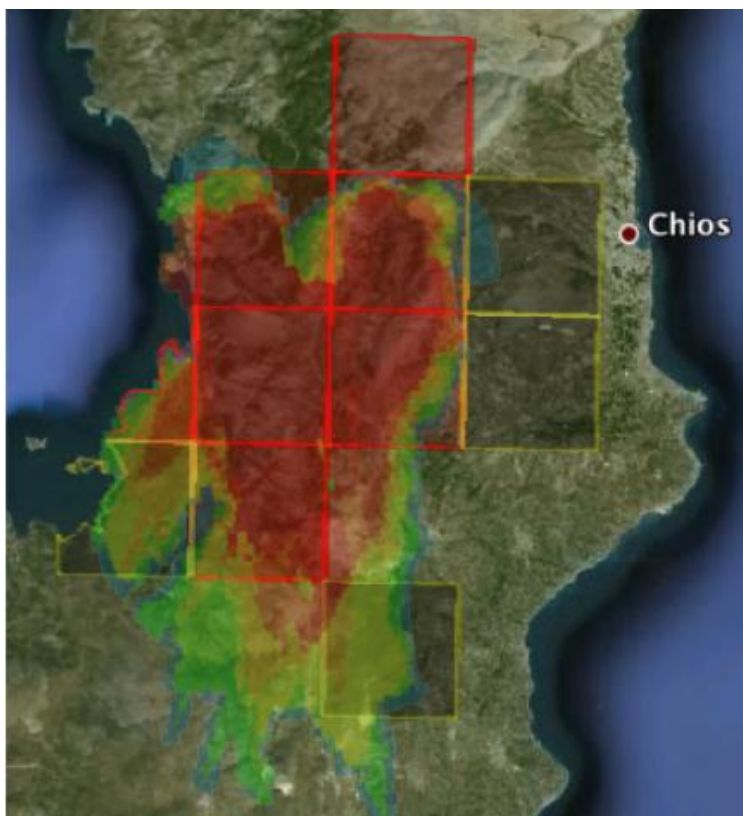
## 5. ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η ερευνητική ομάδα του FLogA χρησιμοποιώντας καιρικά και hotspot δεδομένα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (National Observatory of Athens, NOA [26]) προσομοίωσε τις 10 μεγαλύτερες πυρκαγιές του 2012 στην Ελλάδα. Χρησιμοποιώντας αυτό το σύνολο δεδομένων θελήσαμε να κάνουμε συγκρίσεις μεταξύ πανομοιότυπων προσομοιώσεων με ομοιόμορφο χωρικά άνεμο και ανομοιόμορφο πεδίου ανέμου με βάση το WindNinja, έτσι ώστε να διαπιστώσουμε αν υπάρχουν βελτιώσεις στην ακρίβεια της προσομοίωσης σε πραγματικά σενάρια δασικής πυρκαγιάς. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν και εναλλακτικές μέθοδοι εκτίμησης της ακρίβειας της προσομοίωσης.

### 5.1 Περιγραφή hotspot δεδομένων του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών

Το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών μας παρείχε δεδομένα για δασικές πυρκαγιές που είχαν παρατηρηθεί το καλοκαίρι του 2012. Τα δεδομένα αυτά τα αναζητούσε ο κώδικάς μας (rhp script) μέσω υπηρεσιών ιστού ανάλογα με την προσομοίωση που τρέχαμε κάθε φορά, και είχαν την μορφή xml αρχείων με τα ακόλουθα πεδία:

- *geo* = πολύγωνο (ή διάνυσμα πολυγώνων) που περικλείει το τμήμα της περιοχής στο οποίο παρατηρούνταν δασική πυρκαγιά. Η περιγραφή των πολυγώνων γινόταν με ένα σύνολο από ζευγάρια τιμών (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος) που δήλωναν τις γωνίες των πολυγώνων. Σε αυτή την έκδοση των δεδομένων οι τυπικές διαστάσεις των αντίστοιχων περιοχών των πολυγώνων είναι 4km x 4km.
- *acquisitionTime* = χρονική στιγμή που παρατηρούνταν πυρκαγιές στο αντίστοιχο πολύγωνο. Τα δεδομένα παρέχονταν από τον NOA σε συχνότητα 5 λεπτών.
- *conf* = τιμή που δήλωνε το πόσο έγκυρη ήταν η συγκεκριμένη πληροφορία για δασική πυρκαγιά την αντίστοιχη χρονική στιγμή στο αντίστοιχο πολύγωνο.



**Εικόνα 5.1: Στιγμιότυπο από την οπτικοποίηση στο Google Earth της προσομοίωσης της δασικής πυρκαγιάς της Χίου 2012. Τα πολύγωνα αναπαριστούν τα hotspots που δημοσιεύει το NOA και ανανεώνονται ανά 5 λεπτά.**

Τέλος, επισημαίνεται ότι η έναρξη της κάθε προσομοίωσης ήταν η στιγμή της ανακοίνωσης του πρώτου πολυγώνου στα δεδομένα του NOA.

## **5.2 Μέθοδοι σύγκρισης για την ποσοτικοποίηση της ακρίβειας της προσομοίωσης**

Χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις νέες μέθοδοι, μαζί με τις δύο ήδη υλοποιημένες, για να συγκριθούν τα αποτελέσματα του FLogA (με και χωρίς τη χρήση του WindNinja) με τα δεδομένα του NOA για 10 πυρκαγιές του καλοκαιριού του 2012. Στις ενότητες που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά οι μέθοδοι και παρουσιάζονται διαγράμματα, για κάθε μια μέθοδο σύγκρισης, που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα αυτά, χρησιμοποιώντας μέσες τιμές στις προσομοιώσεις για τις διάφορες χρονικές στιγμές. Επίσης σχολιάζονται τα αποτελέσματα και παρατίθεται και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα από μια προσομοίωση.

Κάτω από κάθε διάγραμμα αναγράφεται και η μέση τιμή όλης της χρονικής περιόδου και για τις δύο περιπτώσεις (με και χωρίς τη χρήση του WindNinja). Ακόμα να αναφέρουμε πως στα ακόλουθα διαγράμματα με κόκκινη γραμμή είναι η γραφική παράσταση των τιμών με τη χρήση του WindNinja, ενώ με μπλε γραμμή είναι η γραφική παράσταση των τιμών χωρίς τη χρήση του WindNinja. Τέλος για τις δύο τελευταίες μεθόδους έχουμε επιλέξει να

απεικονίσουμε τις τιμές  $1/x$  για λόγους συνέπειας με τα υπόλοιπα διαγράμματα. Για όλες τις μεθόδους, πλην των δύο τελευταίων, ισχύει ότι καλύτερη είναι η μεγαλύτερη τιμή, επειδή όμως κάτι τέτοιο δεν ισχύει στις δύο τελευταίες μεθόδους λόγω της υλοποίησής τους, επιλέξαμε να αναπαραστήσουμε τις αντίστροφες τιμές.

### 5.2.1 Προϋπάρχουσες μέθοδοι σύγκρισης

Στις μεθόδους αυτές συγκρίνουμε δύο χάρτες δασικών πυρκαγιών (χάρτης πρόβλεψης και μέτρησης) χρησιμοποιώντας την ακόλουθη συνάρτηση:

$$\textit{Similarity score} = (\#cells \cap) / (\#cells \cup) \quad (1)$$

όπου ο όρος  $\#cells \cap$  αντιπροσωπεύει το πλήθος των κελιών που βρίσκονται στην τομή των δύο χαρτών, και ο όρος  $\#cells \cup$  είναι το πλήθος των κελιών που βρίσκονται στην ένωσή τους. Μία τιμή ίση με 1 αντιστοιχεί στην τέλεια ταύτιση (πρόβλεψη = μέτρηση). Αντιθέτως, μία τιμή ίση με το 0 υποδεικνύει το μέγιστο σφάλμα. Αυτή η συνάρτηση είναι κάπως "αυστηρή" γιατί μία τιμή κοντά στο 1 είναι σχεδόν αδύνατη επειδή τα hotspots του NOA είναι πολύ μεγάλα (τετράγωνα με πλευρά περίπου 4km) και δε μπορούν να αποδώσουν με ακρίβεια το σχήμα μιας πραγματικής δασικής πυρκαγιάς.

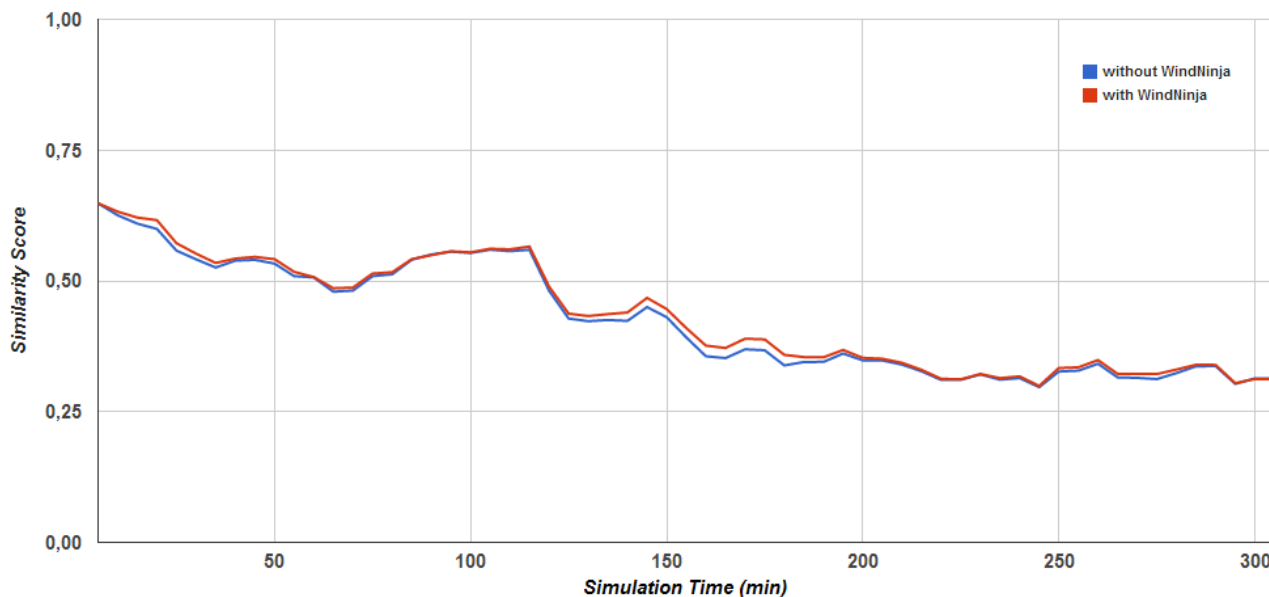
Παρακάτω παρουσιάζουμε 2 μεθόδους υπολογισμού της ακρίβειας της προσομοίωσης:

- Μέθοδος καλύτερου σεναρίου
- Μέθοδος καλύτερου κατωφλίου (fire risk threshold)

#### 5.2.1.1 Μέθοδος καλύτερου σεναρίου

Για κάθε NOA hotspot (κάθε 5 λεπτά) μετράμε το Similarity score (εξίσωση 1) όλων των σεναρίων προσομοίωσης και αναφέρουμε την τιμή του καλύτερου από αυτά. Τα σεναρία διαφοροποιούνται στις τιμές ταχύτητας ανέμου, διεύθυνσης ανέμου και υγρασίας. Στις προσομοιώσεις μας χρησιμοποιήσαμε τρεις διαφορετικές τιμές ταχύτητας ανέμου (την τιμή του Αστεροσκοπείου, την τιμή του Αστεροσκοπείου μειωμένη κατά 3m/s και αυξημένη κατά 3m/s), τρεις διαφορετικές τιμές διεύθυνσης ανέμου (την τιμή του Αστεροσκοπείου, την τιμή του Αστεροσκοπείου μειωμένη κατά 30 μοίρες και αυξημένη κατά 30 μοίρες) και τρεις τιμές υγρασίας (0%, 15%, 30%). Συνολικά λοιπόν πραγματοποιήθηκαν 27 σεναρία ανά δασική πυρκαγιά.

### Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο καλύτερου σεναρίου



**Σχήμα 5.1: Γραφική παράσταση με τους μέσους όρους ανά πεντάλεπτο όλων των προσομοιώσεων των 10 δασικών πυρκαγιών του 2012 με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο καλύτερου σεναρίου**

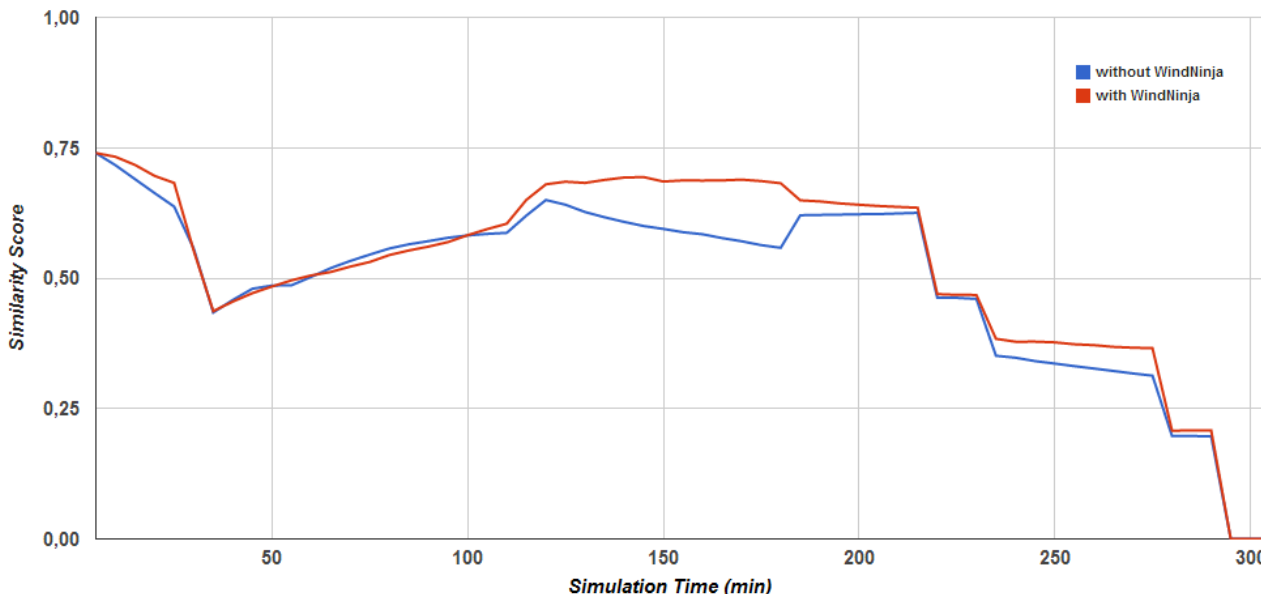
Η μέση τιμή της γραφικής παράστασης (Σχήμα 5.1), η οποία υπολογίζεται σαν το άθροισμα των τιμών ακρίβειας κάθε προσομοίωσης (εξίσωση 1) δια το πλήθος τους, με χρήση του WindNinja είναι 0.433 (διασπορά 0.105) ενώ χωρίς χρήση του WindNinja είναι 0.426 (διασπορά 0.105).

Σε αυτή τη μέθοδο τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από όλες τις προσομοιώσεις με την χρήση του WindNinja είναι ελαφρώς καλύτερα καθ' όλη τη χρονική διάρκεια πρόβλεψη των 300 λεπτών που εξετάσαμε. Η διαφορά στη μέση τιμή είναι της τάξης του 1,7% υπέρ του WindNinja. Ακόμα παρατηρούμε ότι το Similarity score μειώνεται με το χρόνο. Αυτό οφείλεται στο ότι στην αρχή της προσομοίωσης τα πραγματικά καμένα σημεία είναι λίγα και μαζεμένα κοντά στο σημείο ανάφλεξης. Το ίδιο σημείο ανάφλεξης χρησιμοποιείται και για την προσομοίωση. Καθώς όμως εξελίσσεται η πυρκαγιά τα πραγματικά καμένα κελιά διαφέρουν όλο και περισσότερο από τα καμένα της προσομοίωσης, για αυτό και μειώνεται το Similarity score. Πρόκειται για μια ένδειξη ότι η πρόβλεψη του προσομοιωτή αποκλίνει όλο και περισσότερο όσο απομακρύνεται χρονικά η πρόβλεψη από την έναρξη της πυρκαγιάς (simulation drift).

Το διάγραμμα που ακολουθεί είναι ένα παράδειγμα από την εκτέλεση μίας προσομοίωσης. Σε αυτό φαίνεται ό,τι παρατηρήσαμε προηγουμένως, δηλαδή ότι σχεδόν στο σύνολο της χρονικής περιόδου η καμπύλη που αναπαριστά τα δεδομένα με τη χρήση του WindNinja

(κόκκινη καμπύλη) είναι πάνω από την καμπύλη των δεδομένων χωρίς τη χρήση του WindNinja (μπλε καμπύλη).

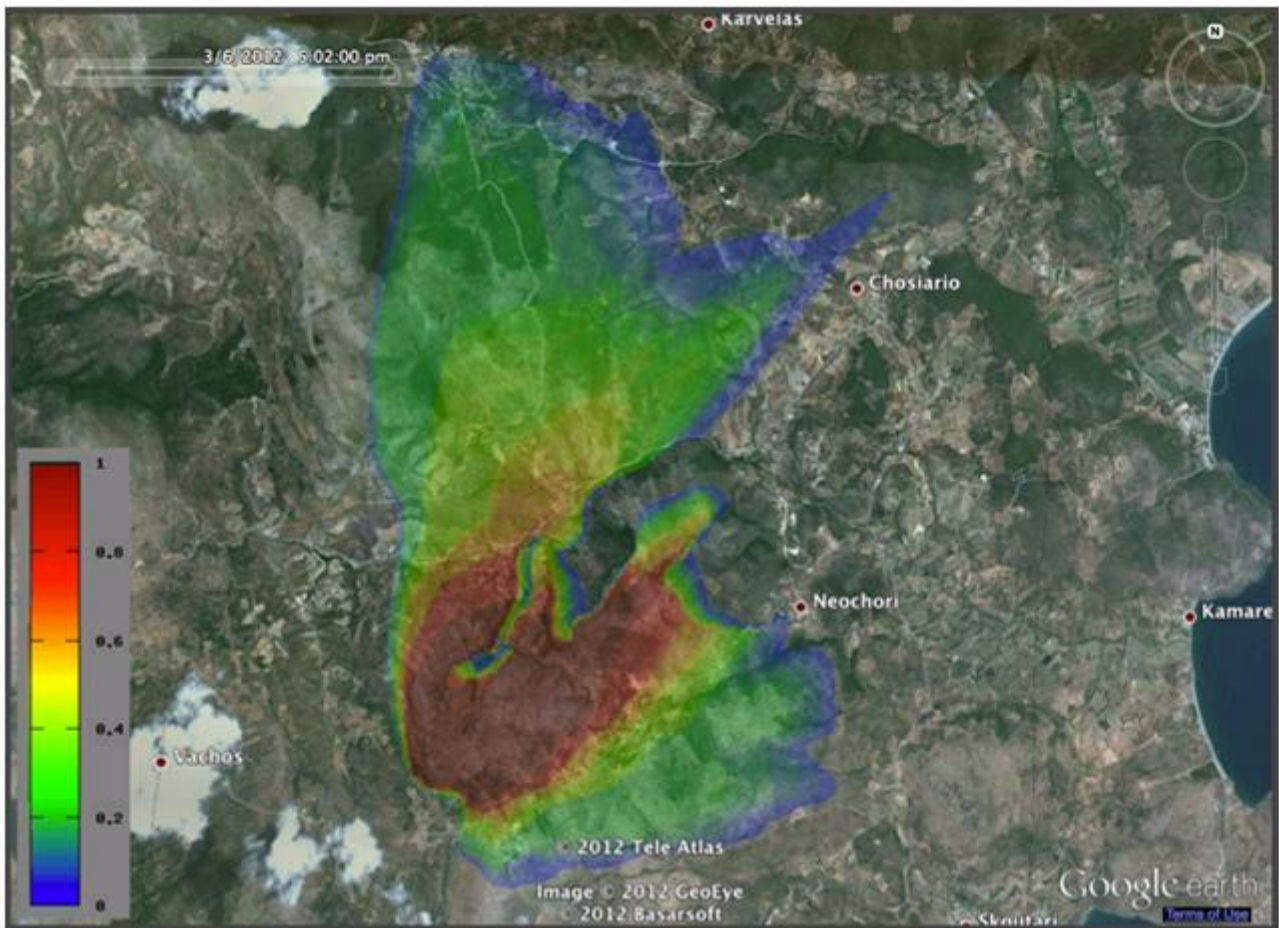
Σύγκριση ακρίβειας με τη μέθοδο καλύτερου σεναρίου



Σχήμα 5.2: Γραφική παράσταση μιας προσομοίωσης δασικής πυρκαγιάς στον FLogA με και χωρίς τη χρήση του WindNinja

### 5.2.1.2 Μέθοδος καλύτερου κατώφλιου (fire risk threshold)

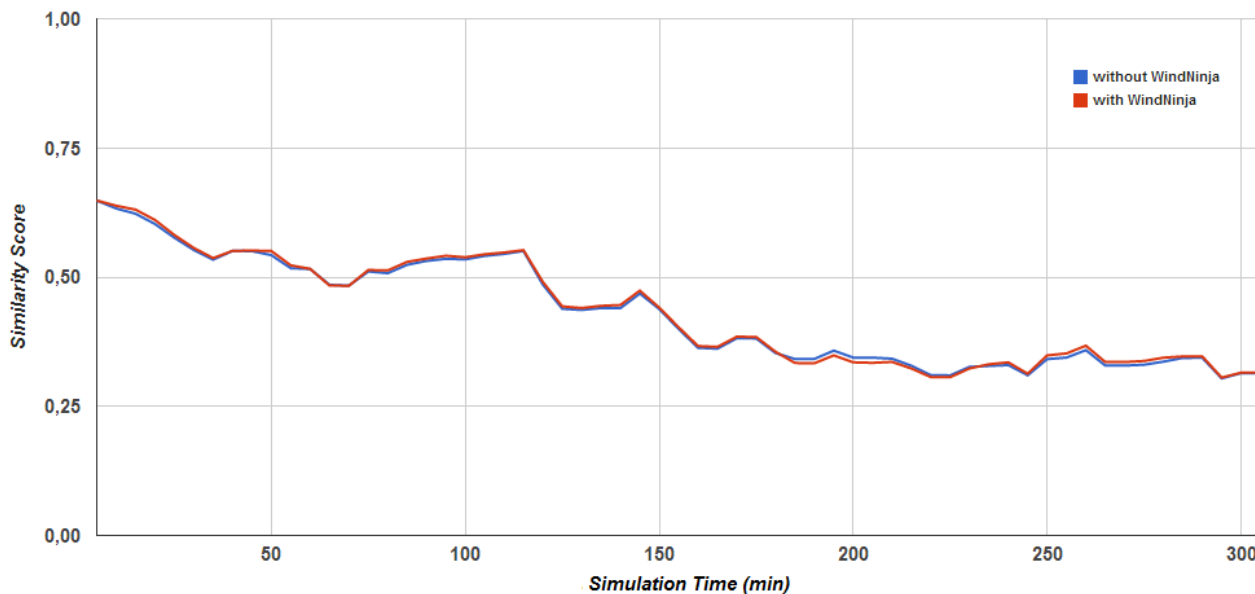
Για κάθε NOA hotspot (κάθε 5 λεπτά) μετράμε το Similarity score του συγκεντρωτικού-πιθανοτικού αποτελέσματος όλων των σεναρίων προσομοίωσης για κάθε πιθανό κατώφλι (fire risk threshold) και αναφέρουμε τις τιμές του καλύτερου συνδυασμού. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως κβαντίζουμε το πεδίο του fire risk χρησιμοποιώντας όλα τα πιθανά κατώφλια (στην περίπτωση μας έχουμε 27 σεσάρια άρα και κατώφλια ανά διαστήματα των  $1/27=0.037$ ) και υπολογίζουμε με ποιο κατώφλι θα έχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή τιμή στο Similarity score (εξίσωση 1). Ένα παράδειγμα που βοηθάει στην κατανόηση υπάρχει στην Εικόνα 5.2. Στην εικόνα φαίνεται πως όσο ανεβαίνει το κατώφλι (όσο δηλαδή μεγαλώνει η πιθανότητα της πρόβλεψης για πυρκαγιά), τόσο μικρότερη επιφάνεια καλύπτουμε. Για παράδειγμα με σκούρο κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η περιοχή την οποία καίνε όλα τα σεσάρια που χρησιμοποιήθηκαν (fire risk threshold > 0.93). Χαμηλώνοντας το κατώφλι επεκτείνεται το μέγεθος του μετώπου που λαμβάνεται υπόψη και η μέθοδος επιστρέφει το καλύτερο κατώφλι που δίνει το καλύτερο Similarity Score.



Εικόνα 5.2: Παράδειγμα οπτικοποίησης των πιθανοτήτων καύσης (fire risk)



### Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο καλύτερου κατωφλίου (fire risk threshold)

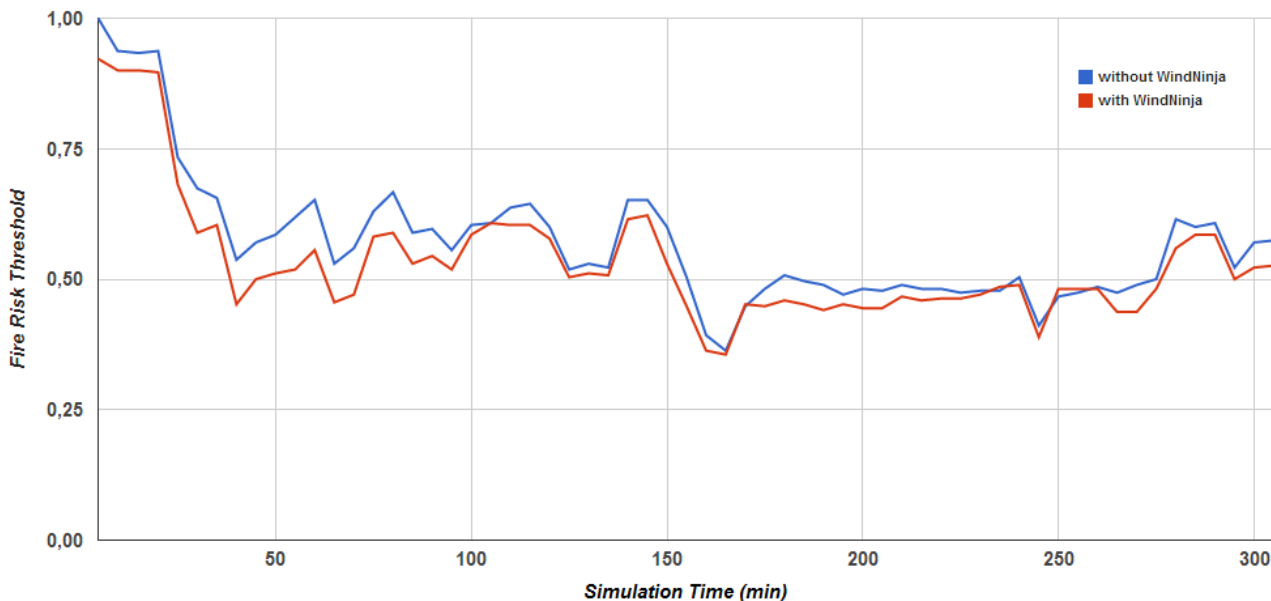


**Σχήμα 5.3:** Γραφική παράσταση με τους μέσους όρους των **Similarity Scores** όλων των προσομοιώσεων με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο καλύτερου κατωφλίου (fire risk threshold)

Η μέση τιμή της γραφικής παράστασης (Σχήμα 5.3) με χρήση του WindNinja είναι 0.433 (διασπορά 0.104) ενώ χωρίς χρήση του WindNinja είναι 0.431 (διασπορά 0.102).

Παρατηρούμε πως στη μέθοδο σύγκρισης που φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα η χρήση του WindNinja βελτιώνει σε μικρό βαθμό τα αποτελέσματα. Ενδεικτικά η βελτίωση στη μέση τιμή είναι περίπου 0.5%. Χωρίς τη χρήση του WindNinja η μέθοδος καλύτερου κατωφλίου επιστρέφει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη μέθοδο καλύτερου σεναρίου, ωστόσο η μέθοδος του καλύτερου κατωφλίου δε φαίνεται να ευνοείται με τη χρήση του WindNinja. Αξίζει να σημειωθεί πως παρόλο που η ακρίβεια της πρόβλεψης αυξάνεται ελαφρώς με τη χρήση του WindNinja, η διασπορά της ακρίβειας αυξάνεται περισσότερο.

**Μέσοι όροι των καλύτερων κατωφλίων από τη μέθοδο καλύτερου κατωφλίου (fire risk threshold)**



**Σχήμα 5.4: Γραφική παράσταση με τους μέσους όρους της τιμής του βέλτιστου κατωφλίου (fire risk threshold) όλων των προσομοιώσεων των 10 δασικών περιοχών με και χωρίς τη χρήση του WindNinja**

Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα των τιμών των καλύτερων κατωφλίων για όλες τις προσομοιώσεις.

Η μέση τιμή της γραφικής παράστασης με χρήση του WindNinja είναι 0.533 (διασπορά 0.104) ενώ χωρίς χρήση του WindNinja είναι 0.571 (διασπορά 0.102).

Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η τιμή του κατωφλίου (fire risk threshold) βάσει του οποίου μεγιστοποιούταν η τιμή του Similarity score (εξίσωση 1) της μεθόδου. Είναι λογικό που η χρήση του WindNinja προκαλεί μια "χαλάρωση" στο risk threshold ώστε χαμηλώνοντάς το να "επεκτείνει" νοητά το μέτωπο της δασικής πυρκαγιάς για να υπερκεράσει τη φυσιολογική καθυστέρηση λόγω της μειωμένης ταχύτητας ανέμου που προκαλεί το WindNinja σε σχέση με την ένταση του αντίστοιχου ομοιόμορφου ανέμου. Η χρήση του WindNinja «καθυστερεί» λίγο το μέτωπο γιατί λαμβάνει υπόψη τη μορφολογία της περιοχής η οποία έχει την τάση να επιβραδύνει τον άνεμο. Βεβαίως κατά τόπους είναι πολύ πιθανό η ταχύτητα του ανέμου να αυξάνεται, αλλά γενικά σε όλη την έκταση της δασικής περιοχής η μέση ταχύτητα με τη χρήση του WindNinja έχει την τάση να μειώνεται.

## 5.2.2 Μέθοδοι σύγκρισης που αναπτύχθηκαν

Για τις συγκρίσεις αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις νέες μέθοδοι μέτρησης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων του FLogA σε σχέση με τα δεδομένα του NOA. Η ανάγκη για να δημιουργήσουμε νέες μεθόδους σύγκρισης προήλθε από το γεγονός ότι οι προϋπάρχουσες ήταν κάπως "αυστηρές" καθώς είναι σχεδόν αδύνατη η ταύτιση των χαρτών πρόβλεψης και μέτρησης επειδή τα hotspots του NOA είναι πολύ μεγάλα (περίπου 4km x 4km) και δε μπορούν να αποδώσουν με ακρίβεια το "σχήμα" μιας πραγματικής δασικής πυρκαγιάς.

Οι μέθοδοι σύγκρισης που αναπτύχθηκαν είναι οι ακόλουθες:

- Μέση πιθανότητα πυρκαγιάς για κάθε πολύγωνο NOA
- Μέσο κατώφλι πιθανότητας κάτω από το οποίο τουλάχιστον 50% του πολυγώνου NOA έχει καεί
- Ο λόγος των εξωτερικών/εσωτερικών καμένων κελιών
- Ο λόγος των μέσων πιθανοτήτων πυρκαγιάς των εξωτερικών/εσωτερικά καμένα κελιά.

### 5.2.2.1 Μέση πιθανότητα πυρκαγιάς για κάθε πολύγωνο NOA

Με αυτή τη μέθοδο σύγκρισης θέλαμε να υπολογίσουμε την πρόβλεψη του FLogA για τη μέση πιθανότητα να καεί (fire risk) κάθε πολύγωνο NOA κάθε χρονική στιγμή. Το αποτέλεσμα της μεθόδου είναι μια τιμή για κάθε πολύγωνο NOA και για κάθε χρονική στιγμή (κάθε πεντάλεπτο στην περίπτωση μας) με σύνολο τιμών το διάστημα [0, 1], αφού τελικά διαιρούσαμε τον αριθμό των σεναρίων που καίνε το κάθε κελί με το σύνολο των σεναρίων.

Ακολουθεί ο αλγόριθμος που περιγράφει την μέθοδο.

Για κάθε χρονική στιγμή (5 λεπτών), έστω  $t$

Για κάθε πολύγωνο NOA, έστω  $z$

Αν το  $z$  έχει χρονοσήμανση  $t$

Για κάθε κελί δάσους που περιέχεται στο πολύγωνο  $z$ , έστω  $c$

Υπολογισμός του πλήθους των σεναρίων που καίνε το  $c$  προς το συνολικό πλήθος των σεναρίων, έστω  $x_c$

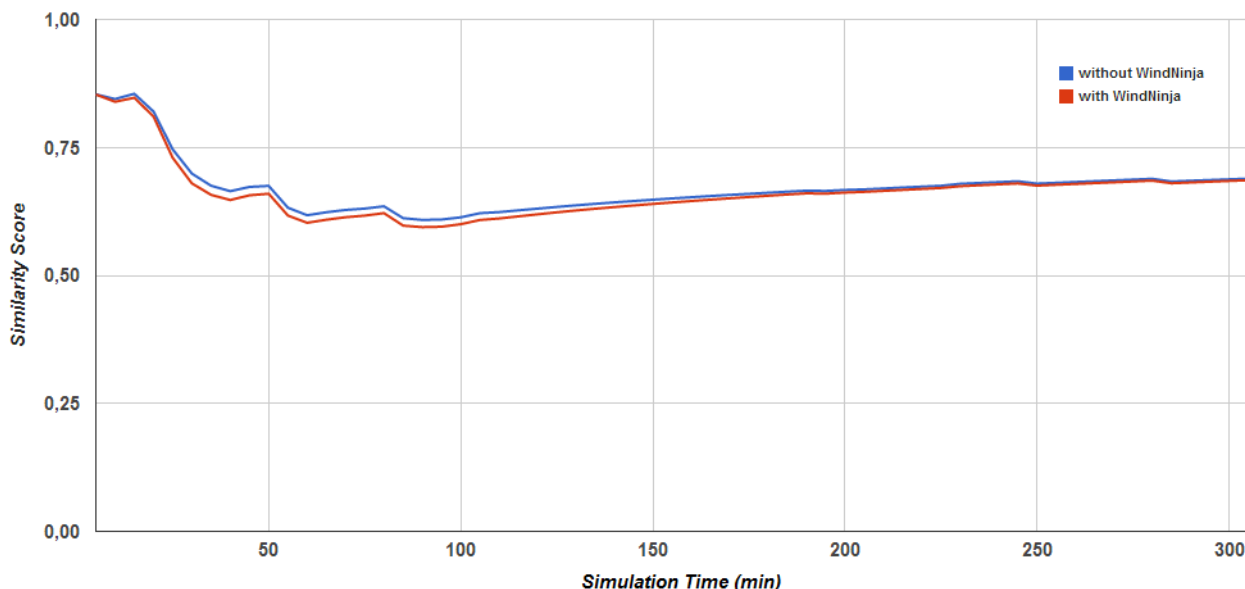
Υπολογισμός του  $\text{Sum}(x_c) / \text{πλήθος κελιών δάσους που περιέχονται στο πολύγωνο } z$ , έστω  $\text{average}(z, t)$

Επιστροφή της τιμής  $\text{average}(z, t)$  του πολυγώνου  $z$  για την χρονική στιγμή  $t$ .

Επιστροφή της τιμής  $\text{Score} = \text{Sum}_z(\text{average}(z, t)) / \text{πλήθος πολυγώνων NOA με χρονοσήμανση } t$

Ακολουθεί στο Σχήμα 5.5 διάγραμμα στο οποίο φαίνονται για όλη την χρονική διάρκεια των προσομοιώσεων οι μέσοι όροι όλων των προσομοιώσεων (και των 10 πυρκαγιών) για την συγκεκριμένη μέθοδο με και χωρίς τη χρήση του WindNinja.

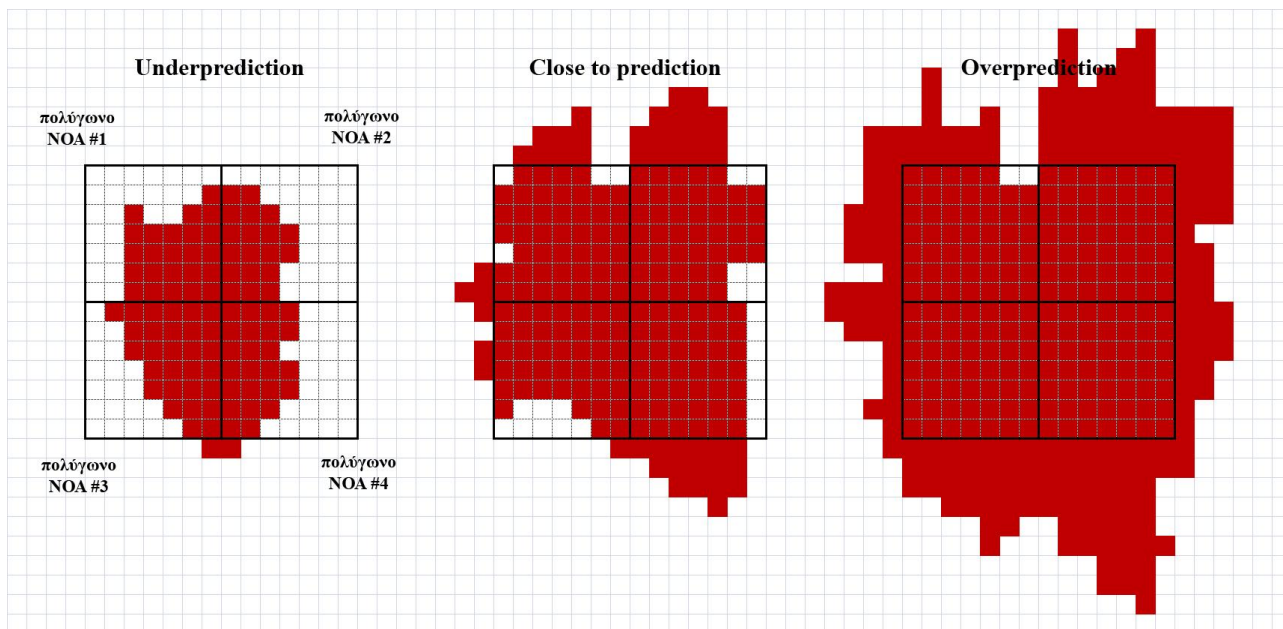
**Σύγκριση ακρίβειας μέσω όρων με τη μέθοδο μέσης πιθανότητας πυρκαγιάς κάθε πολυγώνου NOA**



**Σχήμα 5.5: Γραφική παράσταση με τους μέσους όρους όλων των προσομοιώσεων των 10 δασικών περιοχών για κάθε χρονική στιγμή με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο μέσης πιθανότητας πυρκαγιάς για κάθε πολύγωνο NOA**

Η μέση τιμή της γραφικής παράστασης με χρήση του WindNinja είναι 0.663 (διασπορά 0.055) ενώ χωρίς χρήση του WindNinja είναι 0.672 (διασπορά 0.053).

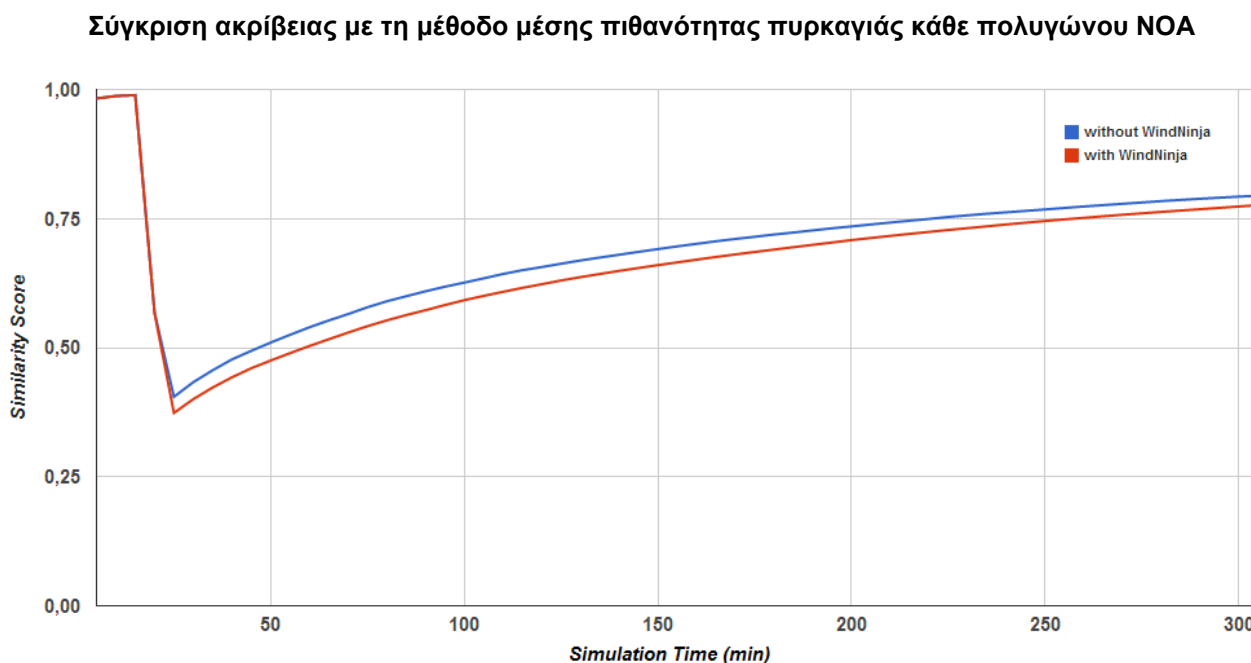
Για την μέθοδο σύγκρισης που φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να πούμε πως υπήρχαν ελάχιστες απώλειες ακρίβειας από τη χρήση του WindNinja. Οι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων με και χωρίς τη χρήση του WindNinja έχουν διαφορά περίπου 1.28% (με μεγαλύτερη τη μέση τιμή των αποτελεσμάτων χωρίς τη χρήση του WindNinja). Το αποτέλεσμα αυτό δε μας εκπλήσσει καθώς η μέθοδος αυτή δεν αποτελεί από μόνη της ασφαλή εκτίμηση για συμπεράσματα εφόσον δεν την απασχολεί το ενδεχόμενο του overprediction, δηλαδή το να είναι η προσομοίωση πιο “επεκτατική” σε σχέση με την πραγματικότητα, ή αλλιώς να έχει δείξει πως έχουν καεί περισσότερα κελιά δάσους, από ότι στην πραγματικότητα. Αυτό συμβαίνει γιατί στο ενδεχόμενο του overprediction τα καμένα κελιά δάσους θα είναι εκτός πολυγώνων NOA, οπότε και δεν θα συνεισφέρουν στο αποτέλεσμα της μεθόδου. Όπως εξηγήσαμε και παραπάνω (παράγραφος 5.2.1.2) η χρήση του WindNinja “καθυστερεί” λίγο το μέτωπο στην εξέλιξή του σε σχέση με τη χρήση ομοιόμορφου ανέμου. Ένα παράδειγμα που βοηθάει στην κατανόηση της μεθόδου φαίνεται στην εικόνα 5.3, όπου η μέθοδος θα επιστρέψει τα καλύτερα αποτελέσματα για την περίπτωση του overprediction.



**Εικόνα 5.3: Παράδειγμα απεικόνιση ίδιας δασικής περιοχής με τέσσερα πολύγωνα NOA και περιπτώσεις υποεκτίμησης, εκτίμησης κοντά στην πραγματικότητα και υπερεκτίμησης της δασικής πυρκαγιάς**

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα της ίδιας δασικής περιοχής με τρεις προσομοιώσεις, δύο σεναρίων. Στο αριστερό μέρος της εικόνας φαίνεται η υποεκτίμηση της δασικής πυρκαγιάς, στο μεσαίο φαίνεται να πλησιάζει η προσομοίωση την πραγματική δασική πυρκαγιά, ενώ στο δεξί μέρος της εικόνας φαίνεται να έχει γίνει υπερεκτίμηση της δασικής πυρκαγιάς από την προσομοίωση. Εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο της μεθόδου βρίσκουμε πως στην πρώτη περίπτωση (underprediction) η τιμή της ακρίβειας είναι 0.489, στην δεύτερη περίπτωση (close to prediction) είναι 0.862, ενώ στην τρίτη περίπτωση (overprediction) είναι 0.989. Οπότε δεν πρέπει να περιμένουμε από αυτή τη μέθοδο να επιβραβεύσει με βεβαιότητα την καλύτερη πρόβλεψη.

Στο σχήμα 5.6 που ακολουθεί φαίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα για αυτή τη μέθοδο σύγκρισης από μία εκτέλεση προσομοίωσης.



**Σχήμα 5.6:** Γραφική παράσταση μιας προσομοίωσης πυρκαγιάς στον FLogA με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο μέσης πιθανότητας πυρκαγιάς κάθε πολυγώνου NOA

### 5.2.2.2 Μέσο κατώφλι πιθανότητας (κάτω από το οποίο τουλάχιστον 50% του NOA πολυγώνου έχει καεί)

Με αυτή τη μέθοδο μετρούμε πόσα σενάρια δασικής πυρκαγιάς πρέπει να “χρησιμοποιήσουμε” κατ’ ελάχιστο για να έχουμε καμένα τουλάχιστον τα μισά κελιά δάσους, από αυτά που περιέχονται στο πολύγωνο NOA, πιστεύοντας πως με αυτό τον τρόπο ίσως να βρίσκαμε κάποια συσχέτιση για το σύννηθες fire risk που προβλέπει ο

FLogA έτσι ώστε να «ανάψει» το αντίστοιχο πολύγωνο NOA. Αρχικά λοιπόν μετρούσαμε το πλήθος των σεναρίων που καίνε το κάθε κελί δάσους που περιέχεται στο πολύγωνο NOA την κάθε χρονική στιγμή. Κατόπιν επαναληπτικά ελέγχαμε αν το σύνολο των κελιών που καίγονται από έστω  $j$  σεσάρια (όπου  $j$  ακέραιος στο διάστημα  $[\#scenarios \text{ down to } 0]$ ) ήταν πάνω από τα μισά στο αντίστοιχο πολύγωνο NOA. Τελικά επιλέγαμε το μεγαλύτερο  $j$  και η τιμή του πολυγώνου NOA για την αντίστοιχη χρονική στιγμή ήταν η πιθανότητα  $j /$  πλήθος σεναρίων.

Παρακάτω περιγράφεται ο αλγόριθμος της μεθόδου.

Για κάθε χρονική στιγμή (5 λεπτών) έστω  $t$

Για κάθε πολύγωνο NOA, έστω  $z$

Αν το  $z$  έχει καεί την χρονική στιγμή  $t$  (δεδομένα NOA)

Για κάθε κελί  $i$  δάσους που περιέχεται στο πολύγωνο NOA  $z$

Υπολογισμός του αριθμού σεναρίων που το καίνε, έστω  $n_i$

Για  $j$  από  $\#Scenarios$  μέχρι 1 (βήμα -1)

Αν ο αριθμός των κελιών που τα καίνε πάνω από  $j$  σεσάρια

είναι μεγαλύτερος από τα μισά κελιά του NOA tile

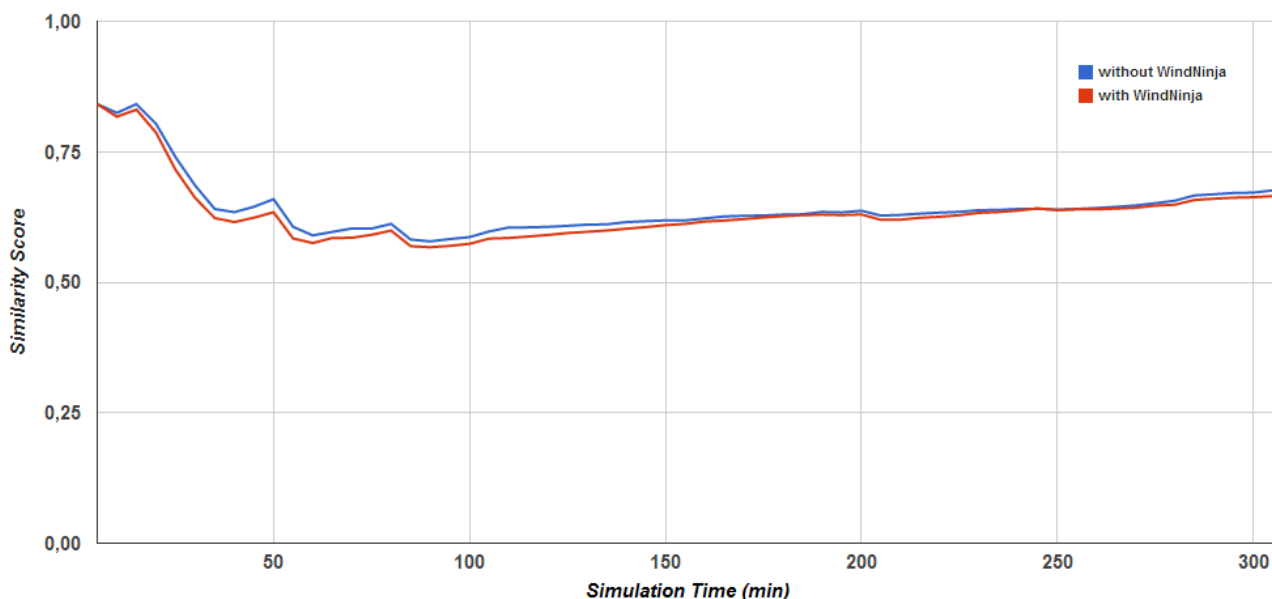
$(\text{SumI}(n_i > j) > 0.5 * \#CellsInside(z))$

Επιστροφή της τιμής πιθανότητας  $P(z,t) = j / \#Scenarios$  για το πολύγωνο NOA  $z$  την χρονική στιγμή  $t$ .

Επιστροφή της τιμής  $\text{Sum}_z(P(z,t)) /$  πλήθος πολυγώνων NOA με χρονοσήμανση  $t$  (δηλαδή καμένα τη χρονική στιγμή  $t$ ).

Ακολουθεί διάγραμμα με τους μέσους όρους ανά χρονική στιγμή για όλες τις προσομοιώσεις, με και χωρίς τη χρήση του WindNinja.

**Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο “μέσο κατώφλι πιθανότητας κάτω από το οποίο τουλάχιστον το 50% του NOA πολυγώνου έχει καεί”**



**Σχήμα 5.7: Γραφική παράσταση με τους μέσους όρους για κάθε χρονική στιγμή όλων των προσομοιώσεων των 10 δασικών περιοχών με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο “μέσο κατώφλι πιθανότητας”**

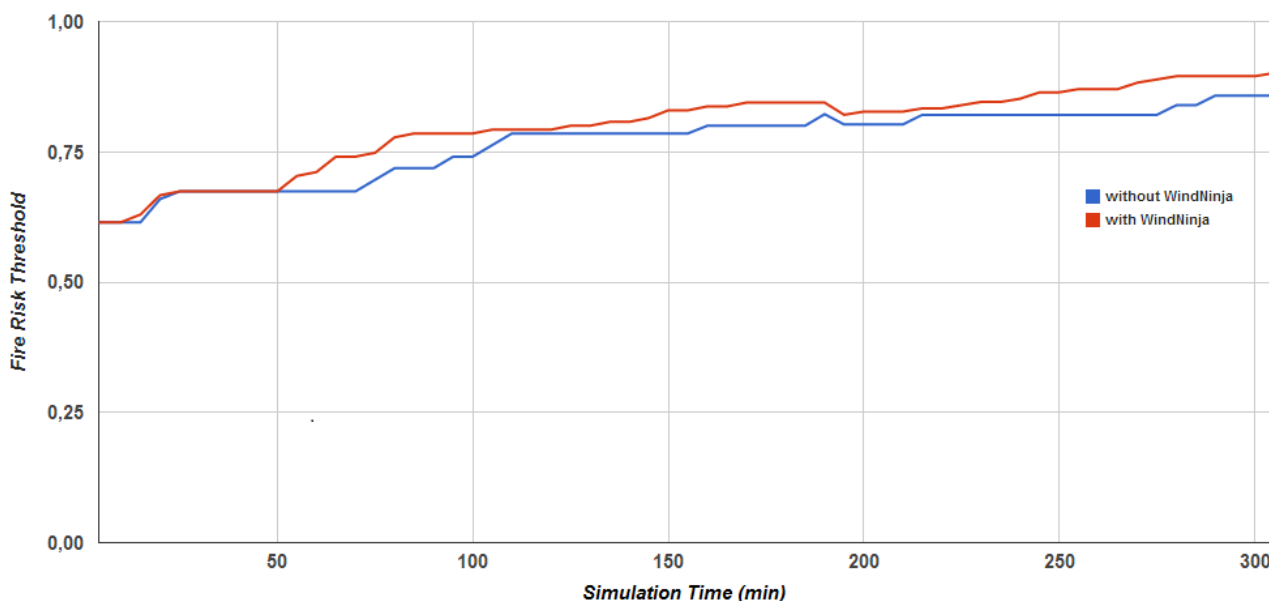
Η μέση τιμή της γραφικής παράστασης με χρήση του WindNinja είναι 0.633 (διασπορά 0.058) ενώ χωρίς χρήση του WindNinja είναι 0.643 (διασπορά 0.057).

Και σε αυτή τη μέθοδο σύγκρισης παρατηρούμε μια χαλάρωση στο κατώφλι της τάξης του 1,6% για τους ίδιους λόγους που εξηγήσαμε και στην παράγραφο 5.2.1.2.

Παρακάτω στο σχήμα 5.8 ακολουθεί ένα παράδειγμα για αυτή τη μέθοδο σύγκρισης από μία εκτέλεση προσομοίωσης, στο οποίο όμως φαίνεται η αντίστροφη εικόνα σε σχέση με τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο παραπάνω διάγραμμα. Αυτό εξηγείται από τις ιδιομορφίες της συγκεκριμένης προσομοίωσης αφού ένα μέρος της περιοχής ανάφλεξης πέφτει στη θάλασσα και επιπλέον η μέση τιμή διεύθυνσης του ανέμου στέλνει το μέτωπο προς τη θάλασσα με αποτέλεσμα αυτό να αναπτύσσεται βραδέως μόνο στα πλάγια. Σε αυτού του τύπου την ανάπτυξη η χρήση του WindNinja δίνει μεγαλύτερη ένταση ανέμου σε σχέση με τον ομοιόμορφο άνεμο κι έτσι χρειάζεται να αυξησει το risk threshold για να "συγκρατήσει" το νοητό μέτωπο που λαμβάνει υπόψη στους υπολογισμούς της η μέθοδος. Η εικόνα 5.4 είναι η οπτικοποίηση της εξόδου του FLogA, όπως αυτή φαίνεται στο Google Earth στο 90ο λεπτό της προσομοίωσης, και παρουσιάζει ακριβώς αυτή τη συμπεριφορά που περιγράψαμε. Αφορά τις προσομοιώσεις (με και χωρίς τη χρήση του WindNinja) που φαίνονται στο διάγραμμα 5.8.



### Σύγκριση ακρίβειας με τη μέθοδο “μέσο κατώφλι πιθανότητας”



Σχήμα 5.8: Γραφική παράσταση του κατωφλίου μιας προσομοίωσης πυρκαγιάς στον FLogA με και χωρίς τη χρήση του WindNinja χρησιμοποιώντας την μέθοδο “μέσο κατώφλι πιθανότητας”



Εικόνα 5.4: Οπτικοποίηση της εξόδου του FLogA στο 90ο λεπτό της προσομοίωσης. Αριστερά είναι η προσομοίωση χωρίς τη χρήση του WindNinja και δεξιά με χρήση του WindNinja

#### 5.2.2.3 Ο λόγος των εξωτερικών/εσωτερικών καμένων κελιών

Αυτή η μέθοδος υπολογίζει για κάθε χρονική στιγμή τον λόγο των καμένων (από οποιοδήποτε σενάριο) κελιών δάσους που δεν περιέχονται σε κανένα πολύγωνο NOA προς τα καμένα κελιά δάσους εντός των πολυγώνων NOA. Έτσι μπορεί να γίνει ορατός ο βαθμός που ο FLogA κάνει overprediction ή underprediction, ειδικά με παράλληλη παρακολούθηση και της μεθόδου της παραγράφου 5.2.2.1.

Ο αλγόριθμος της μεθόδου βρίσκεται παρακάτω.

Για κάθε χρονική στιγμή (5 λεπτών) έστω  $t$

Υπολογισμός των καμένων, από οποιοδήποτε σενάριο, κελιών, έστω  $N_t$ .

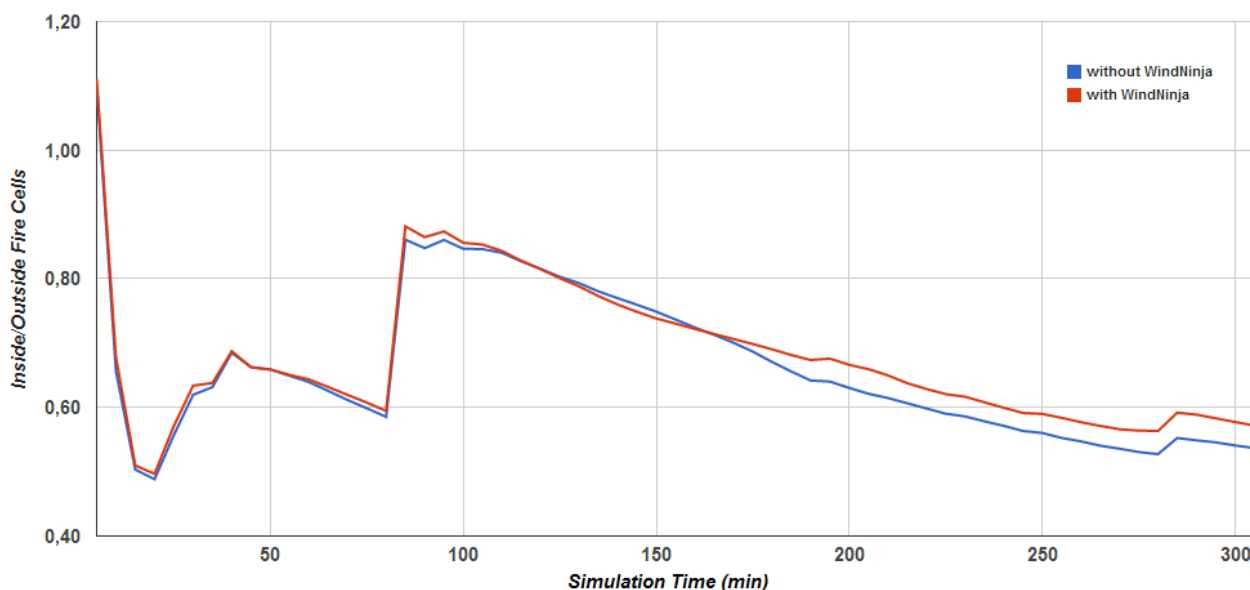
Υπολογισμός των καμένων, από οποιοδήποτε σενάριο, κελιών που ανήκουν σε πολύγωνο NOA, έστω  $I_t$ .

Επιστροφή της τιμής  $O(t) = (N_t - I_t) / I_t$ , για την μέθοδο την χρονική στιγμή  $z$ .

Στον αλγόριθμο θεωρούμε πως  $(N_t - I_t)$  είναι τα εξωτερικά κελιά, αφού αν από όλα τα καμένα κελιά ( $N_t$ ) αφαιρέσουμε τα καμένα κελιά που βρίσκονται μέσα σε κάποιο πολύγωνο NOA ( $I_t$ ) θα έχουμε τα καμένα κελιά εκτός πολυγώνων NOA.

Ακολουθεί διάγραμμα με τους μέσους όρους ανά χρονική στιγμή για όλες τις προσομοιώσεις, με και χωρίς τη χρήση του WindNinja. Σε αυτή την μέθοδο, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή σε μια χρονική στιγμή της προσομοίωσης, τόσο περισσότερα καμένα κελιά βρίσκονται εκτός πολυγώνων NOA, δηλαδή τόσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα. Επειδή στις τιμές του Similarity score συμβαίνει το αντίστροφο (όσο πιο μεγάλες είναι οι τιμές τόσο μικρότερο σφάλμα επιλέξαμε για λόγους συνέπειας με τα υπόλοιπα διαγράμματα να αναπαραστήσουμε τις τιμές  $1/x$  στην συγκεκριμένη μέθοδο.

### Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο “λόγος των εξωτερικών/εσωτερικών καμένων κελιών”



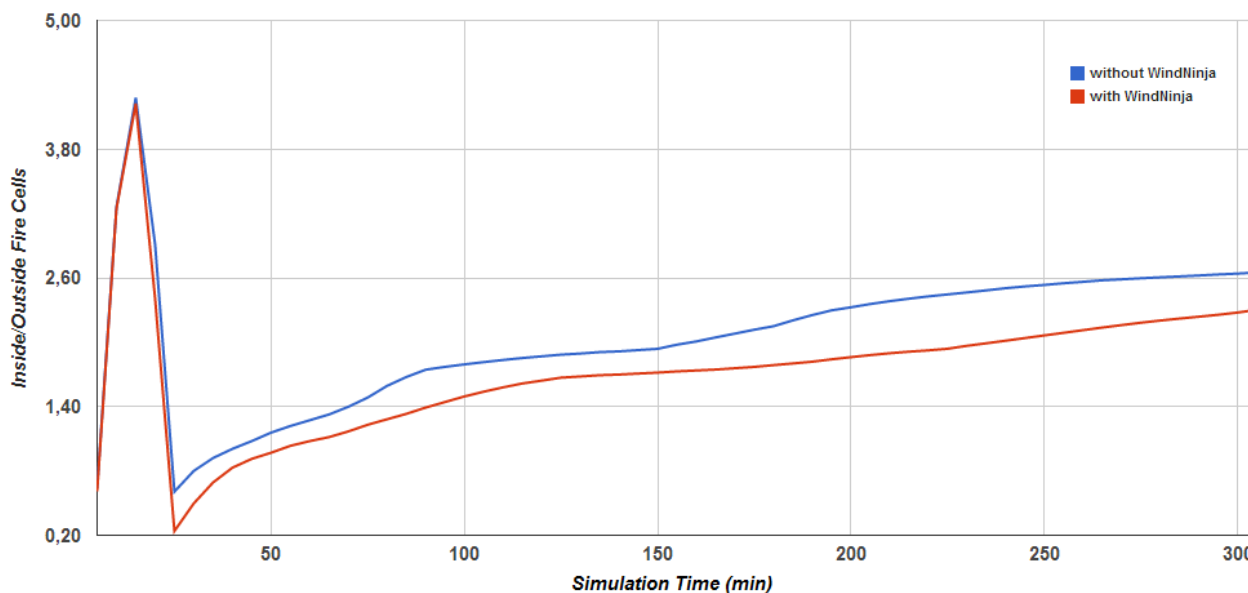
Σχήμα 5.9: Γραφική παράσταση των μέσων όρων όλων των προσομοιώσεων για κάθε χρονική στιγμή με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη μέθοδο “λόγος των εξωτερικών/εσωτερικών καμένων κελιών”

Η μέση τιμή της γραφικής παράστασης με χρήση του WindNinja είναι 0.677 (διασπορά 0.111) ενώ χωρίς χρήση του WindNinja είναι 0.661 (διασπορά 0.119).

Σε αυτή τη μέθοδο σύγκρισης η χρήση του WindNinja δίνει βελτίωση σχεδόν σε όλη τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Σύμφωνα με τη διαφορά στις μέσες τιμές η βελτίωση είναι περίπου 2,5%. Εδώ φαίνεται η βελτίωση στο overprediction κατά τη χρήση του WindNinja. Πιο συγκεκριμένα επειδή η μέθοδος, λόγω της υλοποίησής της, δίνει χαμηλότερη τιμή όταν υπάρχουν πολλά καμένα κελιά δάσους εκτός των πολυγώνων NOA (overprediction), συμπεραίνουμε πως σε αυτή τη μέθοδο παρουσιάζεται βελτίωση στο overprediction κατά τη χρήση του WindNinja.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από μία προσομοίωση. Υπενθυμίζουμε πως λόγω της αναπαράστασης των τιμών της μεθόδου η μεγαλύτερη είναι και η καλύτερη τιμή. Έτσι φαίνεται η βελτίωση που δίνει η χρήση του WindNinja στην προσομοίωση σε όλη τη διάρκεια του περάματος, αλλά κυρίως από την χρονική στιγμή 20 και μέχρι το τέλος.

### Σύγκριση ακρίβειας με τη μέθοδο “λόγος των εξωτερικών/εσωτερικών καμένων κελιών”



Σχήμα 5.10: Γραφική παράσταση μιας προσομοίωσης πυρκαγιάς στον FLogA με και χωρίς τη χρήση του WindNinja χρησιμοποιώντας τη μέθοδο “λόγος των εξωτερικών/εσωτερικών καμένων κελιών”

#### 5.2.2.4 Ο λόγος των μέσων πιθανοτήτων πυρκαγιάς των εξωτερικών/εσωτερικά καμένα κελιά

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήσαμε για τη μέθοδο αυτή δίνεται παρακάτω:

Για κάθε χρονική στιγμή (5 λεπτών) έστω  $t$

Για κάθε σενάριο, έστω  $s$ , μιας προσομοίωσης

Υπολογισμός των καμένων, από το σενάριο  $s$ , κελιών, έστω  $N_{st}$ .

Υπολογισμός των καμένων, από το σενάριο  $s$ , κελιών που ανήκουν σε NOA tile, έστω  $I_{st}$ .

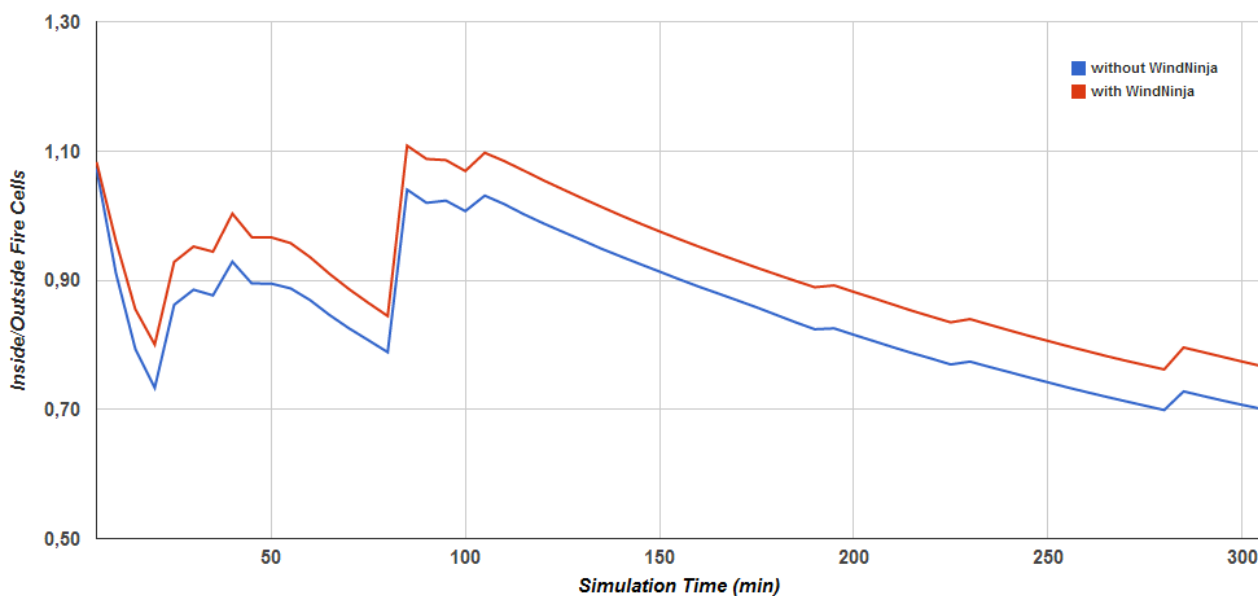
Υπολογισμός της τιμής  $V_{st} = (N_{st} - I_{st}) / I_{st}$

Υπολογισμός της τιμής  $\text{Sum}_s(V_{st}) / \#\text{Scenarios}$ , που είναι η τιμή της μεθόδου για την χρονική στιγμή  $t$ .

Σε αυτή τη μέθοδο υπολογίζουμε πάλι για κάθε χρονική στιγμή τον αριθμό των καμένων κελιών δάσους που δεν περιέχονται σε κανένα πολύγωνο NOA προς τα καμένα κελιά δάσους εντός των πολυγώνων NOA, αλλά για κάθε σενάριο μιας προσομοίωσης χωριστά. Η τιμή της μεθόδου για κάθε χρονική στιγμή προκύπτει από τη μέση τιμή των προηγούμενων λόγων.

Στο διάγραμμα 5.11 που ακολουθεί φαίνονται οι μέσοι όροι ανά χρονική στιγμή για όλες τις προσομοιώσεις, με και χωρίς τη χρήση του WindNinja όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Και εδώ για λόγους συνέπειας με τα υπόλοιπα διαγράμματα έχουμε επιλέξει την αναπαράσταση των τιμών  $1/x$  όπως και στο διάγραμμα της προηγούμενης μεθόδου.

### Σύγκριση ακρίβειας μέσων όρων με τη μέθοδο “λόγος των μέσων πιθανοτήτων πυρκαγιάς των εξωτερικών/εσωτερικά καμένα κελιά”

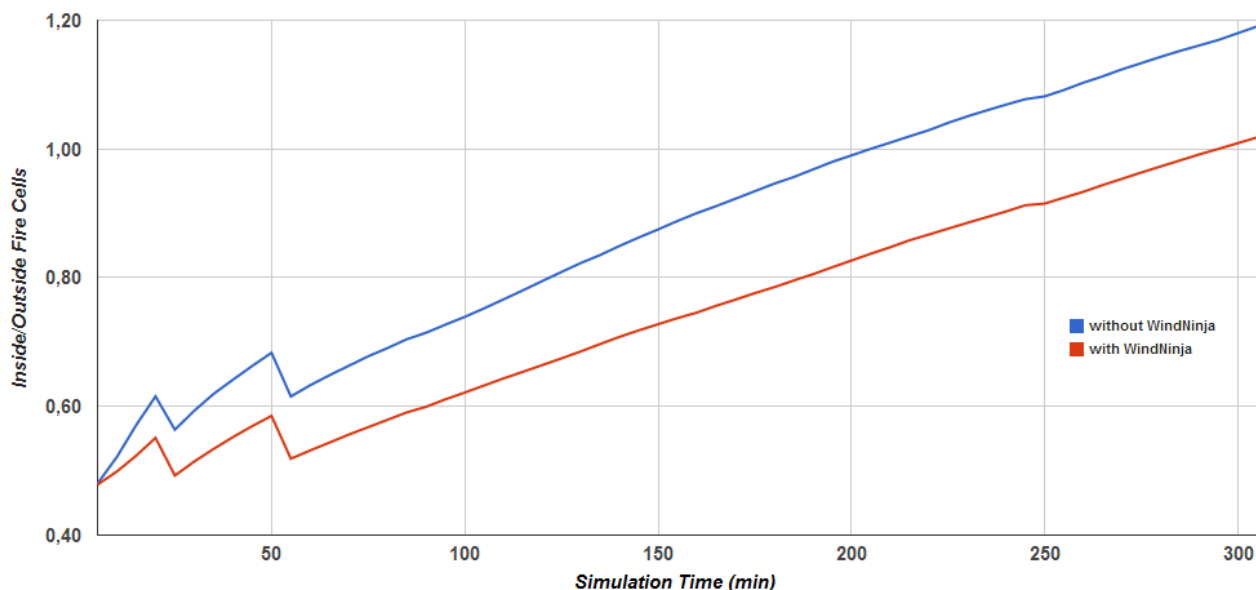


Σχήμα 5.11: Γραφική παράσταση των μέσων όρων όλων των προσομοιώσεων για κάθε χρονική στιγμή με και χωρίς τη χρήση του WindNinja με τη Μέθοδο “λόγος των μέσων πιθανοτήτων πυρκαγιάς των εξωτερικών/εσωτερικά καμένα κελιά”

Και σε αυτή τη μέθοδο η χρήση του WindNinja δίνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα από αυτά χωρίς τη χρήση του WindNinja. Η βελτίωση ξεπερνά το 7%, στις μέσες τιμές και κάνει πάλι φανερό το πλεονέκτημα που έχει στη βελτίωση του overprediction.

Από το διάγραμμα 5.12 που ακολουθεί, και που είναι αντιπροσωπευτικό των προσομοιώσεων για αυτή την μέθοδο, φαίνεται η βελτίωση που δίνει η χρήση του WindNinja. Και εδώ ισχύει πως καλύτερη είναι η μεγαλύτερη τιμή.

### Σύγκριση ακρίβειας με τη μέθοδο “λόγος των μέσων πιθανοτήτων πυρκαγιάς των εξωτερικών/εσωτερικά καμένα κελιά”



Σχήμα 5.12: Γραφική παράσταση μιας προσομοίωσης πυρκαγιάς στον FLogA με και χωρίς τη χρήση του WindNinja για την μέθοδο “λόγος των μέσων πιθανοτήτων πυρκαγιάς των εξωτερικών/εσωτερικά καμένα κελιά”

### 5.3 Συμπέρασμα

Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε πως με βάση τα αποτελέσματα από τις συνολικά 6 μεθόδους σύγκρισης που χρησιμοποιήσαμε στις προσομοιώσεις από τις 10 δασικές πυρκαγιές του καλοκαιριού του 2012 η χρήση του WindNinja έδωσε ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα. Αυτό βέβαια έχει ένα σημαντικό επιπλέον κόστος στον χρόνο εκτέλεσης των προσομοιώσεων. Στις προσομοιώσεις που τρέξαμε (27 σενάρια πυρκαγιάς για κάθε προσομοίωση) η μέση χρονική επιβάρυνση του WindNinja ήταν 25 λεπτά. Η μέση χρονική διάρκεια εκτέλεσης των προσομοιώσεων με χρήση του WindNinja ήταν 30.4 λεπτά (με τυπική απόκλιση 19.9 λεπτά), ενώ η μέση χρονική διάρκεια εκτέλεσης των προσομοιώσεων χωρίς χρήση του WindNinja ήταν 5.4 λεπτά (με τυπική απόκλιση 3.6 λεπτά). Το γεγονός αυτό ίσως δυσκολεύει τη χρήση του WindNinja σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, παρόλα αυτά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για a posteriori προσομοιώσεις.

Το επόμενο κεφάλαιο συνοψίζει τα αποτελέσματα της εργασίας και παρουσιάζει κάποιες κατευθυντήριες γραμμές για μελλοντικές βελτιώσεις.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Προσθέσαμε στον FLogA [1], μια εφαρμογή ιστού (web-application) που χρησιμεύει στην προσομοίωση και την οπτικοποίηση της εξάπλωσης μιας δασικής πυρκαγιάς, την δυνατότητα χρήσης χωρικά μεταβαλλόμενων πεδίων ροής ανέμου. Αυτό πραγματοποιήθηκε με την ενσωμάτωση του εργαλείου WindNinja [2], ενός ανεξάρτητου και δημόσια διαθέσιμου προγράμματος που υπολογίζει χωρικά μεταβαλλόμενα πεδία ροής ανέμου. Εκμεταλλευτήκαμε και τις δύο δυνατότητες που δίνει ο WindNinja για αρχικές τιμές ανέμου. Η μια είναι η δυνατότητα βάσει αρχικών τιμών (για την ένταση και την διεύθυνση του ανέμου) να δημιουργηθεί ένα πλέγμα τιμών έντασης και διεύθυνσης, ώστε να χρησιμοποιηθεί μετά σαν είσοδος στον FLogA. Η δεύτερη δυνατότητα είναι η χρήση τιμών από μετεωρολογικούς σταθμούς (στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν τιμές από δεδομένα του Αστεροσκοπείου Αθηνών) βάσει των οποίων γίνεται η παραγωγή των υπολοίπων τιμών του πλέγματος που θα χρησιμοποιηθεί σαν είσοδος στο FLogA.

Με πειράματα που εκτελέσαμε με βάση πραγματικά δεδομένα από δασικές πυρκαγιές το καλοκαίρι 2012 στην Ελλάδα, διαπιστώσαμε πως η χρήση του WindNinja βελτιώνει ελαφρώς την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης που πραγματοποιεί ο FLogA. Η βελτίωση που παρατηρείται εξαρτάται και από την μέθοδο μέτρησης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 6 διαφορετικές μέθοδοι μέτρησης της ακρίβειας που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της εργασίας.

Η ενσωμάτωση όμως του WindNinja στον FLogA έχει σημαντική επίπτωση στον χρόνο εκτέλεσης των πειραμάτων προσομοίωσης. Αν και οι χρόνοι εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τα δεδομένα της εκάστοτε προσομοίωσης, όπως για παράδειγμα το μέγεθος της δασικής περιοχής, την ανάλυση και το μέγεθος του κελιού, την τιμή ανέμου κλπ, σε κάθε περίπτωση η προσομοίωση με τα ίδια αρχικά δεδομένα χρειάζεται περισσότερο χρόνο για να ολοκληρωθεί σε σχέση με τον χρόνο της προσομοίωσης χωρίς την χρήση του WindNinja. Ο χρόνος αυξάνεται όταν χρησιμοποιούμε μετεωρολογικά δεδομένα που μεταβάλλονται χωρικά στη δασική περιοχή, λόγω του τρόπου υλοποίησης του WindNinja (επαναληπτική διαδικασία), όπως ήδη έχουμε αναφέρει στο κεφάλαιο 5.

Παρά τη χρονική επιβάρυνση λόγω της χρήσης του WindNinja είναι τελικά θετικό το γεγονός πως υπήρξε ελαφρά βελτίωση στα αποτελέσματα της προσομοίωσης του FLogA με τη συνδυασμένη χρήση του WindNinja. Είναι μια ένδειξη πως το εργαλείο πρόβλεψης καθώς και τα δεδομένα στα οποία στηρίζει τις προβλέψεις του (μετεωρολογικά και τοπογραφικά) κινούνται στην σωστή κατεύθυνση. Οι βελτιώσεις δε φαίνεται να είναι

δραματικές, ωστόσο πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι τα δορυφορικά δεδομένα του Αστεροσκοπείου από τις πυρκαγιές του 2012 είναι χαμηλής ανάλυσης και ίσως να μην επιτρέπουν να φανούν με λεπτομέρεια τα οφέλη μιας βελτιωμένης πρόβλεψης.

Τέλος είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να σημειώσουμε πως η βελτίωση έγινε με ένα εργαλείο ανοικτού κώδικα ελεύθερα διαθέσιμου.

## **6.1 Μελλοντικές βελτιώσεις και επεκτάσεις**

Τρία σημεία που θα μπορούσε να υπάρχει βελτίωση στην ενσωμάτωση του WindNinja στο FLogA είναι τα ακόλουθα:

1. Καλύτερη ενσωμάτωση σε επίπεδο διεπαφής χρήστη.
2. Νέοι τρόποι σύγκρισης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των αρχικών δεδομένων.
3. Καλύτερη αναπαράσταση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του πεδίου ροής ανέμου
4. Εισαγωγή δεδομένων καιρού σε πραγματικό χρόνο.

### **6.1.1 Ενοποίηση FLogA και WindNinja σε επίπεδο διεπαφής χρήστη**

Ο τρόπος με τον οποίο είναι υλοποιημένος ο FLogA (δηλαδή σαν μια εφαρμογή ιστού) δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα πολύ εύκολα να καθορίσει την είσοδο που χρειάζεται ο FLogA για να πραγματοποιήσει την προσομοίωση. Η πληροφορία όμως που χρειάζεται ο WindNinja για να εκτελεστεί δεν μπορεί να δοθεί από το χρήστη μέσα από μια διεπαφή. Στα πειράματα που πραγματοποιήσαμε “καλούσαμε” το WindNinja μόνο μέσα από κονσόλα, έχοντας δημιουργήσει από πριν κατάλληλο αρχείο με της απαραίτητες παραμέτρους εκτέλεσής του, όπως περιγράφουμε στο κεφάλαιο 3. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η ομάδα που αναπτύσσει το WindNinja έχει υλοποιήσει τρόπο κλήσης του WindNinja μέσα από οπτική διεπαφή χρήστη (user interface). Εμείς δεν χρησιμοποιήσαμε αυτή τη δυνατότητα γιατί όπως έχουμε αναφέρει πάλι στο κεφάλαιο 3, θέλαμε να ενσωματώσουμε τον WindNinja στο FLogA, καλώντας τον πριν την κλήση του FLogA (σειριακή εκτέλεση) και επομένως εκμεταλλευτήκαμε την δυνατότητα που δίνει ο WindNinja για κλήση από κονσόλα. Θα ήταν χρήσιμο όμως στη διεπαφή που έχει υλοποιηθεί για την εισαγωγή των απαραίτητων δεδομένων στο FLogA να δίνουμε και τη



δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει κατά βούληση της απαραίτητες πληροφορίες εσόδου για το WindNinja.

### **6.1.2 Νέες μέθοδοι σύγκρισης της ακρίβειας των αποτελεσμάτων**

Για τον υπολογισμό της ακρίβειας κατά τις συγκρίσεις των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων (με και χωρίς τη χρήση του WindNinja) και των πραγματικών δεδομένων που δόθηκαν από το Αστεροσκοπείο Αθηνών χρησιμοποιήσαμε όπως αναφέρουμε στο κεφάλαιο 5, κάποιες μεθόδους σύγκρισης. Κάποιες μέθοδοι από αυτές προϋπήρχαν της ενσωμάτωσης του WindNinja στο FLogA, ενώ κάποιες άλλες υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Μερικές από αυτές τις μεθόδους είναι αυστηρές για τον FLogA, ενώ κάποιες άλλες λιγότερο, παρόλα αυτά θα ήταν χρήσιμο να ερευνηθούν και άλλοι τρόποι σύγκρισης των αποτελεσμάτων που θα παρείχαν νέους τρόπους συσχέτισης των δεδομένων και των αποτελεσμάτων και αξιολόγησης των τελευταίων. Τέτοιες μέθοδοι θα μπορούσαν να βρεθούν αξιοποιώντας τεχνικές από το πεδίο της επεξεργασίας εικόνας σε συνεργασία με πιθανή βελτίωση των δεδομένων του Αστεροσκοπείου (παροχή δεδομένων μεγαλύτερης ανάλυσης, δηλαδή μικρότερων πολυγώνων των τωρινών). Ένα παράδειγμα θα μπορούσε να είναι η αντιπαραβολή των χαρτών προεξοχής (saliency map) όπως αυτοί προκύπτουν από τα αποτελέσματα του FLogA και τα δεδομένα του Αστεροσκοπείου με κάποια προ-επεξεργασία.

### **6.1.3 Βελτίωση αναπαράστασης αποτελεσμάτων της προσομοίωσης πεδίου ανέμου**

Για την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του πεδίου έντασης και διεύθυνσης του ανέμου έχουν δημιουργηθεί κάποια διαγράμματα, όπως αναφέρουμε στα κεφάλαια 3 και 4. Ακόμα έχει αναπτυχθεί υλικό που αναπαριστά τα δεδομένα με την μορφή βέλων με χρήση του *Google Earth*, όπως περιγράφουμε στο κεφάλαιο 3. Παρόλα αυτά, επειδή ο FLogA αναπαριστά τα δεδομένα και με τη μορφή κινουμένου σχεδίου (animation) θα ήταν χρήσιμη και μια πιο δυναμική αναπαράσταση του πεδίου του ανέμου ώστε να ταιριάζει καλύτερα στη συνολική απεικόνιση του FLogA.

### **6.1.4 Εισαγωγή δεδομένων καιρού σε πραγματικό χρόνο**

Επειδή ο FLogA δίνει την δυνατότητα για την παρακολούθηση μιας περιοχής ενδιαφέροντος και εκκινεί αυτόματα προσομοιώσεις για κάθε εστία δασικής πυρκαγιάς που

ανιχνεύεται από δορυφορικές υπηρεσίες, εκτελώντας αυτόματα όλα τα βήματα της διαδικασίας που απαιτούνται (δημιουργία χωρικών αρχείων εισόδου, εκτέλεση πολλαπλών σεναρίων προσομοίωσης και δημιουργία γεωγραφικών οπτικοποιήσεων) χωρίς να χρειάζεται καμία απολύτως παρέμβαση από το χρήστη, θα ήταν χρήσιμο και ο WindNinja να μπορεί να δεχτεί καιρικά δεδομένα ώστε να λειτουργεί και αυτός αυτόνομα. Βέβαια ανασταλτικός παράγοντας μιας τέτοιας υλοποίησης είναι η χρονική καθυστέρηση που εισάγει ο WindNinja στην πραγματοποίηση της προσομοίωσης, ειδικά όταν δέχεται σαν είσοδο δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς και όχι αρχικές τιμές (περισσότερα στο κεφάλαιο 5). Θεωρούμε πως είναι αρκετά πιθανό να βρεθεί μια λύση για να μειωθεί ο χρόνος εκτέλεσης ίσως μέσα από επιμερισμό του εδάφους και εκτελέσεις ανεξάρτητων προσομοιώσεων.

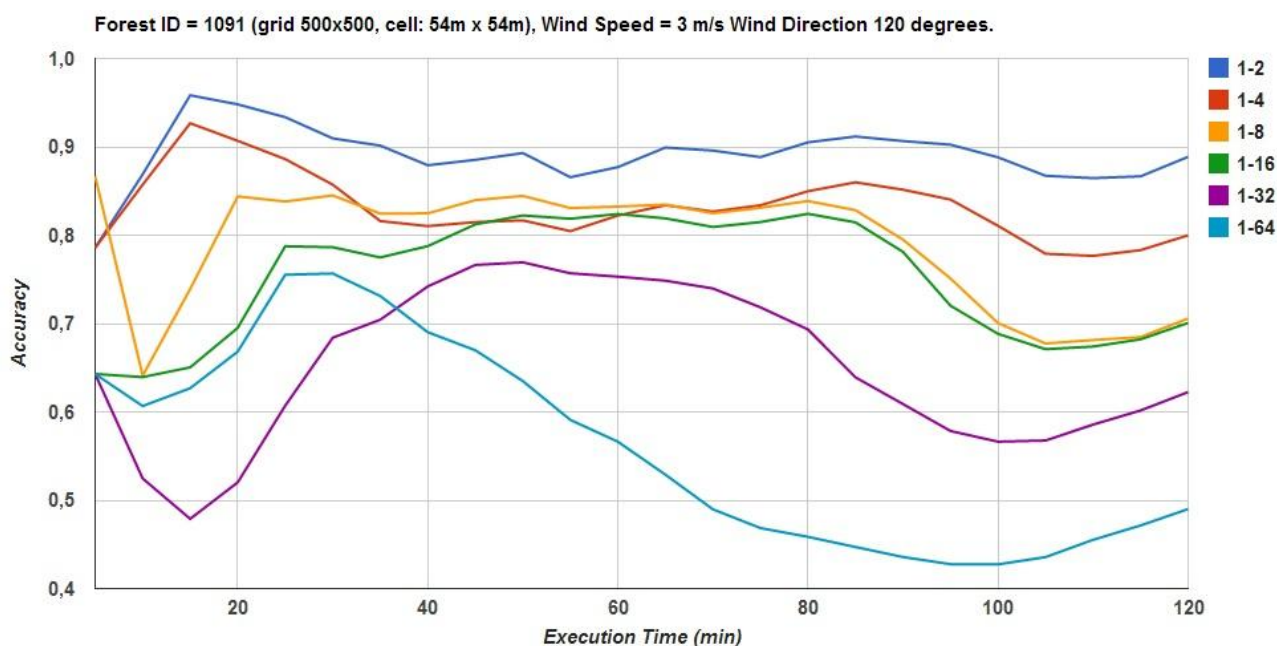
## 6.2 Εν τέλει

Ύστερα από τις δοκιμές και τα πειράματα που εκτελέσαμε πάνω σε τεχνητά, αλλά και πραγματικά δεδομένα μπορούμε να πούμε πως σαν υποδομή η ενσωμάτωση του WindNinja στο εργαλείο προσομοίωσης πυρκαγιών FLogA έχει ολοκληρωθεί και δοκιμαστεί με επιτυχία. Μετά και από τα αποτελέσματα που πραγματοποιήθηκαν στα πραγματικά δεδομένα από τις φωτιές το καλοκαίρι του 2012 στον Ελλαδικό χώρο μπορούμε να πούμε πως η ενσωμάτωση είχε και θετική επιρροή, αφού έδωσε μια, έστω και μικρή, βελτίωση στα αναμενόμενα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Σίγουρα σε πολλούς τομείς υπάρχουν βελτιώσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν, αλλά η εργασία αυτή παρέχει μια στερεή βάση που μπορεί να αξιοποιηθεί και να επεκταθεί από τους ερευνητές.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

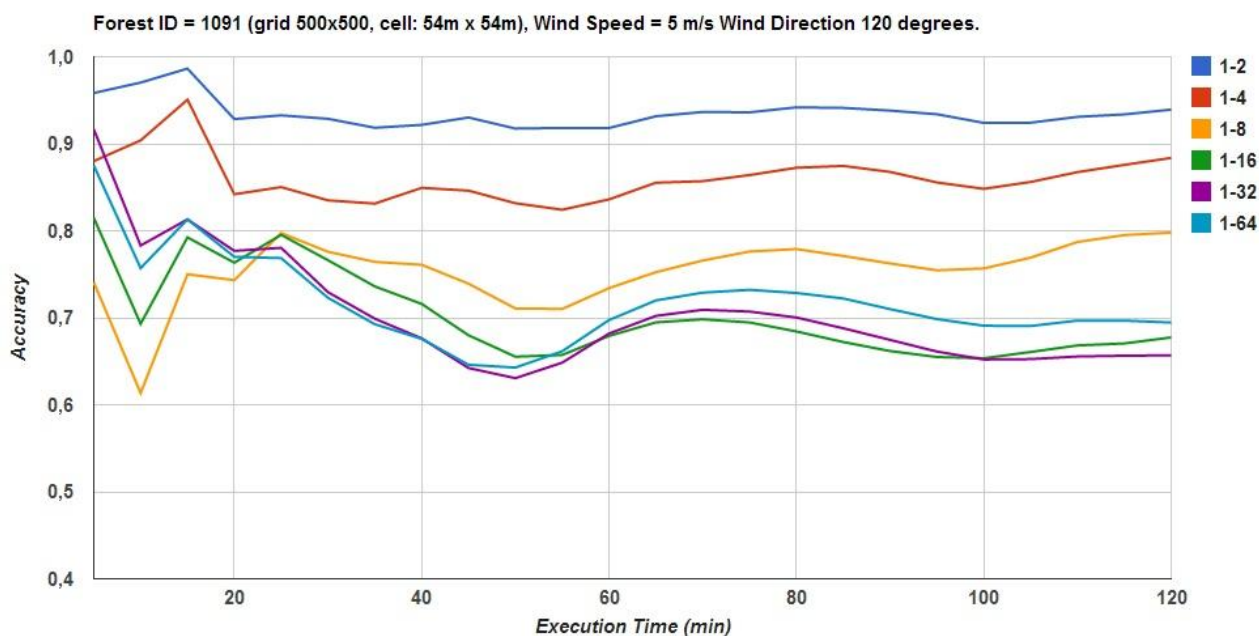
Ακολουθούν τα διαγράμματα και οι σχετικοί πίνακες που παρήχθησαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν οργανωμένοι κατά δάσος.

Οι ακόλουθες τρεις εικόνες αναφέρονται στο δάσος ανάλυσης 500x500 κελιών, μεγέθους 54m x 54m (ID 1091) για τιμές έντασης ανέμου 3m/s, 5m/s και 7m/s.



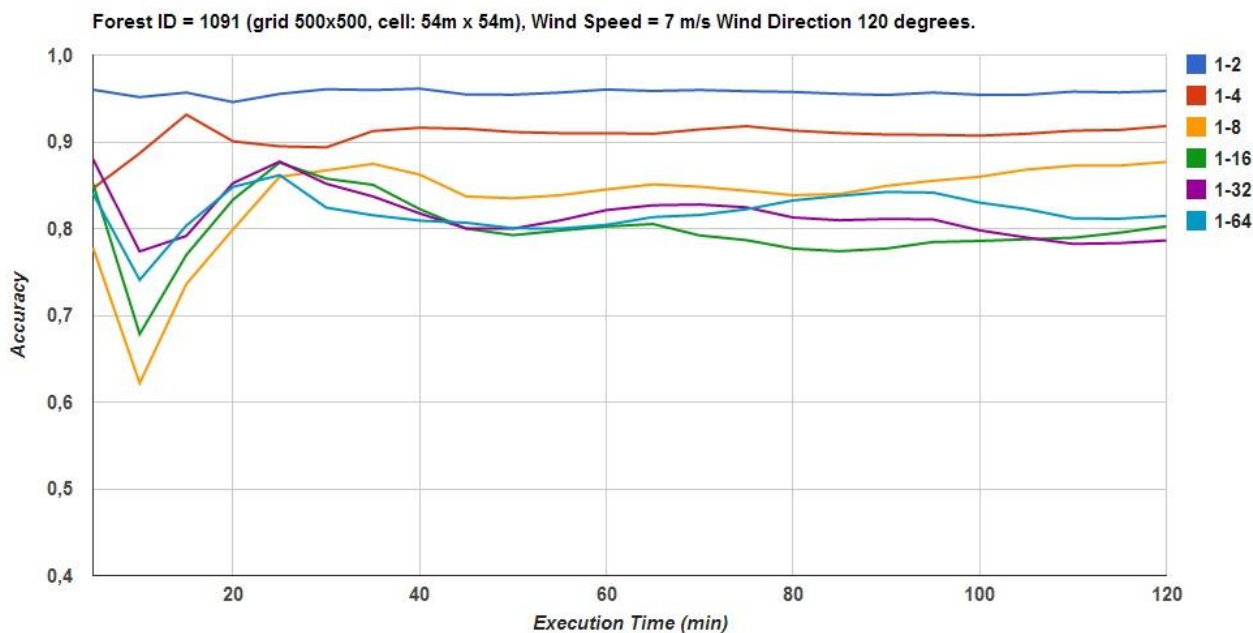
Sid	mesh - cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2730	1-1	80.57	10.03	0.07	9.15	2.91	1.000	0.0000
2731	1-2	19.80	9.48	0.16	7.87	2.91	0.8912	0.0327
2732	1-4	4.87	9.80	0.43	6.71	2.92	0.8312	0.0378
2733	1-8	1.36	10.17	1.04	5.47	2.93	0.7884	0.0680
2734	1-16	0.53	9.91	1.75	4.60	2.83	0.7517	0.0669
2735	1-32	0.33	10.30	2.16	3.82	2.92	0.6508	0.0862
2736	1-64	0.26	11.84	2.62	3.36	2.94	0.5614	0.1107

Εικόνα Ι.1: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s



Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2751	1-1	80.27	14.75	0.12	15.25	4.85	1.000	0.0000
2752	1-2	19.43	15.38	0.26	13.11	4.85	0.9350	0.0161
2753	1-4	4.89	15.79	0.71	11.20	4.87	0.8607	0.0265
2754	1-8	1.34	16.74	1.71	9.15	4.88	0.7545	0.0374
2755	1-16	0.53	18.52	2.91	7.72	4.72	0.7016	0.0483
2756	1-32	0.32	18.80	3.58	6.40	4.87	0.7039	0.0658
2757	1-64	0.26	17.94	4.34	5.62	4.90	0.7180	0.0505

**Εικόνα I.2: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s**

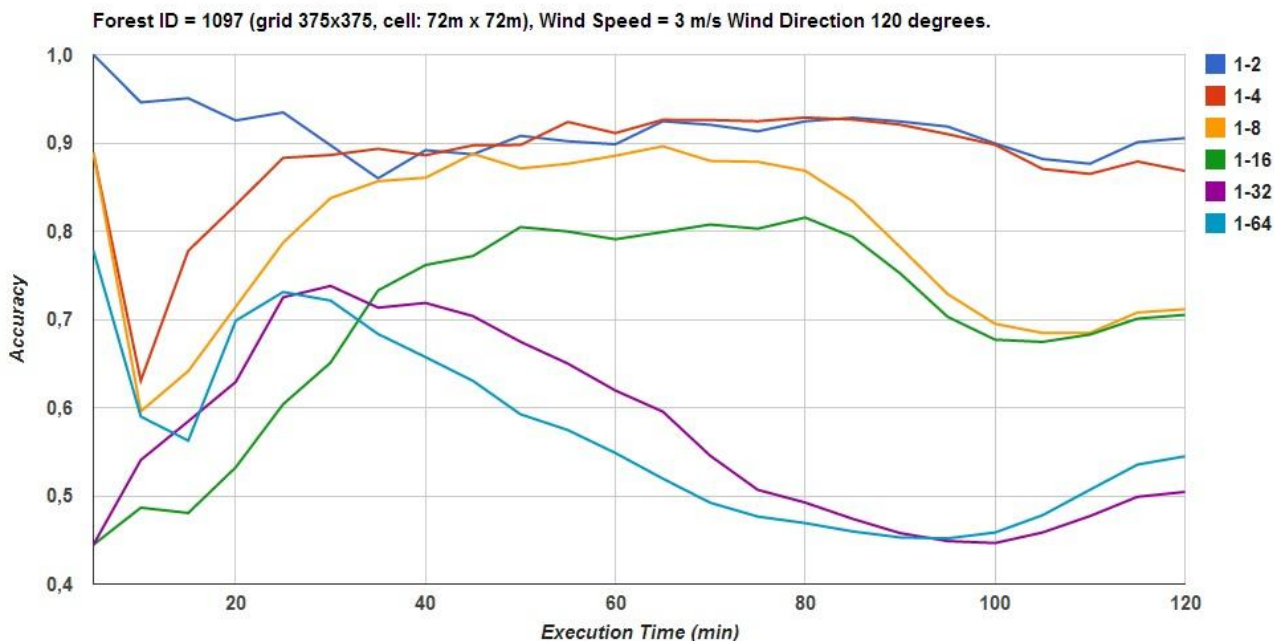


Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2772	1-1	80.30	16.56	0.17	21.35	6.79	1.000	0.0000
2773	1-2	19.61	16.93	0.36	18.36	6.79	0.9566	0.0034
2774	1-4	4.85	17.10	0.99	15.68	6.81	0.9070	0.0154
2775	1-8	1.35	17.56	2.40	12.82	6.84	0.8345	0.0545
2776	1-16	0.53	18.90	4.07	10.82	6.61	0.7995	0.0379
2777	1-32	0.32	18.92	5.00	8.99	6.81	0.8155	0.0277
2778	1-64	0.26	17.98	6.06	7.89	6.86	0.8187	0.0229

**Εικόνα I.3: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s**

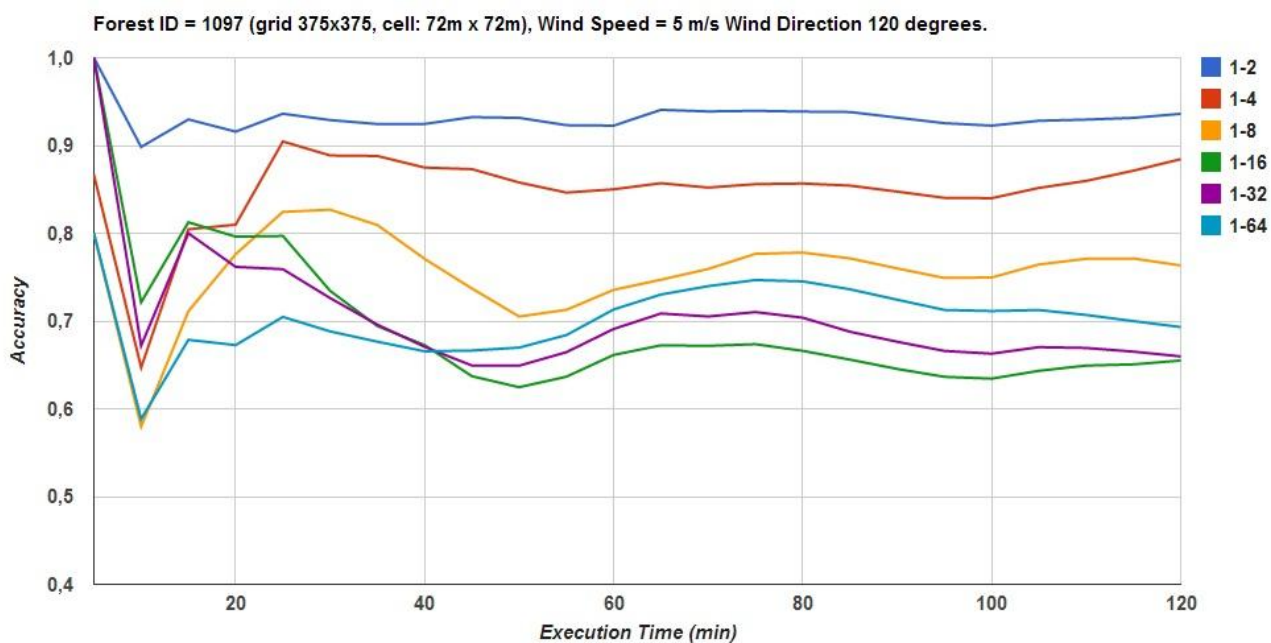
Παρατηρούμε πως η ακρίβεια είναι μεγαλύτερη όσο πιο κοντά είναι το μέγεθος του κελιού του δάσους και το μέγεθος του κελιού πλέγματος του ανέμου ανεξαρτήτως ανέμου. Αυτό βέβαια σε κάποιες εκτελέσεις δεν ισχύει είτε από την αρχή του πειράματος είτε αργότερα κατά την εξέλιξη του. Ένα παράδειγμα είναι στην Εικόνα I.1 μέχρι τη χρονική στιγμή 40 min που η ακρίβεια στην εκτέλεση του πειράματος της σχέσης μεγέθους κελιού δάσους και πλέγματος ανέμου 1-32 (μωβ γραμμή) είναι μικρότερη των τιμών ακρίβειας της σχέσης 1-64. Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 4.1 αυτό φαίνεται να είναι τυχαίο αλλά στα πλαίσια της εργασίας δεν έγιναν περαιτέρω πειράματα για να επιβεβαιωθεί ο ισχυρισμός.

Οι παρακάτω τρεις εικόνες αναφέρονται στο δάσος ανάλυσης 375x375 κελιών, μεγέθους 72m x 72m (ID 1097) για τιμές έντασης ανέμου 3m/s, 5m/s και 7m/s.



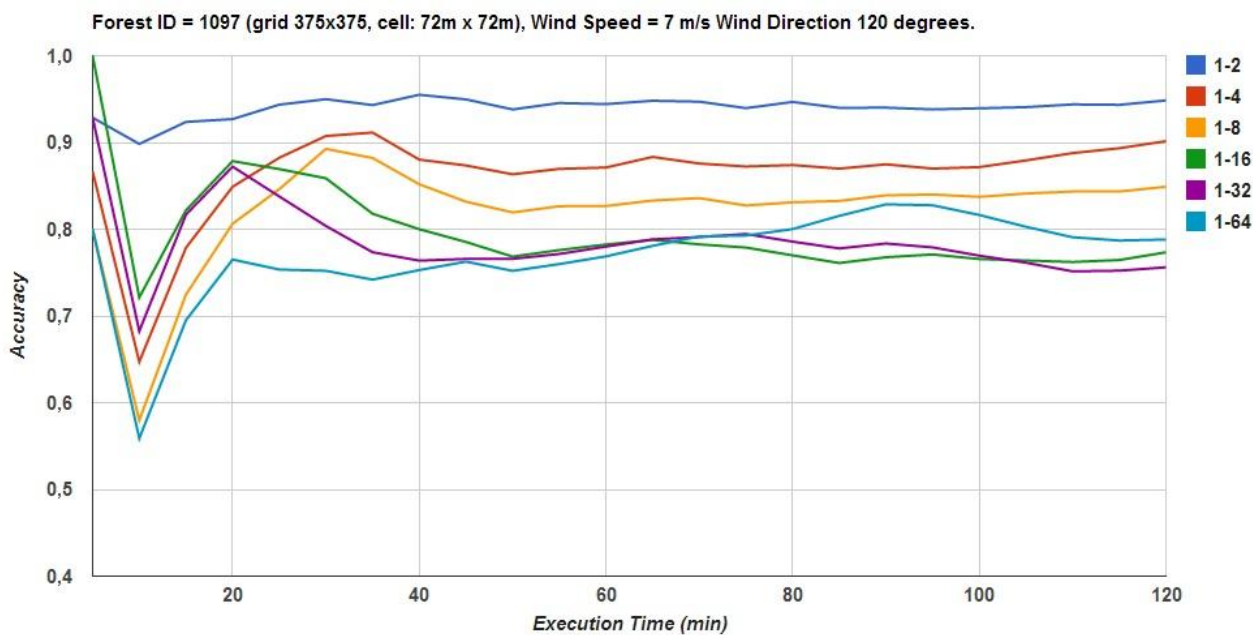
Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2737	1-1	44.75	5.27	0.10	8.60	2.91	1.000	0.0000
2738	1-2	10.74	5.32	0.26	7.39	2.91	0.9133	0.0279
2739	1-4	2.66	5.36	0.63	6.17	2.93	0.8811	0.0623
2740	1-8	0.75	5.58	1.45	5.00	2.88	0.7938	0.0919
2741	1-16	0.57	5.44	1.94	4.27	2.84	0.6988	0.1111
2742	1-32	0.19	6.06	2.27	3.69	2.95	0.5685	0.1013
2743	1-64	0.15	5.94	2.74	3.20	2.96	0.5671	0.0975

**Εικόνα Ι.4: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s**



Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2758	1-1	44.63	7.13	0.17	14.33	4.85	1.000	0.0000
2759	1-2	10.70	7.29	0.44	12.32	4.85	0.9320	0.0168
2760	1-4	2.66	7.35	1.05	10.30	4.89	0.8492	0.0476
2761	1-8	0.75	8.28	2.40	8.39	4.80	0.7562	0.0480
2762	1-16	0.30	8.52	3.21	7.17	4.73	0.6934	0.0829
2763	1-32	0.19	8.43	3.75	6.19	4.92	0.7052	0.0718
2764	1-64	0.15	7.87	4.55	5.34	4.92	0.7027	0.0393

**Εικόνα I.5: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s**



Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2779	1-1	44.60	7.66	0.24	20.07	6.79	1.000	0.0000
2780	1-2	10.73	7.73	0.61	17.24	6.79	0.9401	0.0113
2781	1-4	2.65	7.78	1.47	14.43	6.84	0.8647	0.0514
2782	1-8	0.75	8.14	3.36	11.75	6.72	0.8225	0.0586
2783	1-16	0.31	8.59	4.48	10.06	6.62	0.7970	0.0557
2784	1-32	0.19	8.16	5.23	8.70	6.88	0.7855	0.0449
2785	1-64	0.15	7.87	6.36	7.49	6.89	0.7702	0.0534

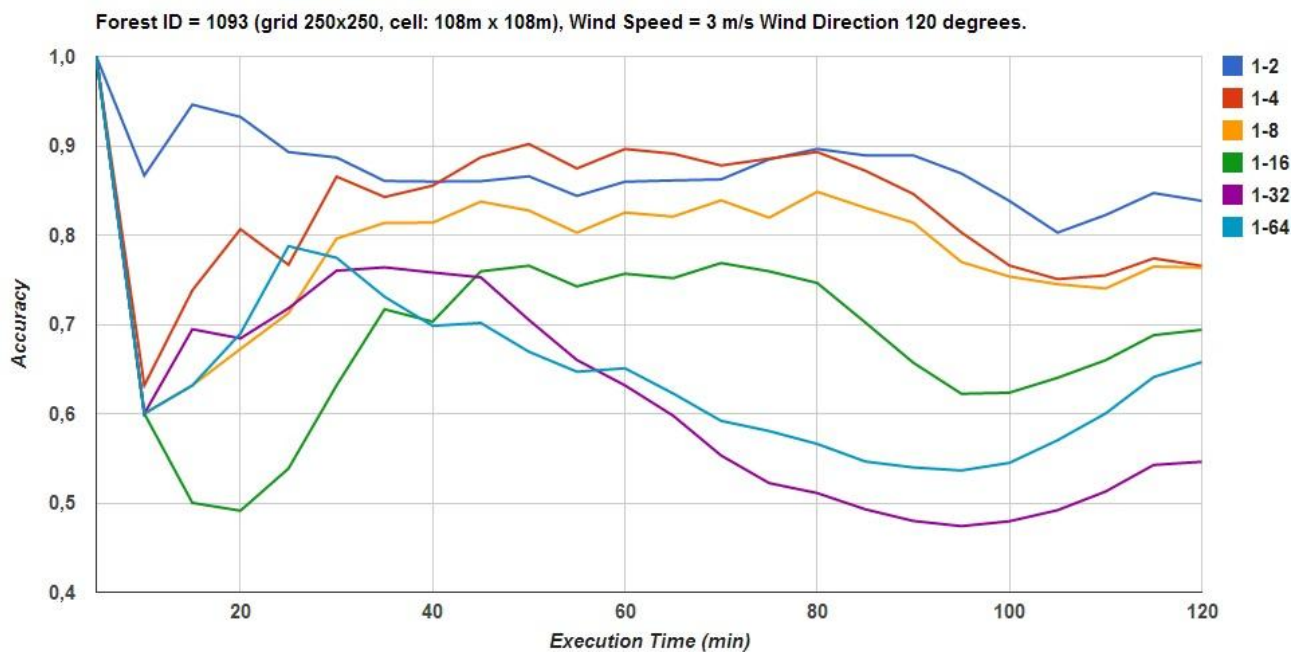
**Εικόνα 1.6: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s**

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 4, ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση που έχει η διαφοροποίηση της έντασης του ανέμου, κάτι που φαίνεται στις εικόνες 1.4, 1.5 και 1.6. Και οι τρεις εικόνες παρουσιάζουν το ίδιο δάσος (ID=1097), ανάλυσης πλέγματος 375x375 και μέγεθος κελιού 72m x 72m, αλλά με διαφορετικές τιμές ταχύτητας ανέμου (3m/s, 5m/s και 8m/s αντίστοιχα). Στις εικόνες παρατηρείται να μικραίνει η ακρίβεια προσομοίωσης όσο μικραίνει η ταχύτητα ανέμου, κάτι που κυρίως φαίνεται στις μεγάλες σχέσεις τιμών μεγέθους κελιού δάσους και μεγέθους κελιού ανέμου (1-32 και 1-64). Αυτό οφείλεται στο ότι όταν ο άνεμος είναι ασθενής, λιγότερα κελιά δάσους καίγονται σε σχέση με ένα αντίστοιχο σενάριο με δυνατότερο άνεμο. Επειδή όταν υπολογίζουμε την ακρίβεια



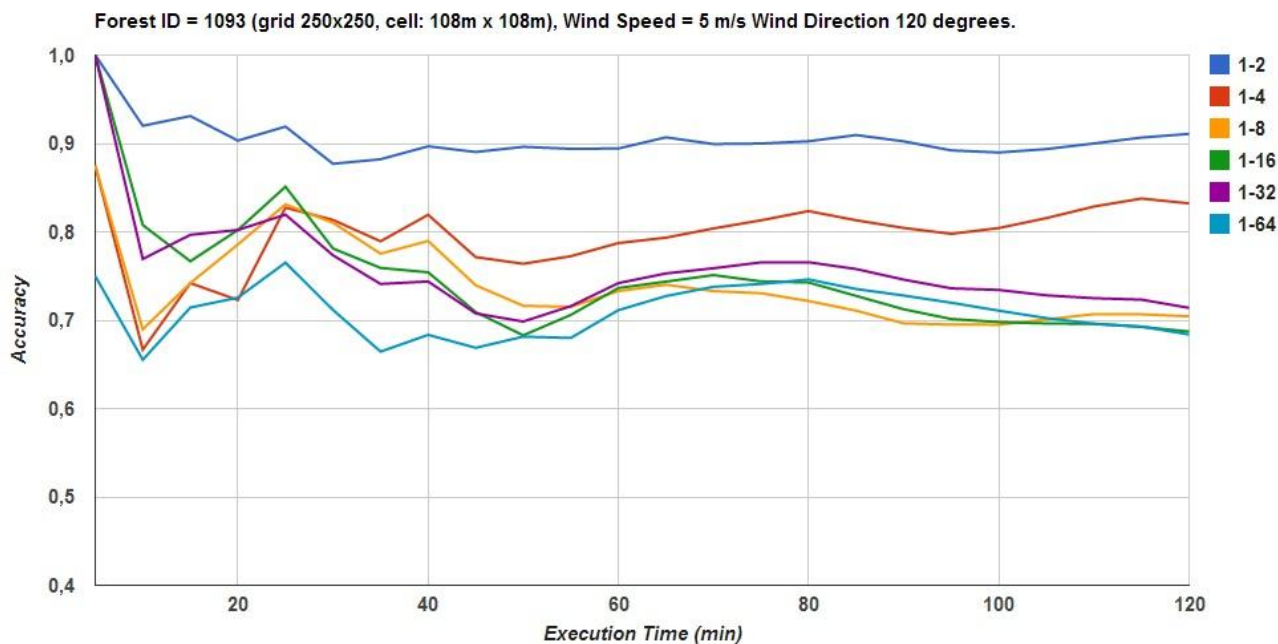
προσομοίωσης στην ουσία αθροίζουμε κελιά, οι διαφορές που βρίσκουμε όταν τα καμένα κελιά είναι λιγότερα επηρεάζουν πιο πολύ την ακρίβεια της προσομοίωσης. Αυτός είναι και ο λόγος που υπάρχουν εντονότερες διακυμάνσεις στις γραφικές παραστάσεις των διάφορων σχέσεων μεγέθους πλέγματος ανέμου και μεγέθους εδάφους δάσους.

Ακολουθούν διαγράμματα και πίνακες του δάσους ανάλυσης 250x250 κελιών, μεγέθους 108m x 108m (ID 1093) για τιμές έντασης ανέμου 3m/s, 5m/s και 7m/s.



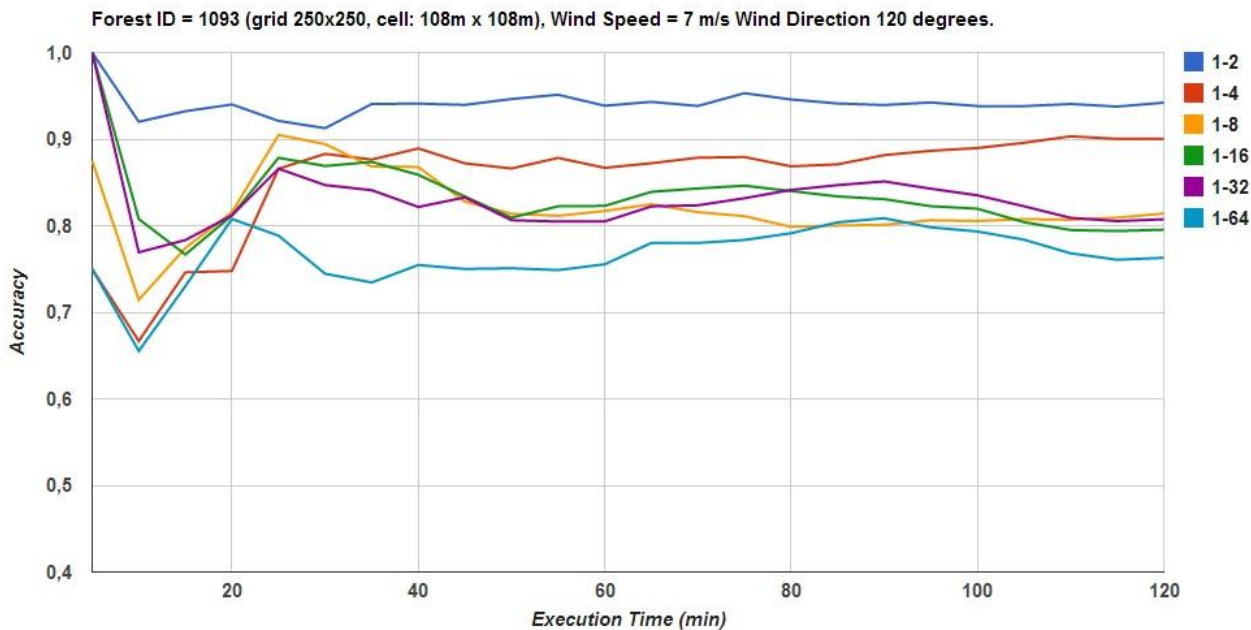
Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2744	1-1	19.24	2.87	0.18	7.82	2.91	1.000	0.0000
2745	1-2	4.70	2.86	0.45	6.69	2.92	0.8739	0.0404
2746	1-4	1.18	2.86	1.02	5.49	2.93	0.8310	0.0756
2747	1-8	0.35	2.83	1.74	4.60	2.83	0.7850	0.0786
2748	1-16	0.15	2.88	2.15	3.81	2.92	0.6882	0.1033
2749	1-32	0.10	2.98	2.62	3.36	2.94	0.6221	0.1279
2750	1-64	0.09	2.93	2.99	3.01	3.00	0.6491	0.1011

**Εικόνα I.7: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s**



Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2765	1-1	19.19	3.26	0.30	13.04	4.85	1.000	0.0000
2766	1-2	4.69	3.34	0.75	11.16	4.86	0.9049	0.0230
2767	1-4	1.15	3.38	1.69	9.18	4.89	0.7966	0.0415
2768	1-8	0.34	3.57	2.89	7.72	4.72	0.7393	0.0471
2769	1-16	0.14	3.67	3.56	6.39	4.86	0.7478	0.0672
2770	1-32	0.10	3.44	4.34	5.62	4.90	0.7590	0.0582
2771	1-64	0.09	3.40	4.99	5.01	5.00	0.7096	0.0287

**Εικόνα I.8: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s**



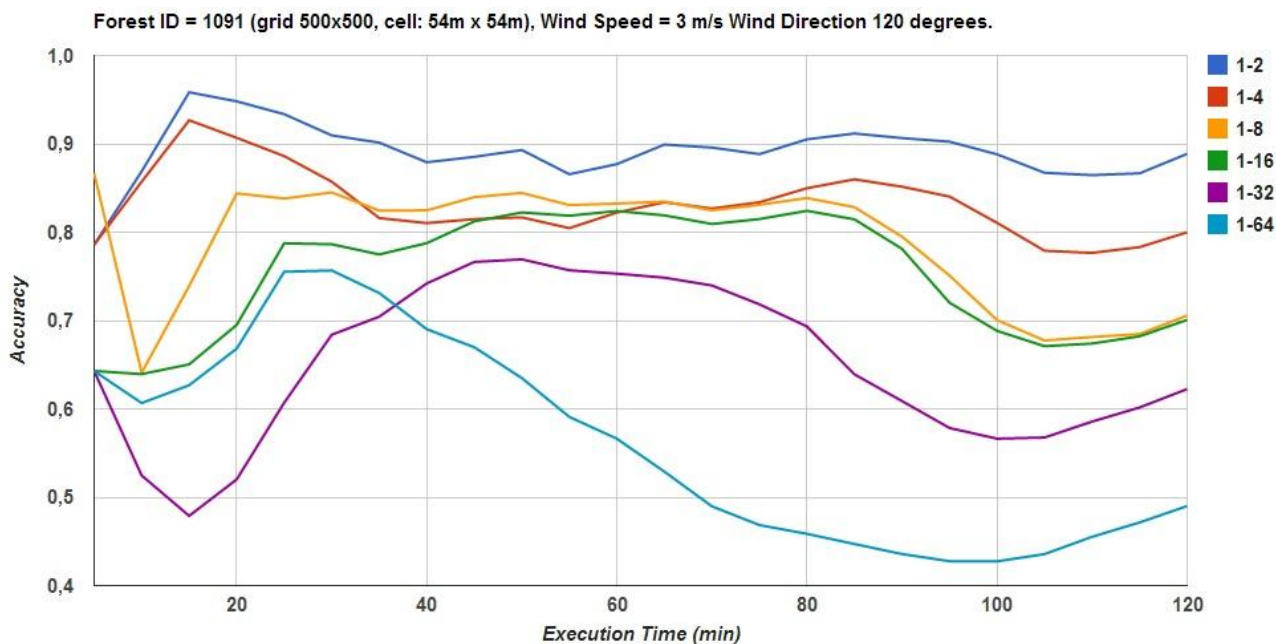
Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2786	1-1	19.19	3.40	0.42	18.25	6.79	1.000	0.0000
2787	1-2	4.67	3.13	1.05	15.62	6.81	0.9409	0.0152
2788	1-4	1.16	3.45	2.37	12.86	6.84	0.8556	0.0600
2789	1-8	0.34	3.57	4.04	10.82	6.61	0.8202	0.0387
2790	1-16	0.15	3.55	4.97	8.97	6.81	0.8340	0.0436
2791	1-32	0.10	3.48	6.06	7.89	6.86	0.8303	0.0416
2792	1-64	0.08	3.42	6.98	7.02	7.00	0.7660	0.0324

**Εικόνα 1.9: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s**

Σε αυτό το σημείο αξίζει να επαναλάβουμε ότι παρατηρούνται εντονότερες διακυμάνσεις στις αρχικές χρονικές στιγμές των προσομοιώσεων που οφείλεται στο ότι το πλήθος των υπό σύγκριση κελιών είναι ακόμα μικρό και άρα ελάχιστες διαφορές αρκούν για να κάνουν την τιμή της ακρίβειας της προσομοίωσης να έχει μεγάλες διακυμάνσεις. Αυτό φαίνεται και από το γεγονός όταν συγκρίνονται πανομοιότυπα τρεξίματα με διαφορετικό μέγεθος κελιού δάσους, όπου φαίνεται ότι οι διακυμάνσεις στην αρχή της προσομοίωσης ομαλοποιούνται όταν το μέγεθος του κελιού του δάσους μικραίνει ακριβώς γιατί το πλήθος των υπό σύγκριση κελιών είναι μεγαλύτερο για το μικρότερο μέγεθος κελιού παρόλο που η έκταση της δασικής πυρκαγιάς είναι “ακριβώς” η ίδια.

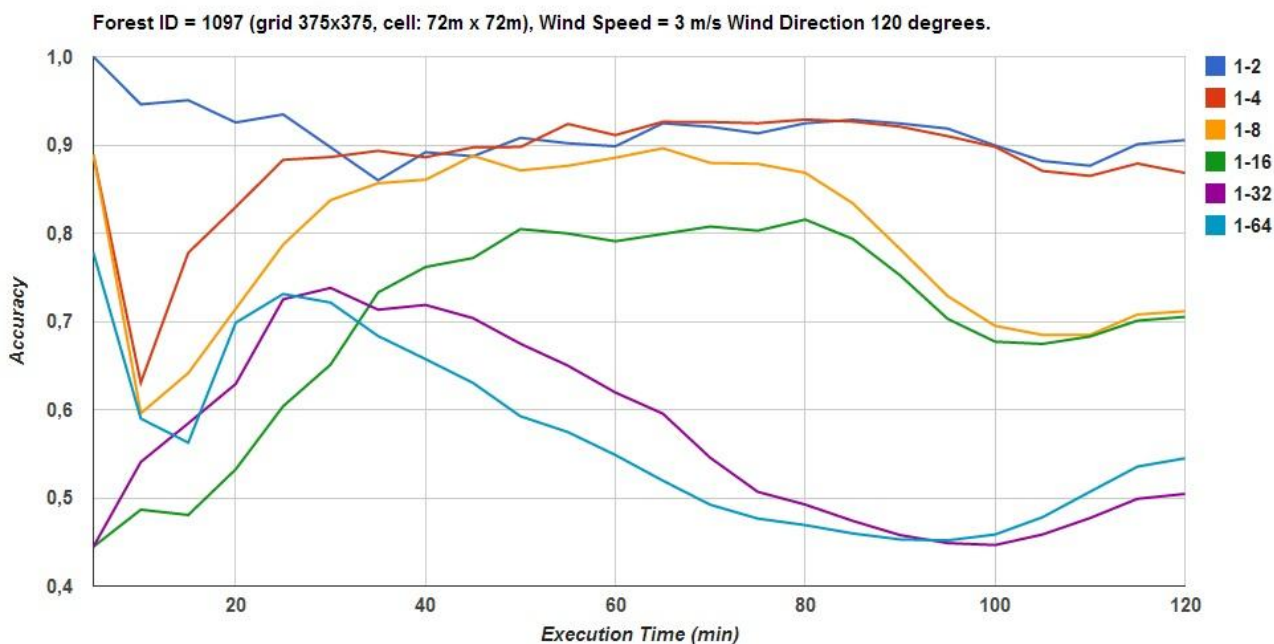
Ακολουθούν τα διαγράμματα και οι σχετικοί πίνακες που παρήχθησαν από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν οργανωμένοι κατά ίδια ταχύτητα ανέμου.

Οι Εικόνες I.10 έως I.12 δείχνουν τα αποτελέσματα από τις εκτελέσεις και στα δάση (ανάλυσης 500x500 κελιών, μεγέθους 54m x 54m (ID 1091), ανάλυσης 375x375 κελιών, μεγέθους 72m x 72m (ID 1097) και ανάλυσης 250x250 κελιών, μεγέθους 108m x 108m (ID 1093)) για τιμή έντασης ανέμου 3m/s.



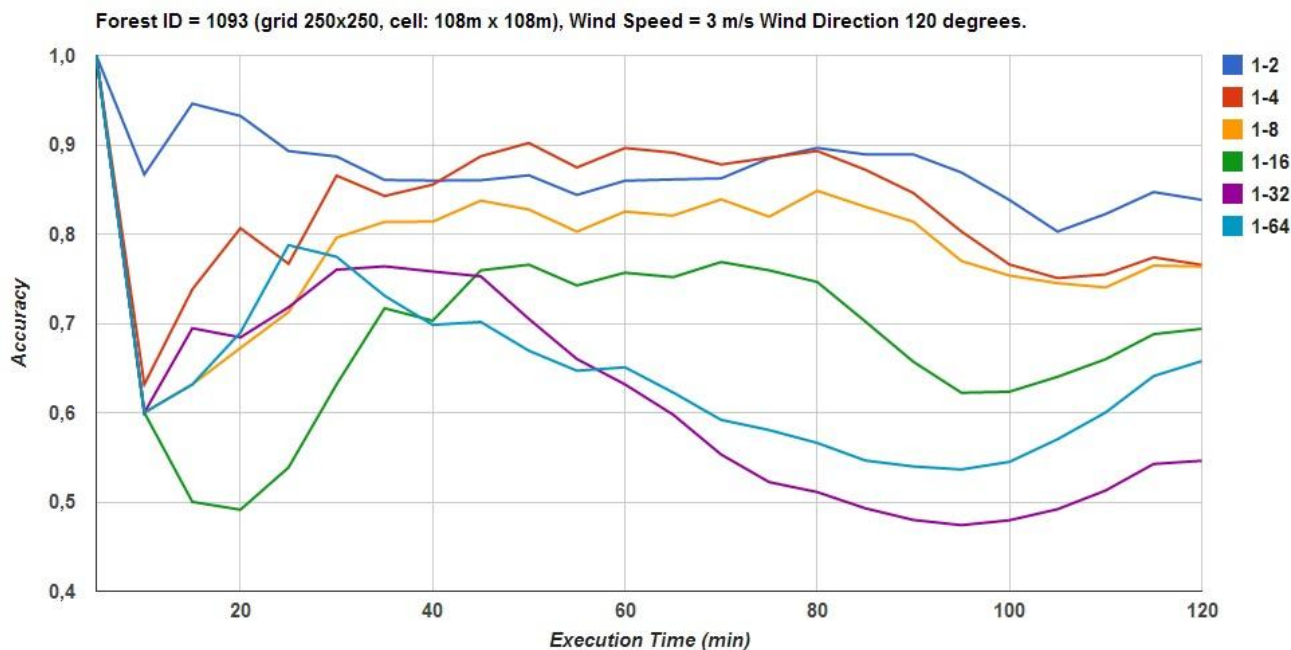
Sid	mesh - cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2730	1-1	80.57	10.03	0.07	9.15	2.91	1.000	0.0000
2731	1-2	19.80	9.48	0.16	7.87	2.91	0.8912	0.0327
2732	1-4	4.87	9.80	0.43	6.71	2.92	0.8312	0.0378
2733	1-8	1.36	10.17	1.04	5.47	2.93	0.7884	0.0680
2734	1-16	0.53	9.91	1.75	4.60	2.83	0.7517	0.0669
2735	1-32	0.33	10.30	2.16	3.82	2.92	0.6508	0.0862
2736	1-64	0.26	11.84	2.62	3.36	2.94	0.5614	0.1107

**Εικόνα I.10: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s**



Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2737	1-1	44.75	5.27	0.10	8.60	2.91	1.000	0.0000
2738	1-2	10.74	5.32	0.26	7.39	2.91	0.9133	0.0279
2739	1-4	2.66	5.36	0.63	6.17	2.93	0.8811	0.0623
2740	1-8	0.75	5.58	1.45	5.00	2.88	0.7938	0.0919
2741	1-16	0.57	5.44	1.94	4.27	2.84	0.6988	0.1111
2742	1-32	0.19	6.06	2.27	3.69	2.95	0.5685	0.1013
2743	1-64	0.15	5.94	2.74	3.20	2.96	0.5671	0.0975

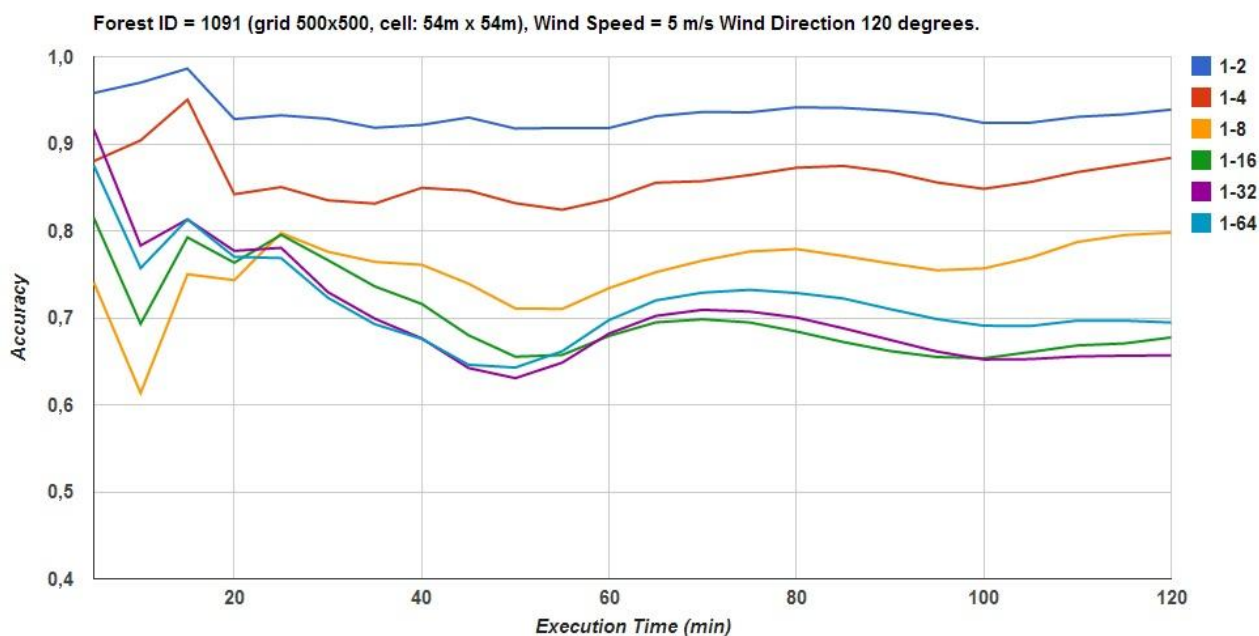
**Εικόνα I.11: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s**



Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2744	1-1	19.24	2.87	0.18	7.82	2.91	1.000	0.0000
2745	1-2	4.70	2.86	0.45	6.69	2.92	0.8739	0.0404
2746	1-4	1.18	2.86	1.02	5.49	2.93	0.8310	0.0756
2747	1-8	0.35	2.83	1.74	4.60	2.83	0.7850	0.0786
2748	1-16	0.15	2.88	2.15	3.81	2.92	0.6882	0.1033
2749	1-32	0.10	2.98	2.62	3.36	2.94	0.6221	0.1279
2750	1-64	0.09	2.93	2.99	3.01	3.00	0.6491	0.1011

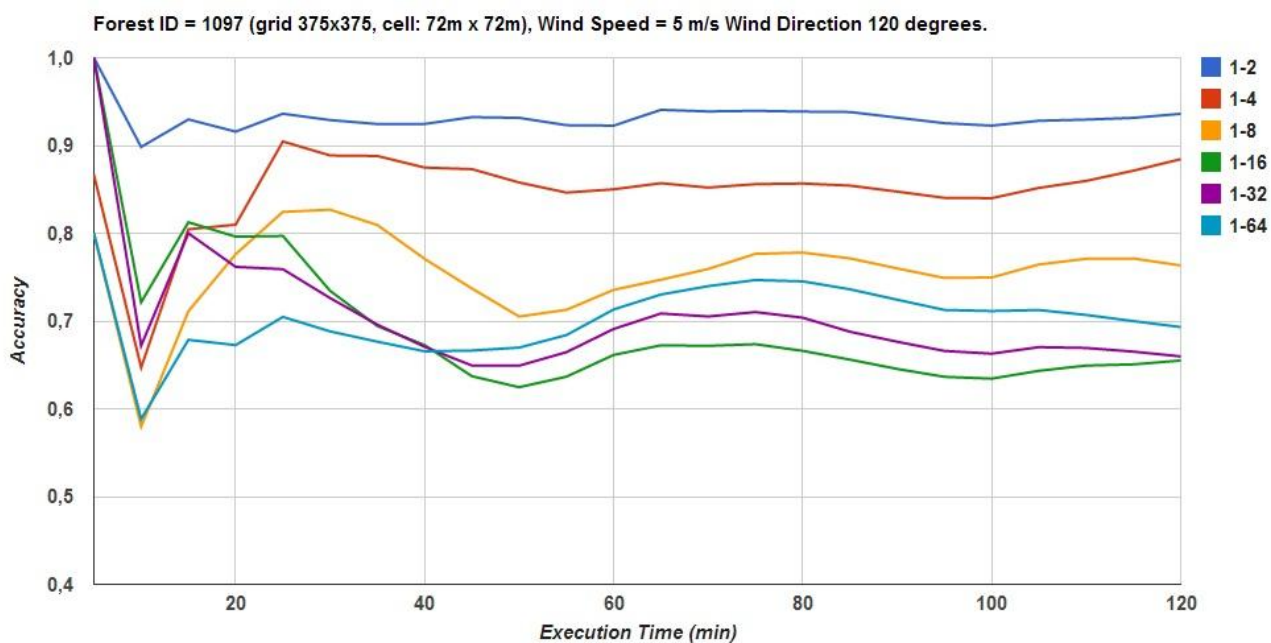
**Εικόνα I.12: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 3 m/s**

Από τις προηγούμενες τρεις εικόνες παρατηρούμε πως στο δάσος με την μικρότερη ανάλυση (250x250 κελιά) όλα τα πειράματα ξεκινούν με τιμή ακρίβειας κοντά στο 1, ενώ στο δάσος της αμέσως μεγαλύτερης ανάλυσης μόλις μια εκτέλεση (σχέση 1-2) ξεκινά κοντά με τιμή ακρίβειας κοντά στο 1. Στο δάσος ανάλυσης 500x500 κελιών όλες οι εκτελέσεις ξεκινούν με τιμή ακρίβειας μικρότερης του 0.9. Αυτό είναι λογικό καθώς οι πρώτες τιμές στον άξονα του χρόνου αφορούν την εξάπλωση της φωτιάς σε πολύ μικρά διαστήματα. Τις διαφορές σε τόσο μικρές αποστάσεις είναι φυσικό να τις αποτυπώνουν καλύτερα τα μικρά κελιά όντας πιο αναλυτικά.



Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2751	1-1	80.27	14.75	0.12	15.25	4.85	1.000	0.0000
2752	1-2	19.43	15.38	0.26	13.11	4.85	0.9350	0.0161
2753	1-4	4.89	15.79	0.71	11.20	4.87	0.8607	0.0265
2754	1-8	1.34	16.74	1.71	9.15	4.88	0.7545	0.0374
2755	1-16	0.53	18.52	2.91	7.72	4.72	0.7016	0.0483
2756	1-32	0.32	18.80	3.58	6.40	4.87	0.7039	0.0658
2757	1-64	0.26	17.94	4.34	5.62	4.90	0.7180	0.0505

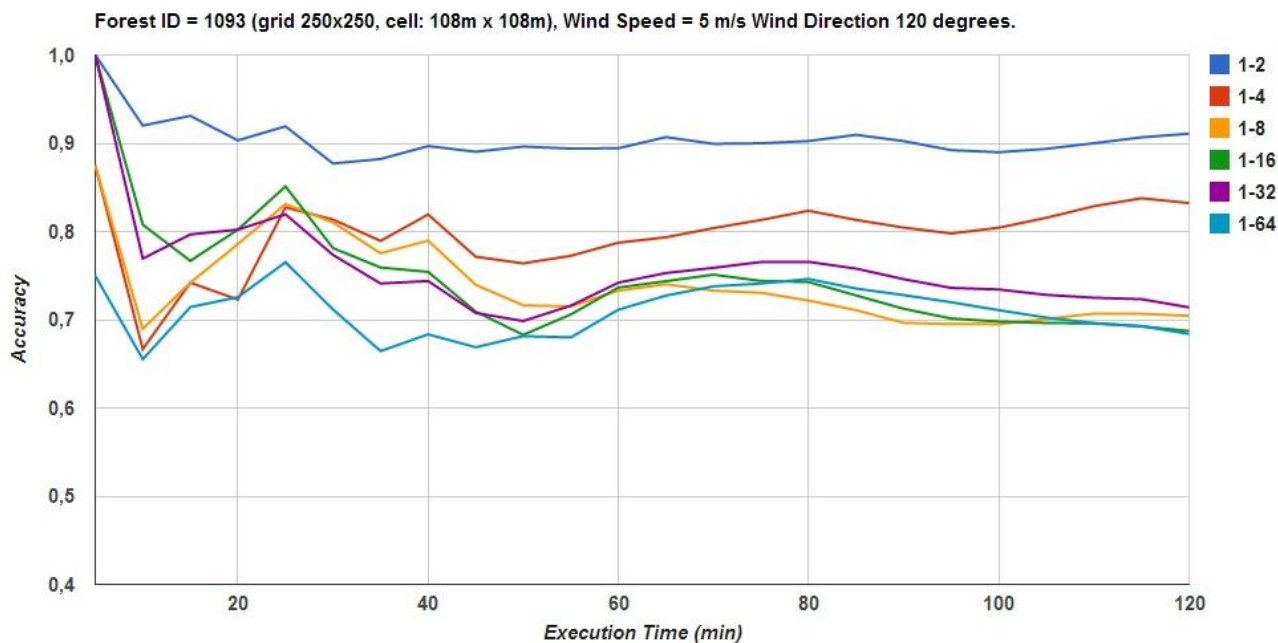
**Εικόνα I.13: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s**



Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2758	1-1	44.63	7.13	0.17	14.33	4.85	1.000	0.0000
2759	1-2	10.70	7.29	0.44	12.32	4.85	0.9320	0.0168
2760	1-4	2.66	7.35	1.05	10.30	4.89	0.8492	0.0476
2761	1-8	0.75	8.28	2.40	8.39	4.80	0.7562	0.0480
2762	1-16	0.30	8.52	3.21	7.17	4.73	0.6934	0.0829
2763	1-32	0.19	8.43	3.75	6.19	4.92	0.7052	0.0718
2764	1-64	0.15	7.87	4.55	5.34	4.92	0.7027	0.0393

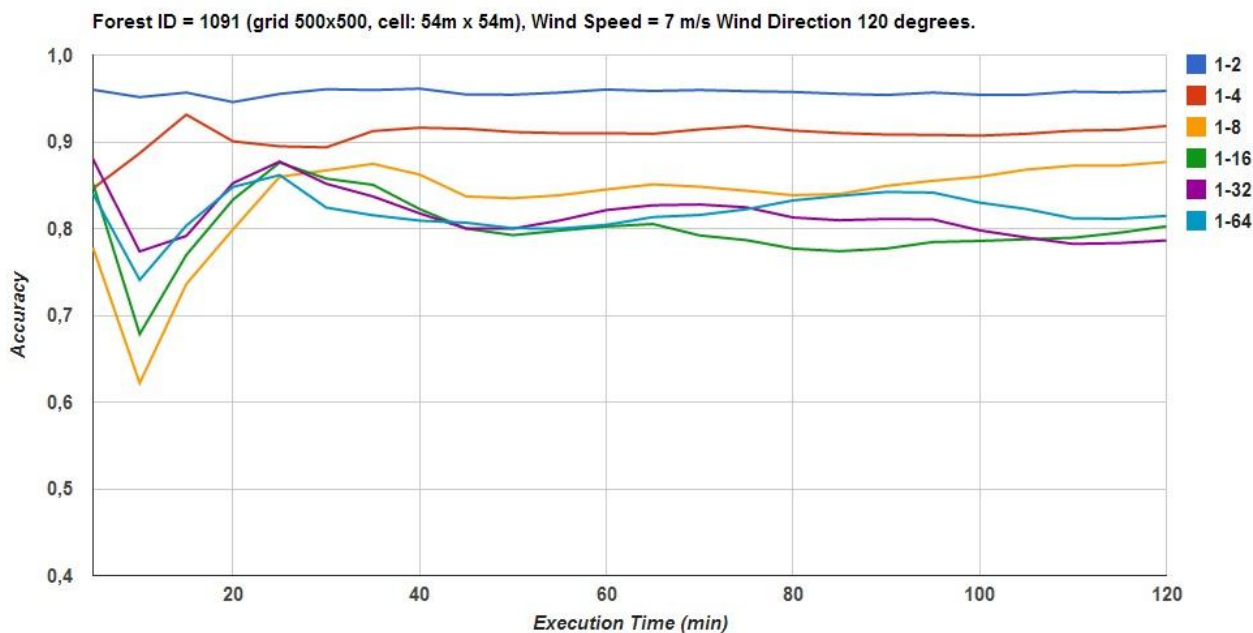
**Εικόνα I.14: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s**





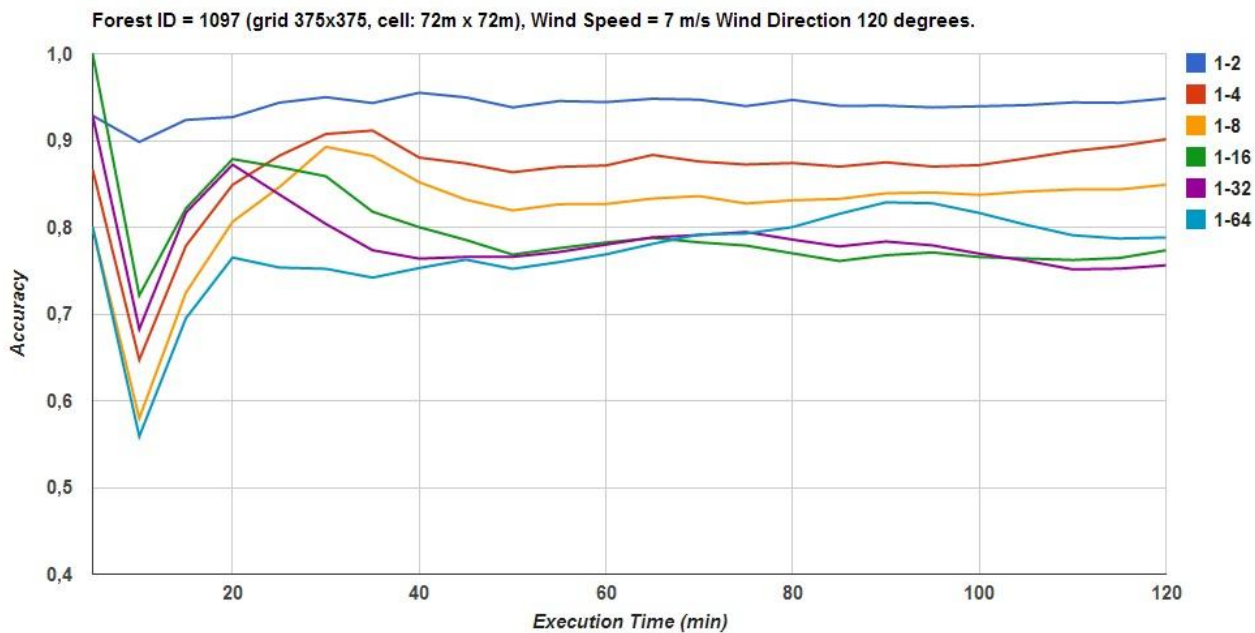
Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2765	1-1	19.19	3.26	0.30	13.04	4.85	1.000	0.0000
2766	1-2	4.69	3.34	0.75	11.16	4.86	0.9049	0.0230
2767	1-4	1.15	3.38	1.69	9.18	4.89	0.7966	0.0415
2768	1-8	0.34	3.57	2.89	7.72	4.72	0.7393	0.0471
2769	1-16	0.14	3.67	3.56	6.39	4.86	0.7478	0.0672
2770	1-32	0.10	3.44	4.34	5.62	4.90	0.7590	0.0582
2771	1-64	0.09	3.40	4.99	5.01	5.00	0.7096	0.0287

**Εικόνα I.15: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 5 m/s**



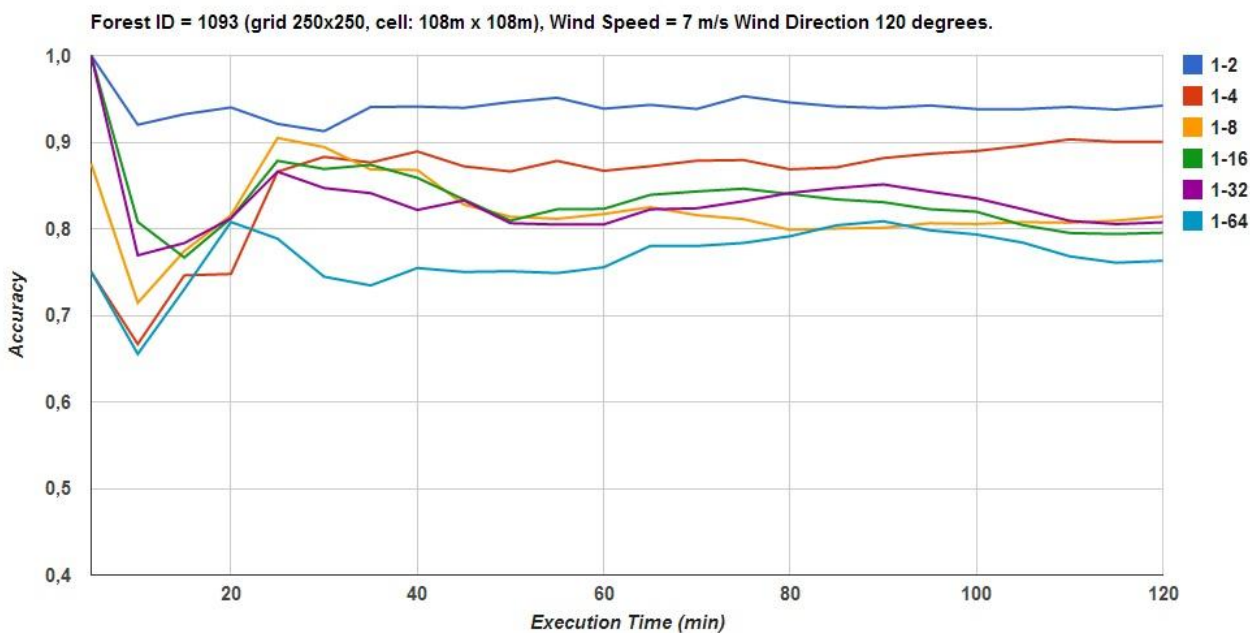
Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2772	1-1	80.30	16.56	0.17	21.35	6.79	1.000	0.0000
2773	1-2	19.61	16.93	0.36	18.36	6.79	0.9566	0.0034
2774	1-4	4.85	17.10	0.99	15.68	6.81	0.9070	0.0154
2775	1-8	1.35	17.56	2.40	12.82	6.84	0.8345	0.0545
2776	1-16	0.53	18.90	4.07	10.82	6.61	0.7995	0.0379
2777	1-32	0.32	18.92	5.00	8.99	6.81	0.8155	0.0277
2778	1-64	0.26	17.98	6.06	7.89	6.86	0.8187	0.0229

**Εικόνα I.16: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 500x500, κελιού 54m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s**



Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2779	1-1	44.60	7.66	0.24	20.07	6.79	1.000	0.0000
2780	1-2	10.73	7.73	0.61	17.24	6.79	0.9401	0.0113
2781	1-4	2.65	7.78	1.47	14.43	6.84	0.8647	0.0514
2782	1-8	0.75	8.14	3.36	11.75	6.72	0.8225	0.0586
2783	1-16	0.31	8.59	4.48	10.06	6.62	0.7970	0.0557
2784	1-32	0.19	8.16	5.23	8.70	6.88	0.7855	0.0449
2785	1-64	0.15	7.87	6.36	7.49	6.89	0.7702	0.0534

Εικόνα I.17: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 375x375, κελιού 72m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s



Sid	mesh-cell	WindNinja exec time (sec)	FLogA exec time (sec)	Min Wind (m/s)	Max Wind (m/s)	Avg Wind (m/s)	Average Accuracy	St Dev Accuracy
2786	1-1	19.19	3.40	0.42	18.25	6.79	1.000	0.0000
2787	1-2	4.67	3.13	1.05	15.62	6.81	0.9409	0.0152
2788	1-4	1.16	3.45	2.37	12.86	6.84	0.8556	0.0600
2789	1-8	0.34	3.57	4.04	10.82	6.61	0.8202	0.0387
2790	1-16	0.15	3.55	4.97	8.97	6.81	0.8340	0.0436
2791	1-32	0.10	3.48	6.06	7.89	6.86	0.8303	0.0416
2792	1-64	0.08	3.42	6.98	7.02	7.00	0.7660	0.0324

**Εικόνα I.18: Γραφική παράσταση και πίνακας με τα αποτελέσματα από τα πειράματα στο δάσος μεγέθους 250x250, κελιού 108m και ταχύτητας ανέμου 7 m/s**

Παρατηρούμε τέλος πως όσο μεγαλώνει η τιμή έντασης του ανέμου τόσο πιο λίγες μεταβολές παρουσιάζονται στην τιμή της ακρίβειας κατά την εξέλιξη της προσομοίωσης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι ένας ισχυρός άνεμος εξαπλώνει τη φωτιά σε μεγάλο εύρος κι έτσι τα καμμένα κελιά είναι αναλογικά περισσότερα σε σχέση με ένα σενάριο με ασθενή άνεμο. Τα περισσότερα καμμένα κελιά με τη σειρά τους ευθύνονται για την αδράνεια που παρουσιάζει ο δείκτης της ακρίβειας στις όποιες μεταβολές.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος Όρος	Ελληνικός Όρος
Accuracy	Ακρίβεια
Animation	Κινούμενο Σχέδιο
Cell Size	Μέγεθος Κελιού
Computational Fluid Dynamics	Υπολογιστική Ρευστομηχανική
Configuration File	Αρχείο Παραμετροποίησης
Execution Time	Χρόνος Εκτέλεσης
Grid	Πλέγμα
Latitude	Γεωγραφικό Πλάτος
Linear Flow Models	Μοντέλα Γραμμικής Ροής
Longitude	Γεωγραφικό Μήκος
Mass-Consistent Models	Μοντέλα Σταθερής Μάζας
Mesh Resolution	Ανάλυση Πλέγματος
Overprediction	Υπερεκτίμηση
Raster File	Ψηφιδωτό (χωρικό) Αρχείο
Realtime	Πραγματικού Χρόνου
Scale Length	Κλίμακα Μήκους
Similarity Score	Βαθμός Ομοιότητας
Underprediction	Υποεκτίμηση
User Interface	Διεπαφή Χρήστη
Web Service	Υπηρεσία Ιστού



## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CFD	Computational fluid dynamics
CLI	Command Line Interface
DES	Detached eddy simulation
FARSITE	Fire Area Simulator-model development and Evaluation
FLogA	Fire logic Animation
KML	Keyhole Markup Language
LES	Large-eddy simulation
PHP	<i>Hypertext Preprocessor</i>
RANS	Reynolds-averaged Navier-Stokes
WAsP	Wind Atlas Analysis and Application Program
Weng	WAsP Engineering
XML	Extensible Markup Language
NOA	National Observatory of Athens





## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Bogdos, Nikos, and Elias S. Manolakos. "A tool for simulation and geo-animation of wildfires with fuel editing and hotspot monitoring capabilities." *Environmental Modelling & Software* (2013).
- [2] FireLab - WindNinja, <http://www.firelab.org/research-projects/physical-fire/145-windninja>, (accessed 03 October 2013)
- [3] L. Héctor Juárez, María Luisa Sandoval, Jorge López and Rafael Reséndiz, *Mass-Consistent Wind Field Models: Numerical Techniques by L2-Projection Methods*, Department of Mathematics, University of Autónoma Metropolitana Iztapalapa, México City, InTech, 2012
- [4] Error detection and correction, [http://en.wikipedia.org/wiki/Error\\_detection\\_and\\_correction](http://en.wikipedia.org/wiki/Error_detection_and_correction), (accessed 03 October 2013)
- [5] Fourier transform, [http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier\\_transform](http://en.wikipedia.org/wiki/Fourier_transform), (accessed 12 September 2013)
- [6] Computational fluid dynamics, [en.wikipedia.org/wiki/Computational\\_fluid\\_dynamics](http://en.wikipedia.org/wiki/Computational_fluid_dynamics), (accessed 01 October 2013)
- [7] Giancarlo Alfonsi, *Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations for Turbulence Modeling*, ASME, 2009
- [8] Reynolds stress, [http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds\\_stress](http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_stress), (accessed 01 October 2013)
- [9] A.M.G. Lopes, *WindStation—a software for the simulation of atmospheric flows over complex topography*, ELSEVIER, 2003
- [10] Bernadette H. Connell, *Evaluation of a 3-D Diagnostic Wind Model: NUATMOS*, Colorado State University, 1988
- [11] Lopes, A.M.G., Sousa, A.C.M., Viegas, D.X., 1995. Numerical Simulation of Turbulent Flow and Fire Propagation in Complex Terrain. *Numerical Heat Transfer Part A* (27), 229–253.
- [12] Wind Wizard surface wind modeling system, <http://www.firelab.org/research-projects/physical-fire/127-wind-wizard>, (accessed 03 October 2013)
- [13] FARSITE, <http://www.firemodels.org/index.php/national-systems/farsite>, (accessed 01 October 2013)

- [14] FlapMap Project, <http://sourceforge.net/projects/flapmap/>, (accessed 01 October 2013)
- [15] WAsP Engineering (WEng), <http://www.wasp.dk/Products/WEng.aspx>, (accessed 02 October 2013)
- [16] F. Dunkerley, J. Morenoa, T. Mikkelsena, I.H. Griffiths, LINCOM wind flow model: application to complex terrain with thermal stratification, ELSEVIER, 2001
- [17] WindSim, <http://www.windsim.com>, (accessed 01 October 2013)
- [18] Google Earth, <http://www.google.com/earth/index.html>, (accessed 01 October 2013)
- [19] WindNinja Tutorial 3: Point Initialization, [https://collab.firelab.org/software/projects/windninja/repository/raw/trunk/doc/tutorials/WindNinja\\_tutorial3.pdf](https://collab.firelab.org/software/projects/windninja/repository/raw/trunk/doc/tutorials/WindNinja_tutorial3.pdf), (accessed 01 October 2013)
- [20] WindNinja Tutorial 1: The Basics, [https://collab.firelab.org/software/projects/windninja/repository/raw/trunk/doc/tutorials/WindNinja\\_tutorial1.pdf](https://collab.firelab.org/software/projects/windninja/repository/raw/trunk/doc/tutorials/WindNinja_tutorial1.pdf), (accessed 01 October 2013)
- [21] PHP, <http://en.wikipedia.org/wiki/PHP>, (accessed 03 October 2013)
- [22] ESRI ASCII Raster, [http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisengine/java/GP\\_ToolRef/spatial\\_analyst\\_tools/esri\\_ascii\\_raster\\_format.htm](http://resources.esri.com/help/9.3/arcgisengine/java/GP_ToolRef/spatial_analyst_tools/esri_ascii_raster_format.htm), (accessed 02 October 2013)
- [23] KML Documentation, <http://code.google.com/intl/el/apis/kml/documentation/>, (accessed 04 February 2012).
- [24] Javascript, <http://en.wikipedia.org/wiki/JavaScript>, (accessed 01 October 2013).
- [25] Google Charts, <https://developers.google.com/chart/>, (accessed 01 October 2013).
- [26] Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, <http://www.noa.gr/>, (accessed 01 October 2013).
- [27] WindNinja Tutorial 2: Diurnal Winds, [https://collab.firelab.org/software/projects/windninja/repository/raw/trunk/doc/tutorials/WindNinja\\_tutorial2.pdf](https://collab.firelab.org/software/projects/windninja/repository/raw/trunk/doc/tutorials/WindNinja_tutorial2.pdf), (accessed 01 October 2013).
- [28] Missoula Area Wind Flow Predicted By Wind Ninja Software <http://www.makeitmissoula.com/2013/07/missoula-scientists-study-wind-flow-and-the-affects-on-firelines/>, (accessed 01 October 2013).

[29] Duncan Heathfield, Morten Nielsen, FIRE PARADOX: An Innovative Approach of Integrated Wildland Fire Management Regulating the Wildfire Problem by the Wise Use of Fire:Solving the Fire Paradox, page 23, UNINA, 2008

[30] Large Eddy Simulation [http://en.wikipedia.org/wiki/Large\\_eddy\\_simulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Large_eddy_simulation), (accessed 24 April 2014).

[31] Detached Eddy Simulation, [http://en.wikipedia.org/wiki/Detached\\_eddy\\_simulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Detached_eddy_simulation), (accessed 24 April 2014).