



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Χωροχρονική μεταβολή παραμέτρων του ενεργειακού ισοζυγίου σε δασικό και αγροτικό περιβάλλον από τη συνδυαστική χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης και ενός μοντέλου βιόσφαιρας:
Αποτελέσματα από μια μελέτη περίπτωσης στην Ολλανδία

Αθηνά Ε. Υφαντή

Επιβλέποντες καθηγητές:

Διονύσιος Καλύβας, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ
Γεώργιος Π. Πετρόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΧΠΑ

**ΑΘΗΝΑ
2021**

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Χωροχρονική μεταβολή παραμέτρων του ενεργειακού ισοζυγίου σε δασικό και αγροτικό περιβάλλον από τη συνδυαστική χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης και ενός μοντέλου βιόσφαιρας:
Αποτελέσματα από μια μελέτη περίπτωσης στην Ολλανδία

“Spatio-temporal mapping of surface energy balance parameters in forest and agricultural environments from the combined use of remote sensing data and a land biosphere model:
Results from a case study in The Netherlands”

Αθηνά Ε. Υφαντή

Εξεταστική Επιτροπή:

Διονύσιος Καλύβας, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ (επιβλέπων)
Γεώργιος Π. Πετρόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΧΠΑ (επιβλέπων)
Γεώργιος Παπαδόπουλος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ

Χωροχρονική μεταβολή παραμέτρων του ενεργειακού ισοζυγίου σε δασικό και αγροτικό περιβάλλον από τη συνδυαστική χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης και ενός μοντέλου βιόσφαιρας: Αποτελέσματα από μια μελέτη περίπτωσης στην Ολλανδία

ΠΜΣ Γεωπληροφορική & Χωρική ανάλυση

Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής είναι να ποσοτικοποιήσει την ικανότητα του νέου μοντέλου Βιόσφαιρας Sim2DSphere να υπολογίζει σημαντικές παραμέτρους του ενεργειακού ισοζυγίου, όπως τη λανθάνουσα και αισθητή ροή θερμότητας.

Η μελέτη αφορά δύο περιοχές στην Ολλανδία και συγκεκριμένα μια δασική και μια χορτολιβαδική έκταση, για τις οποίες υπήρχαν διαθέσιμες επικυρωμένες μετρήσεις από το παγκόσμιο δίκτυο μικρομετεωρολογικών σταθμών FLUXNET. Με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης και δεδομένων από επίγειους σταθμούς μέτρησης το μοντέλο πραγματοποίησε ημερήσια πρόβλεψη για τους δύο σταθμούς. Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου Sim2DSphere επήλθε από τη σύγκρισή του τόσο με τα in situ δεδομένα, όσο και με τα αποτελέσματα της προηγούμενης έκδοσης του μοντέλου, το SimSphere 1D. Μέσα από τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής γίνεται σαφές ότι το μοντέλο καταφέρνει να προβλέπει με ακρίβεια αρκετές παραμέτρους του ενεργειακού ισοζυγίου και λόγω της ευκολίας στη χρήση που προσφέρουν οι τελευταίες εξελίξεις στο μοντέλο, μπορεί να αποτελέσει ενδεχομένως ένα εύχρηστο και αξιόπιστο εργαλείο διδασκαλίας και έρευνας.

Επιστημονική περιοχή: Γεωπληροφορική

Λέξεις κλειδιά: τηλεπισκόπηση, μοντέλο βιόσφαιρας, SimSphere, ενεργειακό ισοζύγιο

Spatio-temporal mapping of surface energy balance parameters in forest and agricultural environments from the combined use of remote sensing data and land biosphere model: Results from a case study in The Netherlands

MSc Geoinformatics & Spatial Analysis

Department of Natural Resources Management & Agricultural Engineering

Abstract

The scope of this Master Thesis study is the quantification of the capacity of the new Biosphere model Sim2DSphere to compute critical parameters of the energy balance, such as the latent and sensible heat.

The research study examines two regions in the Netherlands and more specifically a forestry and a grassland area, for which measurements certified by the global network of micro-meteorological tower flux sites, called FLUXNET, were available. The model has made daily prediction for both tower flux sites mentioned above, through the use of high-resolution satellite data and data from regional networks. The result verification of the Sim2DSphere model has been achieved through its comparison with the in situ data as well as with the results of the previous version of the model, SimSphere 1D. The results of this research study found evidence of the success of the model in predicting accurately multiple parameters of the energy balance; in addition, due to the latest developments of the model that render it more convenient during its use, the model may constitute a user-friendly and reliable teaching and research tool.

Scientific area: Geoinformatics

Keywords: remote sensing, biosphere model, SimSphere, energy balance

Στην οικογένειά μου

«Με την άδειά μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή μέσα από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ και διασταυρώθηκε η εγκυρότητα και η πρωτοτυπία της»

Περιεχόμενα

Περίληψη

Abstract

1. Εισαγωγή

- 1.1. Σημασία παρακολούθησης παραμέτρων ενεργειακού ισοζυγίου σε δασικά οικοσυστήματα
- 1.2. Η συμβολή της γεωπληροφορικής στην παρακολούθηση των δασικών οικοσυστημάτων
- 1.3. Σκοπιμότητα και στόχοι έρευνας
- 1.4. Περιγραφή της δομής της εργασίας

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

- 2.1. Εισαγωγή στη χρήση των SVAT μοντέλων
- 2.2. Εισαγωγή στο SVAT μοντέλο SimSphere
- 2.3. Περιγραφή του νέου μοντέλου Sim2DSphere

3. Μεθοδολογία

- 3.1. Περιγραφή της περιοχής μελέτης
- 3.2. Περιγραφή των επίγειων μετρήσεων (από το CarboEurope)
- 3.3. Δορυφορικά δεδομένα
 - 3.3.1. Χαρακτηριστικά δεδομένων και τρόπος απόκτησης αυτών
 - 3.3.2. Προεπεξεργασία δεδομένων για εισαγωγή στο μοντέλο
- 3.4. Επιχειρησιακό προϊόν CORINE 2000
- 3.5. Παραμετροποίηση μοντέλου SimSphere
 - 3.5.1. Τοπογραφικά
 - 3.5.2. Βλάστησης
 - 3.5.3. Υδρολογικά
 - 3.5.3. Επιφάνειας εδάφους
 - 3.5.4. Μετεωρολογικά
- 3.6. Στατιστική προσέγγιση ανάλυσης αποτελεσμάτων

4. Αποτελέσματα

- 4.1. Αποτελέσματα του μοντέλου Sim2DSphere
- 4.2. Σύγκριση των αποτελεσμάτων του Sim2DSphere με το SimSphere 1D.
 - 4.2.1. Αποτελέσματα του μοντέλου SimSphere 1D
 - 4.2.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων των Sim2DSphere με το SimSphere 1D

5. Συζήτηση - Μελλοντική έρευνα

Βιβλιογραφία

1. Εισαγωγή

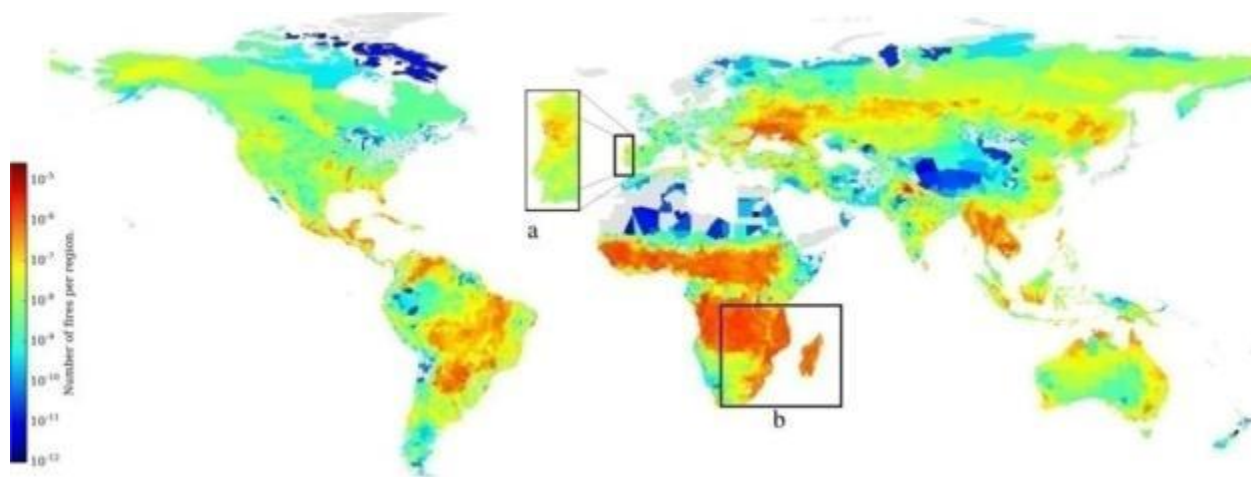
1.1. Σημασία παρακολούθησης παραμέτρων ενεργειακού ισοζυγίου σε δασικά οικοσυστήματα.

Οικοσύστημα καλείται ένα ολοκληρωμένο φυσικό συγκρότημα μέσα στο οποίο οι αβιοτικοί παράγοντες και ζωντανοί οργανισμοί βρίσκονται σε διαρκή αλληλεπίδραση και αλληλεξάρτηση. Το οικοσύστημα χαρακτηρίζεται από μια διαρκή ροή ενέργειας και κυκλική χρήση των ανόργανων υλικών ενώ ταυτόχρονα έχει και την ιδιότητα να αυτοσυντηρείται και να αυτορρυθμίζει τη λειτουργία του (Χριστοδουλάκης, 2012).

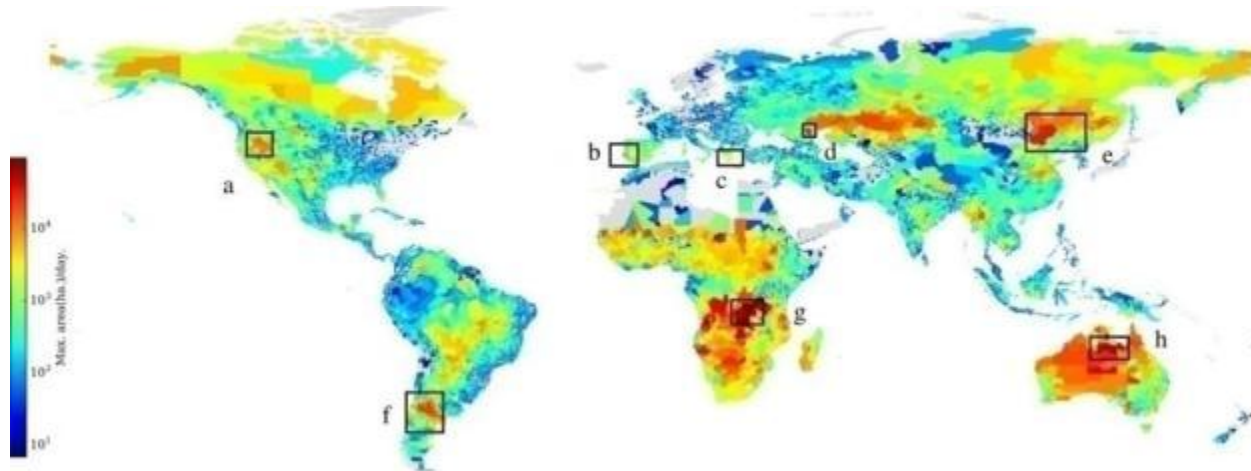
Από το σύνολο των οικοσυστημάτων τα δασικά παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη βιοποικιλότητα (Olson et al., 2001; Jenkins and Jorpa, 2009). Παρουσιάζουν επίσης ποικιλομορφία ως προς τις υπηρεσίες που παρέχουν ως οικοσυστήματα (π.χ. διατήρηση αποθήκευση άνθρακα, ρύθμιση υδατικού ισοζυγίου, αποθήκευση γενετικού υλικού)(Naidoo et al., 2008; Veldman et al., 2015; Da Ponte et al., 2017). Η σύνθεση των δασικών οικοσυστημάτων σε δασοπονικά είδη, η φυσιογνωμία τους και η οικολογία τους εξαρτώνται κυρίως από τους κλιματικούς παράγοντες, εφ' όσον ο άνθρωπος δεν έχει παρέμβει ως ρυθμιστής ή καταστροφέας τους (Ντάφης, 1986). Οι αυξανόμενες απαιτήσεις για κατανάλωση και παραγωγή του ολοένα μεγαλύτερου παγκόσμιου πληθυσμού τα τελευταία εκατόν πενήντα χρόνια, καθώς και η ανάπτυξη υποδομών και η καύση ορυκτών καυσίμων αποτελούν τα βασικότερα αίτια της κλιματικής αλλαγής (Steffen et al. 2015) και μπορούν να μεταβάλλουν τη φαινολογία, τις αλληλεπιδράσεις και την κατανομή των ειδών, καθώς και τη μορφολογία και την πρωτογενή παραγωγικότητα των δασικών οικοσυστημάτων παγκοσμίως (Scheffers et al., 2016; Liu et al., 2018).

Τα δάση σήμερα καλύπτουν σχεδόν το ένα τρίτο της επιφάνειας της γης (FAO, 2016) και παρέχουν οργανική υποδομή ζωτικής σημασίας τόσο σε τοπικό, όσο σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο. Οι προβλεπόμενες αλλαγές στο κλίμα, συλλήβδην σταδιακές και ακραία φαινόμενα, αποτελούν σοβαρό πλήγμα για τη δασοκομία (IPCC, 2011). Οι

ολοένα και αυξανόμενοι ζεστοί χειμώνες καθώς και ο πρόωρος ερχομός της άνοιξης, προκαλούν την ξηρότητα των εδαφών και των δασικών εκτάσεων, με αποτέλεσμα την αύξηση των δασικών πυρκαγιών, τόσο στα εύκρατα όσο και στα τροπικά δάση (Malhi et al., 2009) ιδιαίτερα στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου (Schmuck et al., 2015). Στις **εικόνες 1.1 και 1.2** φαίνεται σε παγκόσμια κλίμακα η κατανομή των πυρκαγιών για την περίοδο 2001-2017 καθώς και η ταχύτητα εξάπλωσης τους. Βασικότερες αιτίες του μεγάλου αριθμού των πυρκαγιών τις τελευταίες δεκαετίες θεωρούνται οι αλλαγές στις χρήσεις γης εξαιτίας των ανθρώπινων παρεμβάσεων, καθώς και οι απότομες και ενίοτε απρόβλεπτες πολλές φορές κλιματικές διακυμάνσεις. (Caldararo, 2002; Dimitrakopoulos et al., 2011; Pausas και Fernández-Muñoz, 2012).



Εικόνα 1.1. Αριθμός πυρκαγιών ανά περιοχή για την περίοδο 2001-2017 (πηγή: Arte., 2019)



Εικόνα 1.2. Μέγιστες τιμές του μέσου όρου ταχύτητας εξάπλωσης της πυρκαγιάς για την περίοδο 2001-2017. Στην Ευρώπη, η ταχύτερη εξάπλωση πυρκαγιάς επήλθε στην νότια Ισπανία(b), στην Πελοπόννησο(c) και κεντρική Πορτογαλία(b) (πηγή: Arte., 2019)

Η απώλεια σε δασικό πληθυσμό τα τελευταία τριακόσια χρόνια υπολογίζεται στο 35%. Ο παγκόσμιος ρυθμός απώλειας δασικών εκτάσεων είναι 3,3 εκατομμύρια εκτάρια ή 0,08 % ετησίως (FAO, 2015). Αξιοσημείωτες αποψιλώσεις δασών συνεχίζουν να λαμβάνουν χώρα παγκοσμίως προκαλώντας ανησυχίες σε χώρες όπως η Βραζιλία, η Ινδονησία και η Ρωσία (Michael, 2014). Επιπρόσθετα, η συνεχής αποψίλωση των δασών και η υποβάθμισή τους έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο κλίμα, στα οικοσυστήματα, στη βιωσιμότητα των οικοτόπων και στην επιβίωση των ειδών. Αναφορικά με τα εναπομείναντα δάση ελλοχεύει ο κίνδυνος αδυναμίας ικανοποίησης του οικολογικού τους ρόλου, δηλαδή να παρέχουν υπηρεσίες ζωτικής σημασίας στο οικοσύστημα.

Η αύξηση των ενεργειακών αναγκών τα τελευταία χρόνια συνέβαλε στην υψηλή συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, γεγονός το οποίο σύμφωνα με επιστημονικές μελέτες (Ciais et al., 2013; Friedlingstein et al., 2019) συνδέεται με την κλιματική αλλαγή και το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Για την ακρίβεια το CO₂ είναι το αέριο που παράγεται συχνότερα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες και ευθύνεται για το 63% της υπερθέρμανσης του πλανήτη που οφείλεται σ' αυτές τις δραστηριότητες. Η συγκέντρωσή του στην ατμόσφαιρα είναι σήμερα κατά 40% υψηλότερη από ό, τι κατά την έναρξη της εκβιομηχάνισης (European Commission, 2017). Τα δασικά οικοσυστήματα αποτελούν ρυθμιστικό παράγοντα στον βιογεωχημικό κύκλο του άνθρακα καθώς μέσω της φωτοσύνθεσης απορροφούν CO₂, έχουμε δηλαδή εκροή CO₂ από την ατμόσφαιρα. Με την αποψίλωσή τους ο άνθρακας που θα αποθηκευόταν σε αυτά ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα εντείνοντας έτσι το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Τα δασικά οικοσυστήματα επηρεάζουν επίσης και τις τοπικές και παγκόσμιες θερμοκρασίες καθώς και τη ροή της θερμότητας. Σε τοπική κλίμακα, τα δάση μπορούν να παραμείνουν πολύ πιο δροσερά κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω της σκίασης και να συμβάλλουν στη μείωση της θερμότητας μέσω της εξάτμισης και της διαπνοής (Pokorný et al., 2010; Maes et al., 2011; Hessleroná et al., 2013). Σε τροπικές και εύκρατες περιοχές, τα δάση ψύχουν την επιφάνεια της Γης. Αντίθετα, σε μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και ιδιαίτερα το χειμώνα, τα δάση έχουν μειώσει τη λευκαύγεια (albedo), συμβάλλοντας ενδεχομένως σε υψηλότερες θερμοκρασίες κάτω από

ουρανούς χωρίς σύννεφα (Lee et al., 2011; Li et al., 2015). Επιπλέον, τα δέντρα συντελούν στη μείωση των θερμοκρασιών στις αστικές περιοχές. Οι αστικές περιοχές με μεγαλύτερη κάλυψη δέντρων και βλάστησης και λιγότερες αδιαπέραστες επιφάνειες, τείνουν να εμφανίζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τις περιοχές που καλύπτονται από συμπαγείς επιφάνειες (Bounoua et al., 2015). Χωρίς την παρουσία ξυλώδους βλάστησης η ηλιακή ενέργεια, η οποία διαφορετικά θα μπορούσε να οδηγήσει στη διαπνοή και στην εξάτμιση, παραμένει στο τοπίο ως θερμότητα, αυξάνοντας με αυτό τον τρόπο τις τοπικές θερμοκρασίες.

Τα δαση παίζουν πρωταρχικό ρόλο και στο ενεργειακό ισοζύγιο καθώς μέσω της εξατμισοδιαπνοής επαναφορτίζουν την ατμόσφαιρα με υγρασία, συμβάλλοντας έτσι στις βροχοπτώσεις, τόσο σε τοπικό επίπεδο όσο και σε απομακρυσμένες τοποθεσίες. Η εξατμισοδιαπνοή επηρεάζει την εδαφική υγρασία και την παραγωγικότητα της βλάστησης αποτελώντας καθοριστικό παράγοντα του υδρολογικού κύκλου. Η διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής αποτελεί την κύρια δίοδο μεταφοράς της ηλιακής ενέργειας στο ενεργειακό σύστημα, μέσω της λανθάνουσας θερμότητας (LE) (Petrooulos et al., 2016). Επιπλέον, έχει χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για την εκτίμηση του κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιάς (Nishida et al., 2002), τον έλεγχο τοπικών κλιματικών χαρακτηριστικών (Jung et al., 2010; Srivastava et al., 2015c) και την παρακολούθηση των καλλιεργειών και των υδατικών πόρων (Buytaert et al., 2006; Srivastava et al., 2013b, 2015b).

Ως εκ τούτου, η αποψίλωση επηρεάζει τη θέρμανση του μικροκλίματος μιας περιοχής, συμβάλει στη μεταβολή της βροχόπτωσης και της διαθεσιμότητας νερού καθώς και της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Απώτερη συνέπεια της αποψίλωσης των δασών είναι η μείωση των κατακρημνίσεων, καθώς λιγότερο νερό μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα και η μείωση της νεφοκάλυψης, αυξάνοντας έτσι την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από την επιφάνεια της γης (Tölle et al. 2015). Το 18% της μέσης αύξησης της θερμοκρασίας μπορεί να εξηγηθεί από την αλλαγή χρήσεων/κάλυψης γης (Alkama και Cescatti, 2016).

1.2. Η συμβολή της γεωπληροφορικής στην παρακολούθηση των δασικών οικοσυστημάτων

Όπως προαναφέρθηκε, τα δάση διαδραματίζουν ουσιώδη και καθοριστικό ρόλο στη διατήρηση της βιοποικιλότητας και τη ρύθμιση του κλίματος σε παγκόσμιο επίπεδο. Μεταξύ των διάφορων κινδύνων που απειλούν τα δασικά οικοσυστήματα, οι δασικές πυρκαγιές κατατάσσονται υψηλά στην κλίμακα επικινδυνότητας. Συγκεκριμένα για την περιοχή της Μεσογείου, ο κίνδυνος των δασικών πυρκαγιών έχει αυξηθεί σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, ενώ αναμένεται να αυξηθεί ακόμη περισσότερο τα επόμενα χρόνια (Moreira et al.,2011;San-Miguel-Ayanz et al.,2013;State of Europe's Forests 2015). Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο πρόβλημα καθώς και οι τεράστιες αρνητικές επιπτώσεις που απορρέουν από αυτό, κρίνεται απαραίτητη η λεπτομερής και ακριβής πληροφόρηση αναφορικά με τις επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών στα δασικά οικοσυστήματα αλλά και της αντίδρασης που αυτά επιδεικνύουν μετά στο καταστροφικό συμβάν. Με την χρήση κατάλληλων αλγορίθμων καταγραφής των πληγείσων περιοχών, σε εκτενείς εκτάσεις και για μεγάλες χρονικές περιόδους, δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας επιχειρησιακών προϊόντων με ικανοποιητική χωροχρονική ακρίβεια (Chuvieco et al., 2019).

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π.), γνωστά ευρέως και ως Geographic Information Systems, (G.I.S.) «αποτελούν ένα σύνολο υλικού, λογισμικού και διαδικασιών το οποίο με την κατάλληλη χρήση υποστηρίζει τη συλλογή, διαχείριση, ανάλυση, μοντελοποίηση και παρουσίαση δεδομένων με χωρική αναφορά. Αποτελεί επίσης σημαντικό εργαλείο υποστήριξης λήψεων αποφάσεων στην επίλυση ποικίλων προβλημάτων διαχείρισης και σχεδιασμού» (Χαλκιάς, 2006). Τα Σ.Γ.Π. αποτελούν πολύ σημαντικό κλάδο της γεωπληροφορικής και συνδυάζονται με πολλά επιστημονικά πεδία, όπως η Γεωγραφία, η Τηλεπισκόπηση, η Βιολογία, η Δασολογία, η Πληροφορική, τα Μαθηματικά κ.α. Ιδιαίτερα σημαντικό επιστημονικό πεδίο στην Γεωπληροφορική αποτελεί η τηλεπισκόπηση, η οποία χρησιμοποιείται ευρέως ως μέσο χαρτογράφησης αλλά και παρακολούθησης της εξέλιξης των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα πάνω στην επιφάνεια της γης, καθώς καθιστά δυνατή την πλήρη

επόπτευση του περιβάλλοντος χωρίς παρέμβαση και από μεγάλες αποστάσεις. Στις εφαρμογές τηλεπισκόπησης εντάσσονται πέρα από τα δεδομένα που προέρχονται από δορυφόρο, η χρήση του sonar, του radar, των υπερήχων, της υπέρυθρης και υπεριώδους φωτογραφίας, της αεροφωτογραφίας κτλ. Οι εφαρμογές τηλεπισκόπησης παρουσιάζουν μια σειρά πλεονεκτημάτων που τις καθιστούν ιδιαίτερα δημοφιλείς σε ένα πλήθος περιβαλλοντικών εφαρμογών. Τα βασικότερα πλεονεκτήματά τους, ώστε να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο για περιβαλλοντικούς και διαχειριστικούς σκοπούς, είναι: (1) αρχικά η ικανότητα χωρικής αντίληψης μέσα από την χρήση δορυφορικών εικόνων, ειδικά σε δυσπρόσιτες και απομακρυσμένες περιοχές, (2) έπειτα η δυνατότητα διαχρονικών λήψεων εικόνων από τους δορυφόρους, με σκοπό την παρακολούθηση των δυναμικών φαινομένων που συντελούνται στην εκάστοτε περιοχή μελέτης λόγω κλιματικών ή άλλων αλλαγών, καθώς και (3) η λήψη εικόνων σε πολλές ζώνες του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με στόχο την παροχή επιπρόσθετων πληροφοριών στη διαδικασία της χαρτογράφησης αναφορικά με τις διαφορές μεταξύ των βιοφυσικών στοιχείων, διευκολύνοντας έτσι το διαχωρισμό τους - συγκριτικά με την χρησιμοποίηση μιας μόνο φασματικής ζώνης (Τοπάλογου κ.α.,2008;Σταυρακούδης κ.α., 2013;).

Η τηλεπισκόπηση αποτελεί βασικό εργαλείο για την ανάλυση του τοπίου με σκοπό την κατανόηση των δυναμικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα, τα δεδομένα τηλεπισκόπησης μπορεί να προέρχονται από αισθητήρες τηλεπισκόπησης τοποθετημένους σε δορυφορικές πλατφόρμες, αεροσκάφη ή ελικόπτερα καθώς και σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη(drones). Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή θεματικών χαρτών, οι οποίοι περιέχουν πληροφορίες για (Farina, 2008; Gulinck 2001):

- τους τύπους κάλυψης γης που συνθέτουν το μωσαϊκό του τοπίου
- τη γεωγραφική τους εξάπλωση,
- τη διάταξη των διαφόρων τύπων κάλυψης γης στο χώρο αλλά και της χρονικής μεταβολής τους.

Όσον αφορά την αειφόρο διαχείριση των δασών, μια βασική προϋπόθεση είναι η καθιέρωση και διατήρηση της απογραφής των δασικών αποθεμάτων, ούτως ώστε να παρέχονται ακριβείς και έγκαιρες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση του δάσους,

και τους ποικίλους σκοπούς που αυτό εξυπηρετεί (White et al., 2016). Οι πληροφορίες που απαιτούνται για μια δασική απογραφή αφορούν τον όγκο της ξυλείας, το μέσο ύψος της βάσης και τη μέση διάμετρο του κορμού (Gillis et al., 2005). Οι προαναφερθείσες πληροφορίες είναι απαραίτητες στο πλαίσιο ενός στρατηγικού σχεδιασμού διαχείρισης του δάσους, ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούνται για την παροχή μιας σειράς αγαθών και υπηρεσιών, λόγου χάριν των χαρακτηριστικών των ενδαιτημάτων, της βιοποικιλότητας και των αποθεμάτων άνθρακα (Laamanenand, 2011). Η μείζονος σημασίας πρόοδος τόσο στην πρόσβαση όσο και στην ποιότητα των δορυφορικών δεδομένων, ιδιαίτερα με τη διάθεση του αρχείου του Landsat το 2008 (Woodcock et al., 2008; Wulder et al., 2012b), προσφέρει νέες ευκαιρίες για στρατηγική ανάπτυξη στην απογραφή των δασών.

Τα μαθηματικά ομοιώματα, κοινώς χαρακτηριζόμενα ως “μοντέλα” (όρος ο οποίος θα υιοθετηθεί εφεξής στην παρούσα διπλωματική), Μεταφοράς Επιφάνειας-Βλάστησης-Ατμόσφαιρας (Surface-Vegetation-Atmospheric-Transfer) αποτελούν μια ειδική κατηγορία ντετερμινιστικών μοντέλων προσομοίωσης. Τα μοντέλα αυτά στοχεύουν στην περιγραφή των φυσικών διεργασιών που ελέγχουν την ενέργεια και τις μαζικές μεταφορές στο αλληλοεξαρτώμενο σύστημα έδαφος/βλάστηση/ατμόσφαιρα (ακτινοβολίας, τυρβώδεις και μεταφορά νερού), για την παροχή εκτιμήσεων των μεταβλητών σε λεπτομερές χρονικό βήμα (Olioso et. al. 1999).

Η συνδυαστική χρήση μαθηματικών μοντέλων και δεδομένων προερχόμενων από τηλεπισκοπικές παρατηρήσεις καθώς και η διαχείρισή τους μέσω ενός ΣΓΠ αποτελούν ένα τομέα πολλά υποσχόμενο (Moran et al., 2004; Petropoulos et al., 2009a), ιδιαίτερα υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής. Μέσω αυτών καθίσταται δυνατή η λεπτομερής περιγραφή των φυσικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια της γης. Παράλληλα, με τη χρήση δεδομένων τηλεπισκόπησης παρέχεται μια πλούσια φασματική πληροφορία για εκτενείς εκτάσεις με χωρική συσχέτιση, σε επαναλαμβανόμενο χρόνο (Ridler et al., 2012). Ως αποτέλεσμα των πλεονεκτημάτων της συνδυαστικής αυτής χρήσης, έχουν προταθεί διαφορετικές προσεγγίσεις της κοινής χρήσης των SVAT μοντέλων με τα δεδομένα τηλεπισκόπησης. Μία εμπειρισταωμένη

ανασκόπηση των τεχνικών αυτών δίνεται μεταξύ άλλων από τους (Olioso et al., 2002). Η συγκεκριμένη προσέγγιση διακρίνει τις μεθόδους στις i) “εξαναγκαστικές” (forcing), όπου το μοντέλο λαμβάνει απευθείας δεδομένα, όπως θερμοκρασία της επιφάνειας ή εδαφική υγρασία, προερχόμενα από τηλεπισκοπικές παρατηρήσεις (π.χ. Bruckler και Witono, 1989). ii) “επαναβαθμονόμησης”, όπου ορισμένοι παράμετροι εισόδου του SVAT μοντέλου ρυθμίζονται με βάση την ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ των προσομοιωμένων τιμών και αυτών που προήλθαν από δορυφορικές παρατηρήσεις (Olioso et al., 1996).iii) “ειδική επαναβαθμονόμηση”, που είχε αρχικά προταθεί από τον (Carlson et al., 1981) και μετέπειτα τροποποιήθηκε από τον (Gillies et al., 1997). Στην παρούσα μέθοδο χρησιμοποιείται ένα διάγραμμα διασποράς της επιφανειακής θερμοκρασίας (Surface temperature, T_s) και ενός δείκτη βλάστησης (Vegetation Index, VI), προερχόμενο από δορυφορικές παρατηρήσεις, σε συνδυασμό με τις προσομοιώσεις από ένα SVAT μοντέλο, επονομαζόμενο SimSphere. Ως αποτέλεσμα ορίζεται η παραγωγή χωρικών εκτιμήσεων της λανθάνουσας (Latent Heat - LE) και αισθητής (Sensible Heat - H) ροής θερμότητας καθώς και της επιφανειακής υγρασίας εδάφους (Surface Moisture - Mo).

Το SVAT μοντέλο SimSphere έχει κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί σε ποικιλόμορφα οικοσυστήματα, είτε ως αυτόνομο εργαλείο είτε συνεργατικά με δεδομένα προερχόμενα από δορυφορικές παρατηρήσεις. Η επιτυχής εφαρμογή του μοντέλου σε ποικίλους τύπους οικοσυστημάτων επιβεβαιώνει την ικανότητα του να ανταποκρίνεται στην περιγραφή των περίπλοκων φυσικών διεργασιών του φυσικού περιβάλλοντος (North et al., 2015; Petropoulos et al., 2015). Οι εκτεταμένες μελέτες ανάλυσης ευαισθησίας που έχουν πραγματοποιηθεί στο μοντέλο (Olioso et al., 1996; Petropoulos et al., 2009b; 2013; 2014; 2015) έχουν επίσης επιτρέψει την ποσοτικοποίηση των παραμέτρων εισόδου που επηρεάζουν τις προσομοιώσεις του μοντέλου. Αυτό συνέβαλε στην βελτίωση της αρχιτεκτονικής του. Ο συνδυασμός του μοντέλου SimSphere με προϊόντα προερχόμενα από δορυφορικές παρατηρήσεις έχει οδηγήσει αρκετές διαστημικές υπηρεσίες στην διερεύνηση της χρήσης του μοντέλου για την ανάπτυξη επιχειρησιακών προϊόντων που αφορούν την εξατμισοδιαπνοή και την εδαφική υγρασία (Chauhan et al., 2003; ESA STSE, 2012).

Η πιο εξελιγμένη έκδοση του παραπάνω μοντέλου, το ονομαζόμενο ως “Sim2DSphere” που δημιουργήθηκε από τους (Petrooulos et al., 2019), λειτουργεί σαν αυτόνομο εργαλείο υπολογισμού διάφορων παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις φυσικές διεργασίες. Η κυριότερη διαφορά του με την προηγούμενη έκδοση (SimSphere) έγκειται στο ότι μπορεί να χρησιμοποιεί απευθείας δορυφορικά δεδομένα και να εκτελεί τις φυσικές διεργασίες ανά εικονοστοιχείο, με αυτό τον τρόπο προσφέρει στο χρήστη ένα φιλικό περιβάλλον υπολογισμού των διάφορων παραμέτρων των φυσικών διεργασιών σε πολύ υψηλή χωροχρονική ανάλυση. Η τελευταία περιορίζεται μόνο από την χωρική ανάλυση των δεδομένων εισόδου που δίνονται στο μοντέλο και την επιλογή του χρήστη όσον αφορά το χρονικό βήμα προσομοίωσης. Επιπλέον, μία ακόμη σημαντική βελτίωση αφορά την δυνατότητα εφαρμογής του Sim2DSphere για παραπάνω από έναν τύπου κάλυψης/χρήσης γης ταυτόχρονα για μια δεδομένη περιοχή.

Η χρήση του μοντέλου βιόσφαιρας Sim2DSphere μπορεί να ενισχύσει και να κατευθύνει την διαχείριση του δάσους, με την παρακολούθηση της ευρωστίας του. Επίσης μπορεί να συμβάλει στην πρόληψη των δασικών πυρκαγιών, φαινόμενο το οποίο αποτελεί πληγή σε παγκόσμιο επίπεδο για τις δασικές εκτάσεις καθώς επίσης και στην παρακολούθηση και αποκατάσταση της πληγείσας περιοχής μετά την πυρκαγιά. Μία ακόμη θετική επίδραση του μοντέλου στα δασικά οικοσυστήματα θα είναι στην περίπτωση των αναδασώσεων. Μέσω των εκτιμήσεών του σε χρονικά βήματα με βάση τις ατμοσφαιρικές διεργασίες, καθώς και με τις λεπτομερείς περιγραφές για πολλές εδαφικές και βλαστητικές λειτουργίες, προσφέρει στον διαχειριστή μια ρεαλιστική εικόνα των ειδικών συνθηκών που επικρατούν σε μια τοποθεσία.

1.3. Σκοπιμότητα και στόχοι έρευνας

Κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να γίνει μια πρώτη εκτίμηση του νέου μοντέλου βιόσφαιρας Sim2DSphere σε δασικό και χορτολιβαδικό περιβάλλον, εστιάζοντας στην διερεύνηση της ακρίβειάς του να υπολογίζει ορισμένες από τις σημαντικότερες παραμέτρους του ενεργειακού ισοζυγίου. Πιο συγκεκριμένα, θα πραγματοποιηθεί μια αρχική διερεύνηση και ποσοτικοποίηση της ικανότητας του

Sim2DSphere, σε συνδυασμό με τη χρήση δορυφορικών δεδομένων υψηλής χωρικής ανάλυσης από τους δορυφόρους ASTER και IKONOS, για τον υπολογισμό παραμέτρων όπως η καθαρή ακτινοβολία (R_n), η λανθάνουσα ροή θερμότητας (LE), η αισθητή ροή θερμότητας (H) κτλ σε πραγματικές περιοχές στην Ολλανδία, για τις οποίες υπάρχουν διαθέσιμες επικυρωμένες μετρήσεις από το παγκόσμιο επιχειρησιακό δίκτυο FLUXNET (Baldocchi et al., 1996). Επιπρόσθετα, για τις παραπάνω πειραματικές συνθήκες θα διεξαχθεί μια σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων που παρήχθησαν από το Sim2DSphere σε σχέση με αυτές του SimSphere 1D. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής έχουν ως στόχο συνολικά να επιβεβαιώσουν την αξιοπιστία του Sim2DSphere, ως ένα αξιόπιστο εργαλείο υπολογισμού παραμέτρων του ενεργειακού ισοζυγίου.

1.4. Περιγραφή της δομής της εργασίας

Η δομή της διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη: στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται μέσα από μια σύντομη και ενδελεχή βιβλιογραφική ανασκόπηση η εξέλιξη του αρχικού μοντέλου SimSphere έως τη σημερινή του μορφή Sim2DSphere. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην συγκεκριμένη έρευνα. Αυτή αφορά την περιγραφή της περιοχής μελέτης, τον τρόπο απόκτησης και επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, την παραμετροποίηση του μοντέλου και τη διαδικασία στατιστικής επαλήθευσης των αποτελεσμάτων. Το τέταρτο κεφάλαιο αφορά στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των δύο μοντέλων. Τέλος, στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης και προτείνονται κατευθύνσεις για τη μελλοντική συνέχιση της έρευνας.

2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Εισαγωγή στη χρήση των SVAT μοντέλων

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα μοντέλα SVAT επιτρέπουν την περιγραφή των φυσικών διεργασιών του συστήματος έδαφος-βλάστηση-ατμόσφαιρα με λεπτομερές χρονικό βήμα (συνήθως μικρότερο της μιας ώρας). Ένα επιπλέον πλεονέκτημα των μοντέλων αυτών είναι ότι έχουν την ικανότητα να παράσχουν προβλέψεις ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις φυσικές διεργασίες (Petrooulos et al., 2009). Η ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων των μοντέλων αυτών εξαρτάται από παράγοντες όπως η πολυπλοκότητα της αρχιτεκτονικής τους, ο αντιπροσωπευτικός καθορισμός των δεδομένων εισόδου που απαιτούνται για την παραμετροποίηση τους, παράγοντες οι οποίοι σχετίζονται με τις ειδικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή για την οποία παραμετροποιούνται (πχ σε σχέση με το μικροκλίμα, βιοφυσικά και γεωφυσικά χαρακτηριστικά)(Petrooulos et al., 2009). Ένας σημαντικός δυνητικά περιοριστικός παράγοντας της χρήσης των SVAT μοντέλων έχει να κάνει με τον μεγάλο αριθμό των παραμέτρων που συνήθως απαιτούνται κατά την παραμετροποίηση τους, καθώς δεν είναι πάντα εύκολο να είναι διαθέσιμα για μια δεδομένη περιοχή. Επίσης τα μοντέλα αυτά δεν είναι σε θέση να παράγουν χωρικά αποτελέσματα καθώς περιγράφουν τις φυσικές διεργασίες κατακόρυφα (Petrooulos et al., 2013).

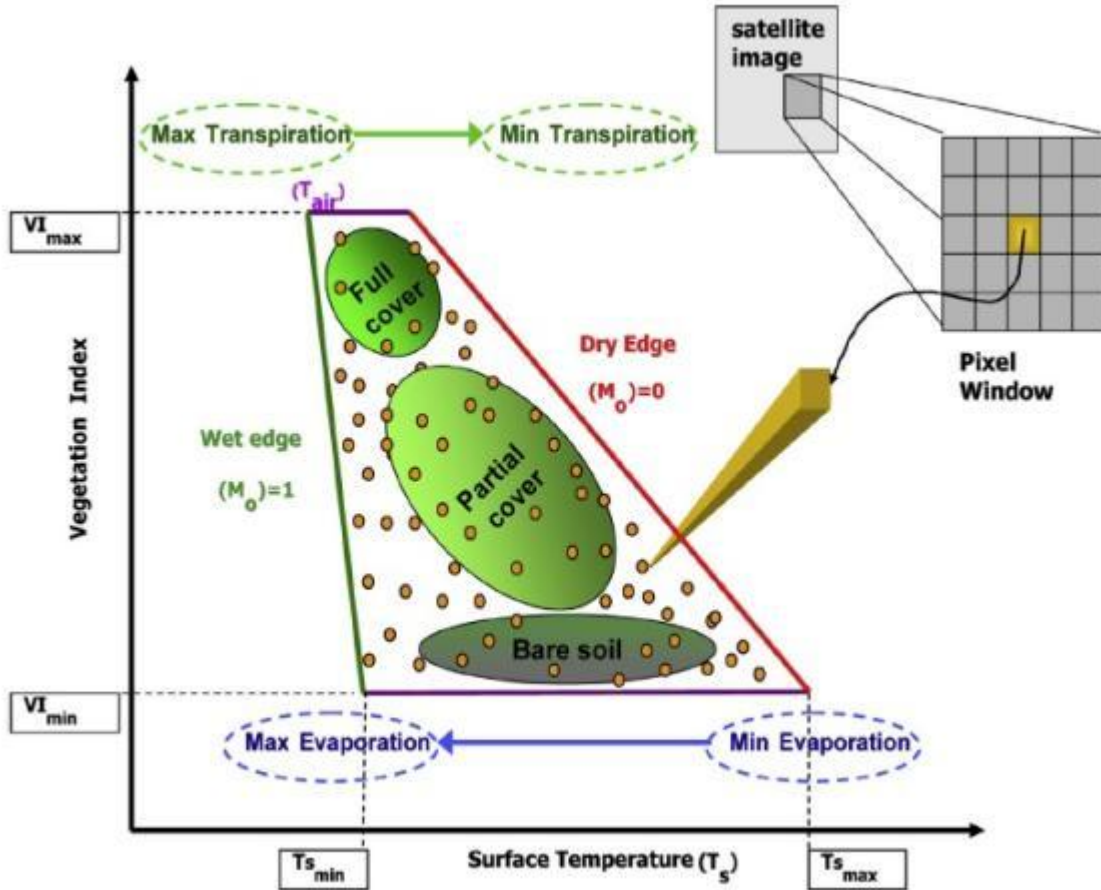
Ο λόγος που τα τελευταία χρόνια πολλές μελέτες έχουν ασχοληθεί με τη συνεργιστική χρήση των μοντέλων SVAT με δεδομένα προερχόμενα από τηλεπισκόπηση, είναι τα πλεονεκτήματα που προσφέρει ο συνδυασμός τους. Αφενός τα δορυφορικά δεδομένα τροφοδοτούν το μοντέλο με πληροφορίες υψηλής χωρικής και φασματικής ανάλυσης ενώ παράλληλα παρέχουν επαναληψιμότητα στην καταγραφή της παραπάνω πληροφορίας για μια δεδομένη περιοχή και αφετέρου τα μαθηματικά μοντέλα προσφέρουν μια κατακόρυφη κάλυψη σε λεπτομερές χρονικό βήμα. Βάσει των ανωτέρω πολλοί ερευνητές (Moran et al., 2004; Petrooulos et al., 2009a) υποστηρίζουν πως ο συνδυασμός SVAT μοντέλων και δεδομένων προερχόμενων από

τηλεπισκόπηση αποτελεί μια από τις πιο ελπιδοφόρες προσεγγίσεις εκτίμησης της εδαφικής υγρασίας και άλλων παραμέτρων.

Οι βασικές κατηγορίες των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη συνεργιστική χρήση των δορυφορικών δεδομένων με τα SVAT μοντέλα, συνοψίζονται στις εξής (π.χ δές Carlson, 2007),:

- i) “μέθοδοι επιβαλλόμενων δεδομένων εισόδου” (γνωστών στην διεθνή βιβλιογραφία ως forcing), όπου το μοντέλο λαμβάνει απευθείας δεδομένα, όπως θερμοκρασία της επιφάνειας ή εδαφική υγρασία, προερχόμενα από τηλεπισκοπικές παρατηρήσεις (π.χ.Bruckler and Witono, 1989).
- ii) “μέθοδοι επαναβαθμονόμησης” (γνωστών στην διεθνή βιβλιογραφία ως recalibration), όπου ορισμένες παράμετροι εισόδου του SVAT μοντέλου ρυθμίζονται με βάση την ελαχιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ των προσομοιωμένων τιμών και αυτών που προήλθαν από δορυφορικές παρατηρήσεις (Oliosio et al., 1996).
- iii) “μέθοδοι ειδικής επαναβαθμονόμησης (γνωστών στην διεθνή βιβλιογραφία ως special recalibration)” ή “μέθοδοι τριγώνου (γνωστών στην διεθνή βιβλιογραφία ως triangle)”.

Στην τελευταία μέθοδο χρησιμοποιούνται ένα διάγραμμα διασποράς (scatterplot) της επιφανειακής θερμοκρασίας (Ts) και της βλάστησης (VI), παράμετροι οι οποίες έχουν υπολογιστεί από αισθητήρες τηλεπισκόπησης, και προσομοιώσεις από ένα SVAT μοντέλο. Το αποτέλεσμα του ως άνω συνδυασμού είναι η παραγωγή χωρικών εκτιμήσεων της λανθάνουσας (γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία ως Latent Heat - LE) και αισθητής (γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία ως Sensible Heat-H) ροής θερμότητας καθώς και της επιφανειακής υγρασίας εδάφους (γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία ως Surface Moisture- Mo) (Carlson, 2007). Όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.1**, κάθε κίτρινη τελεία αντιπροσωπεύει ένα εικονοστοιχείο, το οποίο λόγω της προέλευσής του από αισθητήρες τηλεπισκόπησης, εμπεριέχει ως πληροφορία τις φυσικές ιδιότητες του σημείου που αντιστοιχεί στο έδαφος. Για τη δημιουργία του διαγράμματος διασποράς Ts/ VI γίνεται αφαίρεση των περιοχών που καλύπτονται με νερό και σύννεφα.



Εικόνα 2.1. Σύνοψη των κυριότερων φυσικών διεργασιών από το δορυφορικά (ή αερομεταφερόμενα) προερχόμενο διάγραμμα διασποράς T_s/VI (Petropoulos et al., 2013).

Η τριγωνική/τραπεζοειδής αναπαράσταση (εικόνα 2.1) χαρακτηρίζεται από τέσσερα όρια. Το “ξηρό ή ζεστό όριο” (γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία ως dry or warm edge), το οποίο αντιπροσωπεύει συνθήκες με ελάχιστη επιφανειακή εδαφική υγρασία και μηδενική εξάτμιση. Το “υγρό ή κρύο όριο” (γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία ως wet or cold edge) το οποίο αφορά σε εικονοστοιχεία με οριακά μέγιστη εδαφική υγρασία. Η βάση και η κορυφή του τριγώνου/τραπέζιου, αφορούν σε περιοχές με γυμνό έδαφος και πλήρη κάλυψη βλάστησης αντίστοιχα. Τέλος όσον αφορά τα εικονοστοιχεία που βρίσκονται μέσα στο τρίγωνο/τραπέζιο αντιπροσωπεύουν εκτάσεις με ποικίλη βλάστηση και εδαφική υγρασία, γυμνά εδάφη καθώς και περιοχές με πυκνή βλάστηση.

Επομένως, η χαμηλή μεταβλητότητα της T_s , σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται από το νερό του εδάφους που καλύπτεται από πυκνή βλάστηση αλλά

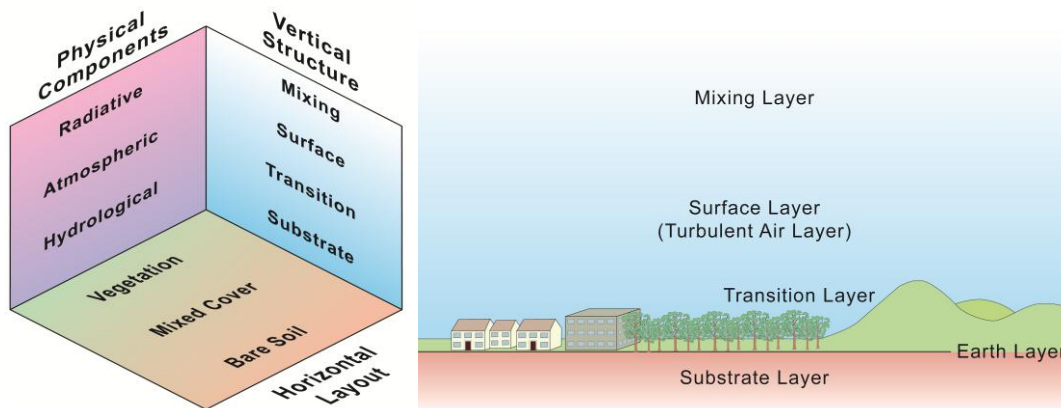
εμφανίζει υψηλή ευαισθησία για τις περιοχές με γυμνό έδαφος, είναι ο λόγος δημιουργίας του ως άνω τριγώνου/τραπεζίου Ts/VI.

Συνοψίζοντας, η παραπάνω μέθοδος εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με αντίστοιχες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της επιφανειακής υγρασίας και της εξατμισοδιαπνοής. Ενδεικτικά αναφέρονται σε αυτά, ο γρήγορος και σχετικά απλός υπολογισμός των ως άνω παραμέτρων με τη χρήση εικόνων προερχόμενων από τηλεπισκόπηση. Αυτό επιτυγχάνεται γιατί τα εικονοστοιχεία της εικόνας δημιουργούν τις απαιτούμενες συνθήκες για την εφαρμογή της μεθόδου έτσι ώστε δεν απαιτείται από το χρήστη η εφαρμογή κάποιου ατμοσφαιρικού ή άλλου ειδικού μοντέλου εδάφους και δεν χρειάζεται ατμοσφαιρική διόρθωση. Επίσης με τη δυνατότητα εισαγωγής εικόνων με επαναληψιμότητα στις καταγραφές, όπως είναι οι δορυφορικές, επιτυγχάνεται η προσθήκη της χρονικής διάστασης στις παρατηρήσεις.

Μολαταύτα, μεγαλύτερη αδυναμία της μεθόδου τριγώνου μπορεί να θεωρηθεί η υποκειμενικότητα που απαιτείται από τον ερμηνευτή για την αναγνώριση των περιοχών που περιγράφηκαν παραπάνω ως “ξηρό ή ζεστό όριο” (γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία ως dry or warm edge) και “υγρό ή κρύο όριο” (γνωστό στην διεθνή βιβλιογραφία ως wet or cold edge). Εντούτοις, με τη χρήση εικόνων υψηλής ανάλυσης διευκολύνεται ο καθορισμός τους (Carlson, 2007).

2.2. Εισαγωγή στο SVAT μοντέλο SimSphere

Το SimSphere είναι ένα μονοδιάστατο SVAT μοντέλο, το οποίο μέσω των τεχνικών τριγώνου/τραπεζίου που προαναφέρθηκαν έχει χρησιμοποιηθεί τόσο αυτόνομα όσο και συνδυαστικά με δεδομένα Τηλεπισκόπησης. Αρχικά δημιουργήθηκε από τους Carlson και Boland (1978) και Lynn και Carlson (1990), και τροποποιήθηκε στη συνέχεια από τους (Gillies et al., 1997) και (Petropoulos et al., 2013). Όπως φαίνεται και στην **εικόνα 2.2** το μοντέλο αρχιτεκτονικά απαρτίζεται από τρία μέρη, “το φυσικό, το κατακόρυφο και το οριζόντιο”.



Εικόνα 2.2. Βασική δομή του μοντέλου SimSphere , με τα τρία διαφορετικά μέρη “φυσικό, κατακόρυφο,οριζόντιο” (Petropoulos et al., 2013).

Το φυσικό μέρος εκφράζει τις μικροκλιματικές συνθήκες, το κατακόρυφο αφορά το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα και τέλος το οριζόντιο, αναφέρεται σε μια απροσδιόριστη χωρικά περιοχή η έκταση της οποίας καθορίζεται από τις συνθήκες που δίνονται κατά τη διαδικασία της παραμετροποίησης του.

Αναλυτικότερα, το οριζόντιο τμήμα αναφέρεται στον προσδιορισμό της ποικιλομορφίας της βλάστησης και τον τρόπο κατανομής της στην επιφάνεια. Το ποσοστό φυτοκάλυψης ανά μονάδα επιφάνειας (Fractional Vegetation Cover) συμβολίζεται με το δείκτη (F_r) και (F_r-1) αντίστοιχα και οι τιμές του κυμαίνονται από το 0-1,0. Όσον αφορά το κατακόρυφο τμήμα, το μοντέλο ξεκινώντας από τις 06:00 τοπική ώρα εκτελεί προσομοιώσεις για ένα μεγάλο αριθμό παραμέτρων των φυσικών διεργασιών, σε συνάρτηση με το χρόνο. Οι

προσομοιώσεις αφορούν στην περιοχή μεταξύ του ριζικού συστήματος και του ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος και το χρονικό τους βήμα καθορίζεται από το χρήστη. Η εισερχόμενη ακτινοβολία μικρού μήκους (γνωστή στην διεθνή βιβλιογραφία ως shortwave in coming radiation) και η εξερχόμενη ακτινοβολία μεγάλου μήκους (γνωστή στην διεθνή βιβλιογραφία ως downward longwave radiation) εκτιμώνται με πανομοιότυπο τρόπο για τις περιοχές με γυμνό έδαφος και για αυτές που καλύπτονται από βλάστηση. Ο διαχωρισμός της ακτινοβολίας υπολογίζεται ως συνάρτηση της πυκνότητας της φυτοκάλυψης. Παρομοίως, η λανθάνουσα (LE) και αισθητή ροή θερμότητας (H), η ροή της εξερχόμενης μεγάλου μήκους ακτινοβολίας πάνω από το φύλλωμα της βλάστησης καθώς και η εδαφική ροή θερμότητας (G) υπολογίζονται ως σταθμικός μέσος όρος (weighted averages) του γυμνού εδάφους και της βλάστησης, με βάση το ποσοστό φυτοκάλυψης που ορίστηκε στα δεδομένα εισόδου του μοντέλου.

Για την εκτέλεση των προσομοιώσεων από το SimSphere απαιτούνται 53 αρχικές παράμετροι, οι οποίες επιμερίζονται σε επτά κατηγορίες: χρονικές, βλάστησης, εδαφικές, επιφανειακές, υδρολογικές, μετεωρολογικές, εδαφικές και ατμοσφαιρικές. Ως τελικό αποτέλεσμα λαμβάνονται οι 32 σημαντικότερες μεταβλητές που σχετίζονται με το ενεργειακό ισοζύγιο.

Οι (Petrooulos et al., 2009) διέκριναν τέσσερις βασικές κατηγορίες στις μελέτες, που αφορούν τις διαφορετικές χρήσεις του μοντέλου: α) σε αυτές που πιστοποίησαν την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του, μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας είτε μέσω άλλης μεθόδου ανάλυσης, β) σε αυτές που χρησιμοποίησαν το μοντέλο για την εξερεύνηση υποθετικών σεναρίων τα οποία αξιολόγησαν μέσω διαφόρων μελετών ανάλυσης, πλην της ανάλυσης ευαισθησίας, γ) σε αυτές που ασχολήθηκαν με τη συνεργιστική χρήση των SVAT μοντέλων και των δεδομένων προερχόμενων από τηλεπισκόπηση και δ) σε αυτές που εφάρμοσαν τροποποιήσεις στην αρχιτεκτονική του μοντέλου.

Στον **πίνακα 2.3** που ακολουθεί παρατίθενται κάποια ενδεικτικά συγγράμματα από την πρόσφατη βιβλιογραφία, που ανήκουν στις ως άνω κατηγορίες. Ένα αντιπροσωπευτικό και πρόσφατο παράδειγμα της πρώτης κατηγορίας αποτελεί η μελέτη από τους (Ireland et al., 2015), όπου μέσω της μεθόδου Gaussian Emulation Machine for Sensitivity Analysis (GEM-SA) εξετάστηκε η ευαισθησία του μοντέλου στον υπολογισμό της

συγκέντρωσης CO₂ και O₃ στο περιβάλλον και του ρυθμού απορρόφησής τους από τα φυτά. Εκτός από την ανάλυση ευαισθησίας, άλλες μέθοδοι ανάλυσης έχουν χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της εγκυρότητας του μοντέλου. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει η μελέτη των (North et al., 2015), όπου αποδεικνύεται η δυνατότητα του SimSphere να προσομοιώνει με ακρίβεια σημαντικές παραμέτρους που σχετίζονται με το ενεργειακό ισοζύγιο. Όσον αφορά την τρίτη κατηγορία, παράδειγμα αποτελεί η έρευνα των (Petropoulos et al., 2013) όπου έγινε χρήση της ανάλυσης ευαισθησίας με βάση τη θεωρία του Bayesian Theory και τα αποτελέσματα της αποτέλεσαν αντικείμενο συζήτησης για τη χρήση του μοντέλου είτε ως αυτόνομο εργαλείο είτε συνεργατικά με τηλεσκοπικά δεδομένα. Τέλος, τα τελευταία χρόνια έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες που αφορούν την βελτίωση του κώδικα του ίδιου του μαθηματικού μοντέλου. Παραδείγματος χάριν, οι (Anagnostopoulos et al., 2017) όπου παρουσιάστηκε μια τροποποιημένη έκδοση του μοντέλου, το SimSphere-SOA.

Πίνακας 2.3. Συνοπτικός πίνακας με τις πιο πρόσφατες μελέτες που αφορούν το μοντέλο SimSphere

Κατηγοριοποίηση της χρήσης του μοντέλου SimSphere	Ενδεικτικές αναφορές συγγραμμάτων
A) Αξιολόγηση της εγκυρότητας του μοντέλου α) μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας, β) μέσω άλλων μεθόδων ανάλυσης	1.(Petropoulos et al. 2009), 2.(Petropoulos et al. 2014), 3.(Ireland et al. 2015), 4. (North et al. 2015)
B) Εξερεύνηση υποθετικών σεναρίων με τη χρήση άλλων μελετών ανάλυσης	5.(Carlson et al., 1996), 6.(Granz et al.,1999),
Γ) Συνδυαστική χρήση SVATμοντέλων και δορυφορικών δεδομένων	7.(Carlson et al., 2000), 8.(Chauhan et al., 2003), 9.(Arthur et al., 2003), 10.(Petropoulos et al., 2013)
Δ) Αρχιτεκτονική του μοντέλου	11.(Carlson et al., 2007), 12.(Petropoulos et al. 2013), 13.(Anagnostopoulos et al. 2017)

Αναλυτικότερα σχετικά με το εξελιγμένο μοντέλο SimSphere-SOA, οι αλλαγές αφορούσαν κυρίως τροποποιήσεις στον αρχικό του κώδικα. Ενώ η πρώτη έκδοση του μοντέλου SimSphere 1D διευκόλυνε τη χρήση του λόγω της απλής αρχιτεκτονικής του, η εφαρμογή του ήταν περιορισμένη, ιδιαίτερα σε ετερογενείς εκτάσεις καθώς περιλάμβανε μόνο ένα τύπο βλάστησης ανά σενάριο προσομοίωσης.

Παρακάτω ακολουθεί μία σύνοψη των κύριων χαρακτηριστικών του μοντέλου :

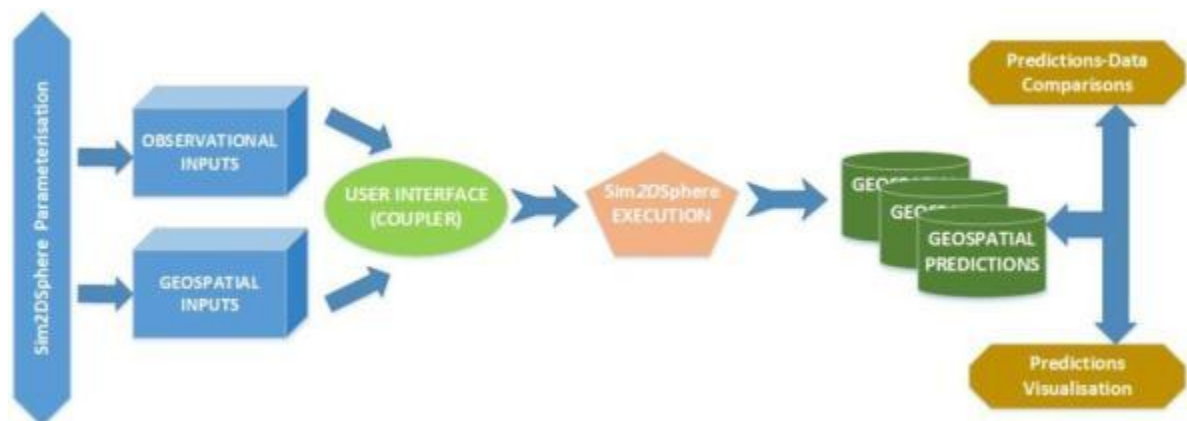
1. Καινοτομία στον έλεγχο εγκυρότητας των παραμέτρων, ο οποίος μπορεί να εξαχθεί σε XML Schema Definition (XSD) κωδικοποίηση. Σε αντίθεση με την προηγούμενη Document Type Definition (DTD) μορφή επαλήθευσης, η XSD μπορεί να καταγράψει τα σφάλματα παρέχοντας μεγαλύτερη ακρίβεια στην ανάλυση ευαισθησίας, καθώς δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει έγκυρες τιμές(values) πριν την οριστική υποβολή.
2. Επιτρέπει στο χρήστη την ανάλυση των παραμέτρων εισόδου από ένα αρχείο σε μορφή .csv, εξασφαλίζοντας έτσι τη συμβατότητα του αρχείου σε πολλές εφαρμογές.
3. Βελτίωση στη δυνατότητα συντήρησης της εφαρμογής, μείωση του μεγέθους του κώδικα και ευελιξία στο αρχικό μοντέλο. Οι δύο πρώτες βελτιώσεις επήλθαν λόγω της αυτοματοποίησης της διαδικασίας επαλήθευσης. Η ευελιξία του μοντέλου οφείλεται στην βελτίωση του σχεδιασμού του Service Oriented Architecture (SOA)(Anagnostopoulos et al., 2017).

Σε συνέχεια της εξέλιξης του ως άνω μοντέλου από πλευράς κώδικα, το 2019 δημιουργήθηκε από τους (Petrooulos et al., 2019) το Sim2DSphere, αναφορά στο οποίο γίνεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

2.3. Περιγραφή του νέου μοντέλου Sim2DSphere

Το Sim2DSphere (Petrooulos et al., 2019) αποτελεί μια πολύ σημαντική εξέλιξη του υπάρχοντος μοντέλου SimSphere, που είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αυτόνομου ανοιχτού λογισμικού. Το μοντέλο προσφέρει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον για τον υπολογισμό πολλών σημαντικών παραμέτρων των φυσικών διεργασιών, σε δυναμικά πολύ υψηλή χωροχρονική ανάλυση. Αυτό επιτυγχάνεται συνδυάζοντας τη χρήση ελεύθερα διαθέσιμων δεδομένων Τηλεπισκόπησης και άλλων κατάλληλων γεωχωρικών δεδομένων με δεδομένα επίγειων μετρήσεων.

Σημαντική εξέλιξη στο μοντέλο αποτελεί η προσθήκη της χωρικής διάστασης στις προσομοιώσεις. Τα προγνωστικά αποτελέσματα που εξάγονται από το μοντέλο είναι ορατά, ανιχνεύσιμα και αναπαράξιμα και η χωρική τους ανάλυση είναι ανάλογη αυτής των τηλεσκοπικών δεδομένων εισόδου.



Εικόνα 2.4.: Η αρχιτεκτονική και εκτέλεση του μοντέλου Sim2DSphere, περιλαμβάνονται οι τυπικές χρήσεις για μια πειραματική εφαρμογή.

Το Sim2DSphere διατίθεται σε Java και ως εκ τούτου έχει τη δυνατότητα να εκτελεστεί σε ένα εύρος λειτουργικών συστημάτων (Microsoft, Linux και OSX). Προκειμένου να εξασφαλιστεί η παράλληλη εκτέλεση των υπολογισμών, οι παράμετροι που πρόκειται να διαμορφωθούν κατηγοριοποιούνται σε δύο κλάσεις, σε αυτές που παρουσιάζουν χωρική διακύμανση και σε αυτές που προσεγγιστικά η μεταξύ τους σχέση είναι σταθερή. Μια καινοτομία που προέκυψε από το διαχωρισμό των παραμέτρων είναι η εκτέλεση ανεξάρτητων προσομοιώσεων ανά εικονοστοιχείο και κατά συνέπεια η δυνατότητα

προσθήκης δισδιάστατων χαρτών που αντιπροσωπεύουν τη χωρική μεταβλητότητα των παραμέτρων (spatially variable parameters). Βασική προϋπόθεση είναι οι εικόνες που θα εισαχθούν να έχουν την ίδια χωρική κλίμακα αναφοράς. Για την ενσωμάτωση δισδιάστατων χαρτών στο μοντέλο δημιουργήθηκε ένα εργαλείο που επιτρέπει την εισαγωγή ενός αρχείου με τις παραμέτρους σε μορφή XML και ένα κánaβο. Με αυτό τον τρόπο το εργαλείο μπορεί να εκτελεί την ίδια προσομοίωση ανά εικονοστοιχείο, θεωρώντας όλες τις παραμέτρους ως σταθερές (constant). Η διαθεσιμότητα αρχείων εικόνας (raster file) για μια συγκεκριμένη παράμετρο την μετατρέπει αυτόματα σε χωρική μεταβλητή. Για να είναι αξιόπιστες οι προγνώσεις του μοντέλου πρέπει να εισαχθούν κατ' ελάχιστον ως μεταβλητές το γεωγραφικό μήκος και πλάτος της περιοχής στην οποία εφαρμόζεται. Η αρχική χρονική πληροφορία διατηρείται ώστε τα αποτελέσματα να αποτελούν μια σειρά από εικόνες με χρονική συνέχεια. Το γραφικό περιβάλλον διεπαφής (Graphical User Interface-GUI), που θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο, παίζει πρωτεύοντα ρόλο στο μοντέλο καθώς προσφέρει στο χρήστη τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει τις λειτουργίες της εισαγωγής και τροποποίησης των παραμέτρων, μέσω του GUI ή της γραμμής εντολών. Επιπλέον, λόγω της δυνατότητας εφαρμογής του σε περιβάλλον υπολογιστικού νέφους (cloud environment) και σε συνδυασμό με την ικανότητά του να εκτελεί παράλληλα τις μετατροπές και τις προβλέψεις, λόγω της Java 8, καθίσταται δυνατός ο χειρισμός μεγάλου όγκου δεδομένων, όπως τα δορυφορικά προερχόμενα.

Ο διαχωρισμός των παραμέτρων σε επτά κατηγορίες, χρονικές, βλάστησης, εδαφικές, επιφανειακές, υδρολογικές, μετεωρολογικές, εδαφικές και ατμοσφαιρικές διατηρήθηκε και σε αυτή την έκδοση. Στις εξελίξεις του μοντέλου περιλαμβάνεται επίσης και η ενσωμάτωση διαφορετικών τύπων κάλυψης γης στην παραμετροποίηση. Αυτό καθίσταται εφικτό με την εισαγωγή στην παράμετρο "Plant type" ενός αρχείου κειμένου με χωρική πληροφορία (ascii μορφή) που περιέχει εικόνες της βλάστησης, καταμεμημένες σε ένα πίνακα με μοναδικές τιμές. Μοναδική διαφορά στην διαδικασία παραμετροποίησης του Sim2DSphere με αυτή του κλασσικού SimSphere αποτελούν τα γεωχωρικά δεδομένα εισόδου που εισέρχονται απευθείας στο μοντέλο.

Συνοψίζοντας τις εξελίξεις στο μοντέλο, η καινούργια έκδοση περιλαμβάνει:

- i) Καινοτομία στην εισαγωγή των δορυφορικών δεδομένων, τα οποία εισάγονται απευθείας στο μοντέλο προσφέροντας έτσι στο χρήστη ένα εύχρηστο φιλικό περιβάλλον υπολογισμού πολλών παραμέτρων του ενεργειακού ισοζυγίου, με συστηματικό και γρήγορο τρόπο.
- ii) Την εισαγωγή της χωρικής διάστασης στις προσομοιώσεις.
- iii) Τη δυνατότητα να εκτελούνται παράλληλα οι υπολογισμοί των παραμέτρων.
- iv) Τη δυνατότητα εκτέλεσης όλων των λειτουργιών μέσω του GUI ή της γραμμής εντολών.
- v) Τον χειρισμό μεγάλου όγκου δεδομένων λόγω του cloud environment και της Java 8.
- vi) Τη δυνατότητα εφαρμογής του σε ετερογενείς εκτάσεις.

Λόγω της πρόσφατης σύστασης του μοντέλου (2019) η πιστοποίηση των υπολογισμών του σε σημαντικές παραμέτρους του ενεργειακού ισοζυγίου, θα προέλθει μέσα από τη σύγκριση του αφενός με τις επίγειες μετρήσεις που παρέχονται από το παγκόσμιο επιχειρησιακό δίκτυο FLUXNET και αφετέρου με τα αποτελέσματα της παλαιότερης έκδοσης του μοντέλου SimSphere 1D. Με αυτό τον τρόπο θα διερευνηθεί η δυνατότητά του ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο στην προσπάθεια κατανόησης των φυσικών διεργασιών και στη λήψη αποφάσεων που αφορούν αυτές. Σημαντικές παράμετροι για το ενεργειακό ισοζύγιο, όπως η θερμοκρασία του αέρα, η λανθάνουσα και αισθητή ροή θερμότητας καθώς και η καθαρή ακτινοβολία συγκρίνονται σημείο προς σημείο με τα in situ δεδομένα για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν δύο περιοχές με διαφορετικά οικοσυστήματα.

Στο επόμενο κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την παραμετροποίηση των διάφορων μεταβλητών για την εισαγωγή τους στο μοντέλο καθώς και μια περιγραφή της στατιστικής προσέγγισης.

3. Μεθοδολογία

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρατίθεται μια συνοπτική παρουσίαση της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήθηκε για την ικανοποίηση των στόχων της συγκεκριμένης εργασίας. Αρχικά γίνεται περιγραφή της περιοχής μελέτης, του τρόπου απόκτησης των δεδομένων, της επεξεργασίας τους για την εισαγωγή τους στα μοντέλα SimSphere 1D και Sim2DSphere καθώς και βήμα-βήμα την εκτέλεση του μοντέλου. Τέλος γίνεται αναφορά στην στατιστική προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

3.1. Περιγραφή της περιοχής μελέτης

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη αφορούν δύο πιλοτικές περιοχές που βρίσκονται στην Ολλανδία και συγκεκριμένα στις τοποθεσίες Loobos και Lelystad. Οι τοποθεσίες των σταθμών αποτελούν μέρος του προγράμματος CarboEurope (2004-2008) και επιλέχθηκαν τόσο για την διαφορετικότητα που παρουσιάζουν ως προς την κάλυψη/χρήση γης τους, όσο και για το γεγονός ότι είχαμε διαθέσιμα δορυφορικά στοιχεία χωρίς νεφοκάλυψη για τη συγκεκριμένη ημερομηνία. Στην Ελλάδα δεν υπάρχει ακόμα κάποιος αντίστοιχος μικρομετεωρολογικός σταθμός μέτρησης που να ανήκει σε ένα ευρύτερο δίκτυο και να προσφέρει όχι μόνο δεδομένα που προέρχονται από συστηματική καταγραφή αλλά προεπεξεργασμένα και ποιοτικά ελεγμένα. Αυτός ήταν ο λόγος που δεν επιλέχθηκε κάποια εγχώρια περιοχή για τη διεξαγωγή της παρούσας διπλωματικής.

Ο σταθμός μετρήσεων CarboEurope αποτελεί μέρος του παγκόσμιου προγράμματος μετρήσεων των ροών του εδάφους, FLUXNET (<https://fluxnet.fluxdata.org/>). Το FLUXNET είναι ένα παγκόσμιο δίκτυο μικρομετεωρολογικών σταθμών, αποτελούμενο από περιφερειακά δίκτυα, που χρησιμεύει για την αρχειοθέτηση και τη διανομή δεδομένων στην επιστημονική κοινότητα. Στο FLUXNET πραγματοποιούνται μετρήσεις των ροών ανταλλαγής διοξειδίου του άνθρακα, υδρατμών και ενέργειας μεταξύ της βιόσφαιρας και της ατμόσφαιρας. Η επιλογή του συγκεκριμένου δικτύου έγκειται στο γεγονός ότι αποτελεί το μεγαλύτερο δίκτυο επίγειων μετρήσεων των εδαφικών ροών παγκοσμίως, με περισσότερους από εκατόν πενήντα επίγειους σταθμούς μέτρησης. Η ιδέα

δημιουργίας του γεννήθηκε σε ένα σεμινάριο που έλαβε χώρα το Μάρτιο του 1995 στην Ιταλία (Baldocchi et al., 1996). Η εγκυρότητα του έχει επιβεβαιωθεί ήδη από το 1999 στο περιοδικό Remote Sensing and Environment ([https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(99\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(99)00061-9)).

Ο πρώτος οργανωμένος περιφερειακός σταθμός του FLUXNET ήταν ο σταθμός του CarboEurope (αρχική ονομασία EUROFLUX) δημιουργήθηκε το 1999 και χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Στο συγκεκριμένο σταθμό γίνεται καταγραφή πληθώρας παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων των μαζικών και ενεργειακών ροών, μετεωρολογικών παραμέτρων καθώς και πολλών βοηθητικών δεδομένων. Παρέχονται επίσης πληροφορίες σχετικά με την τοποθεσία, τη βλάστηση και το κλίμα. Σε κάθε σταθμό μετρήσεων του CarboEurope, υπάρχει συνεχόμενη μέτρηση των ανταλλαγών άνθρακα και ενέργειας στο οικοσύστημα, μέσω της eddy covariance technique. Τα δεδομένα που συλλέγονται από τις παρατηρήσεις υποβάλλονται σε έλεγχο ποιότητας και με τυποποιημένες μεθόδους συμπληρώνονται (gap filling) τυχόν κενά χρονικά διαστήματα. Για το συγκεκριμένο σταθμό έχει διεξαχθεί πλήθος μελετών από το έτος 2000. Ενδεικτικά αναφέρονται (Valentini et al., 2000), (LIN et al., 2001), (Grace et al., 2002), (Kowalski et al., 2003), (Cescatti, 2007), (Schrumpf et al. 2011).

Παρακάτω **(εικόνα 3.1)** παρουσιάζονται οι θέσεις των δύο σταθμών μετρήσεων στο χάρτη του GoogleEarth.



Εικόνα 3.1. : Τοποθεσία των δύο σταθμών στο χάρτη του Google.

3.2. Περιγραφή των επίγειων μετρήσεων (από το CarboEurope)

Σταθμός Loobos

Ο σταθμός στην περιοχή Loobos βρίσκεται στην περιοχή Veluwe της Ολλανδίας (52.166581 (lat) / 5.743556 (long)) και αφορά ένα δάσος κωνοφόρων (**εικόνα 3.2**).

Το δάσος φυτεύτηκε στις αμμοθίνες στις αρχές του 20^{ου} αιώνα και τα δένδρα είναι ευρέως διασκορπισμένα με κάποια διάκενα. Σε ακτίνα 500 μέτρων από τον πύργο ροής το κυρίαρχο είδος βλάστησης είναι η Δασική πεύκη (*Pinus sylvestris*) σε ποσοστό 89% και ύψος περίπου 18.6 μέτρα και σε μικρότερα ποσοστά απαντώνται μαύρη πεύκη 3,3%, σημύδα 2,3%, Ψευδοτσούγκα του Μένζιζ (*Pseudotsuga menziesii* ή Douglas fir) 1,3% , Δρυς 0,6% και ασκεπείς εκτάσεις από χαμηλή θαμνώδη και χορτολιβαδική

βλάστηση σε ποσοστό 3,5%. Στον υπόροφο κυριαρχεί η Δεσαμψία η εύκαμπτη (*Deschampsia Flexuosa*) μια πόα που μπορεί να φτάσει σε ύψος το 0,5 μέτρο



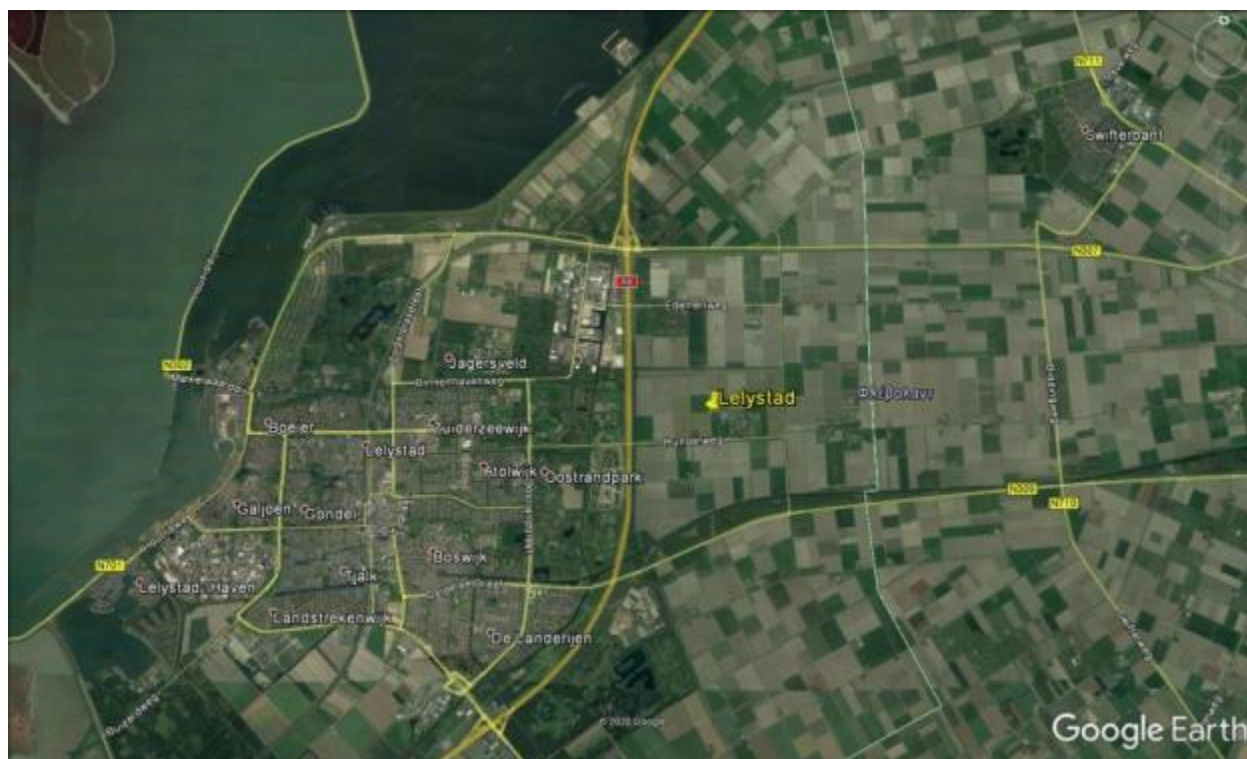
Εικόνα 3.2. : Τοποθεσία του σταθμού μετρήσεων στην περιοχή Loobos στον χάρτη του Google Earth

<http://www.climatexchange.nl/sites/loobos/index.htm>).

Η τοποθεσία βρίσκεται σε υψόμετρο 52 μέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και χαρακτηρίζεται από σχετικά επίπεδη τοπογραφία. Λόγω της τοπικής τοπογραφίας που προκαλείται από τους αμμόλοφους, η απόσταση από την επιφάνεια του υπόγειου νερού εξαρτάται από την τοποθεσία. Στη βάση του πύργου ο υδροφόρος ορίζοντας συναντάται σε βάθος $\pm 6,5$ μέτρων κάτω από την επιφάνεια, ενώ στις κοιλάδες τα υπόγεια ύδατα απαντώνται σε βάθος $\pm 3,5$ μέτρα. Το κλίμα χαρακτηρίζεται ως εύκρατο / ωκεάνιο με ετήσια βροχόπτωση περίπου 966 ± 201 mm, μέση ετήσια θερμοκρασία περίπου 10.02 ± 0.93 βαθμούς Κελσίου και εναπόθεση αζώτου 40 Kg N ανά εκτάριο ετησίως. Η υφή του εδάφους είναι αμμώδης, του εδαφικού τύπου Humusrodzol με 0,10 μέτρα στρώμα οργανικής ύλης και βάθος εδάφους 0,5 μέτρα (<http://www.climatexchange.nl/sites/loobos/index.htm>).

Σταθμός Lelystad

Ο σταθμός βρίσκεται στην πόλη Λέλυσταντ, πρωτεύουσα της επαρχίας του Φλέβολαντ (52.52423818 (lat) / 5.551615935 (long)) (εικόνα 3.3). Πρόκειται για χορτολιβαδική έκταση, με μέση ετήσια θερμοκρασία 10 βαθμούς Κελσίου και μέση ετήσια βροχόπτωση 780 mm (http://carboeurope.org/ceip/about/sites_eco.htm).



Εικόνα 3.3.: Τοποθεσία του σταθμού μετρήσεων στην περιοχή του Lelystad στον χάρτη του Google Earth.

Στον **πίνακα 3.4** παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά και των δύο σταθμών.

3.4. Περιγραφή των δύο σταθμών (Πηγή: European Fluxes Database)

Κωδικός σταθμού	Ονομασία	Χρήσεις γης	Κάλυψη γης	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος	Μέση θερμοκρασία T °C	Κατακρημνίσεις	Φυλλική επιφάνεια
NL-Lel	Lelystad	Χορτολιβαδική	Χορτολιβαδική	52° 30'	05° 30' E	10	780	1-2
NL-Loo	Loobos	Πευκοδάσος	Δάσος	52°10'00"	05°44'38" E	9.8	786	1.9-2.2

3.3. Δορυφορικά δεδομένα

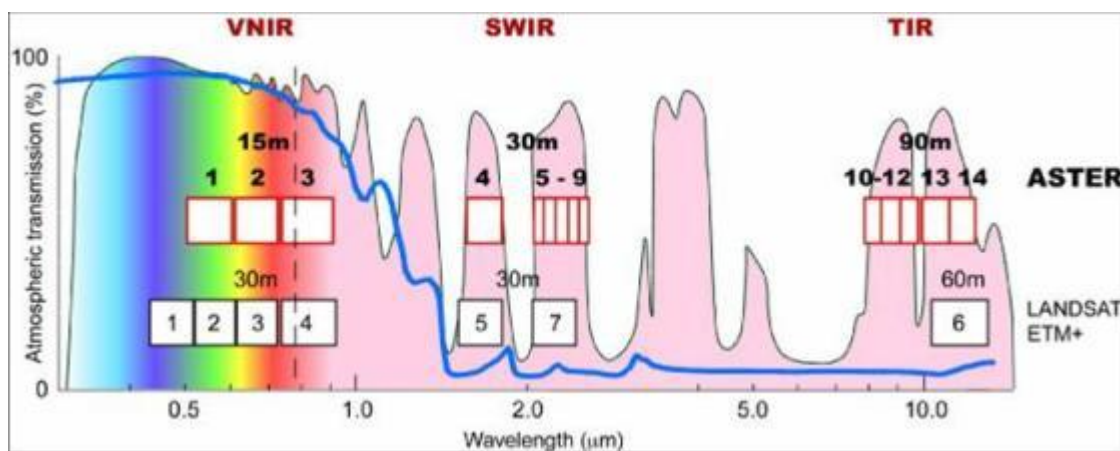
Για την εκπόνηση της συγκεκριμένης μελέτης χρησιμοποιήθηκαν εικόνες από τους δορυφόρους ASTER και IKONOS.

Ο ASTER είναι ένα εξελιγμένο πολυφασματικό σύστημα απεικόνισης και αποτελεί ένα από τα 5 όργανα που φέρει ο δορυφόρος Terra του συστήματος παρατήρησης της γης (EOS) της NASA. Καλύπτει έκταση ίση με 60x60 χιλιόμετρα και έχει επαναληψιμότητα κάθε 16 μέρες. Η επιλογή του ASTER βασίστηκε στο γεγονός ότι παρέχει πολυφασματικά δορυφορικά δεδομένα σε 15 διαφορετικά κανάλια από την ορατή έως τη θερμική περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε υψηλή χωρική ανάλυση (κοντινό ορατό υπέρυθρο 15 μέτρα, θερμικό υπέρυθρο 90 μέτρα). Ένας άλλος λόγος είναι τα επιχειρησιακά του προϊόντα, όπως το προϊόν επιφανειακής κινητικής θερμοκρασίας (Surface Kinetic Temperature) και τέλος η διαθεσιμότητα εικόνων χωρίς σύννεφα για τη συγκεκριμένη περιοχή. Ο ASTER παρέχει τα προϊόντα του σε δύο μορφές επεξεργασίας, το Level 1A και το Level1B. Τα Level 1A προϊόντα αποτελούν μη επεξεργασμένα δεδομένα σε πλήρη ανάλυση. Αποτελούνται από την εικόνα, τους ραδιομετρικούς συντελεστές και άλλα βοηθητικά δεδομένα αλλά χωρίς την εφαρμογή τους στην εικόνα. Τα προϊόντα Level1B έχουν δημιουργηθεί με την εφαρμογή των παραπάνω συντελεστών του Level1A στην εικόνα. Επιπρόσθετα παρέχουν ραδιομετρική διόρθωση και αναφορά σε ένα προβολικό σύστημα. Η επεξεργασία από το στάδιο Level1A και Level1B παρέχεται από το Ιαπωνικό Ground Data System του Aster. Τα χαρακτηριστικά του οργάνου ASTER παρουσιάζονται στον **πίνακα 3.5** και στην **εικόνα 3.6**.

Τα προϊόντα υψηλής ανάλυσης της ανακλώμενης επιφάνειας για το ορατό και εγγύς υπέρυθρο (Surface Reflectance VNIR and SWIR) (AST07) και κινητικής θερμοκρασίας (Kinetic Temperature) (AST08) για την περιοχή που βρίσκονται οι σταθμοί μετρήσεων Loobos και Lelystad και με ημερομηνία 30 Μαρτίου 2004, ήταν άμεσα διαθέσιμα από την NASA'S Earth Observing System (EOS).

Πίνακας 3.5.Φασματικά κανάλια του ραδιόμετρου ASTER του δορυφόρου Terra. (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/characteristics.asp>)

ΚΑΝΑΛΙΑ	ΟΡΑΤΟ& ΚΟΝΤΙΝΟ ΥΠΕΡΥΘΡΟ (VNIR)	ΕΓΓΥΣ ΥΠΕΡΥΘΡΟ (SWIR)	ΘΕΡΜΙΚΟ ΥΠΕΡΥΘΡΟ (TIR)
Μήκος κύματος (μm)	Κανάλι 1 (VIS) 0,52 έως 0,6	Κανάλι 4 (SWIR) 1,6 έως 1,7	Κανάλι 10 (TIR) 8,125 έως 8,475
	Κανάλι 2 (VIS) 0,63 έως 0,69	Κανάλι 5 (SWIR) 2,145 έως 2,185	Κανάλι 11 (TIR) 8,475 έως 8,825
	Κανάλι 3a (NIR) 0,76 έως 0,86	Κανάλι 6 (SWIR) 2,185 έως 2,225	Κανάλι 12 (TIR) 8,925 έως 9,275
	Κανάλι 3b (NIR) 0,76 έως 0,86	Κανάλι 7 (SWIR) 2,235 έως 2,285	Κανάλι 13 (TIR) 10,25 έως 10,95
		Κανάλι 8 (SWIR) 2,295 έως 2,365	Κανάλι 14 (TIR) 10,95 έως 11,65
		Κανάλι 9 (SWIR) 2,36 έως 2,43	
Διακριτική ικανότητα (m)	15	30	90
Εύρος κάλυψης τροχιάς (km)	60		
Χρόνος επαναδιέλευσης (ημέρες)	16		



Εικόνα 3.6.: Χαρακτηριστικά του ραδιόμετρου ASTER (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/images/spectrum.jpg>)

Οι πληροφορίες που αφορούν το υψόμετρο ανακτήθηκαν από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DigitalElevationModel-DEM) του οργάνου ASTER. Το προϊόν παρέχεται δωρεάν από την NASA's Earth Science Data Systems (ESDS) στην Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική προβολή (UTM) και γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS84, σε χωρική ανάλυση 30 μέτρων και ακρίβεια ≥ 7 μέτρων (ASTER DEM Product. 2001, <https://doi.org/10.5067/ASTER/AST14DEM.003>)

Ο δορυφόρος IKONOS αποτελεί τον πρώτο εμπορικό δορυφόρο στον κόσμο, ο οποίος συλλέγει παγχρωματικές εικόνες με 0,8 μέτρα ανάλυση και πολυφασματικές εικόνες με ανάλυση 3,2 μέτρα. Οι εικόνες από τους παγχρωματικούς και πολυφασματικούς αισθητήρες μπορούν να συγχωνευθούν και να δημιουργήσουν έγχρωμες εικόνες ανάλυσης 0,80 μέτρων (pan-sharpened). Διαθέτει 5 κανάλια, Κόκκινο, Πράσινο, Μπλε, Κοντινό υπέρυθρο και Παγχρωματικό. Στον **πίνακα 3.7** παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου δορυφόρου.

Πίνακας 3.7. Χαρακτηριστικά δορυφόρου IKONOS(<https://gbdxdocs.digitalglobe.com/docs/ikonos>)

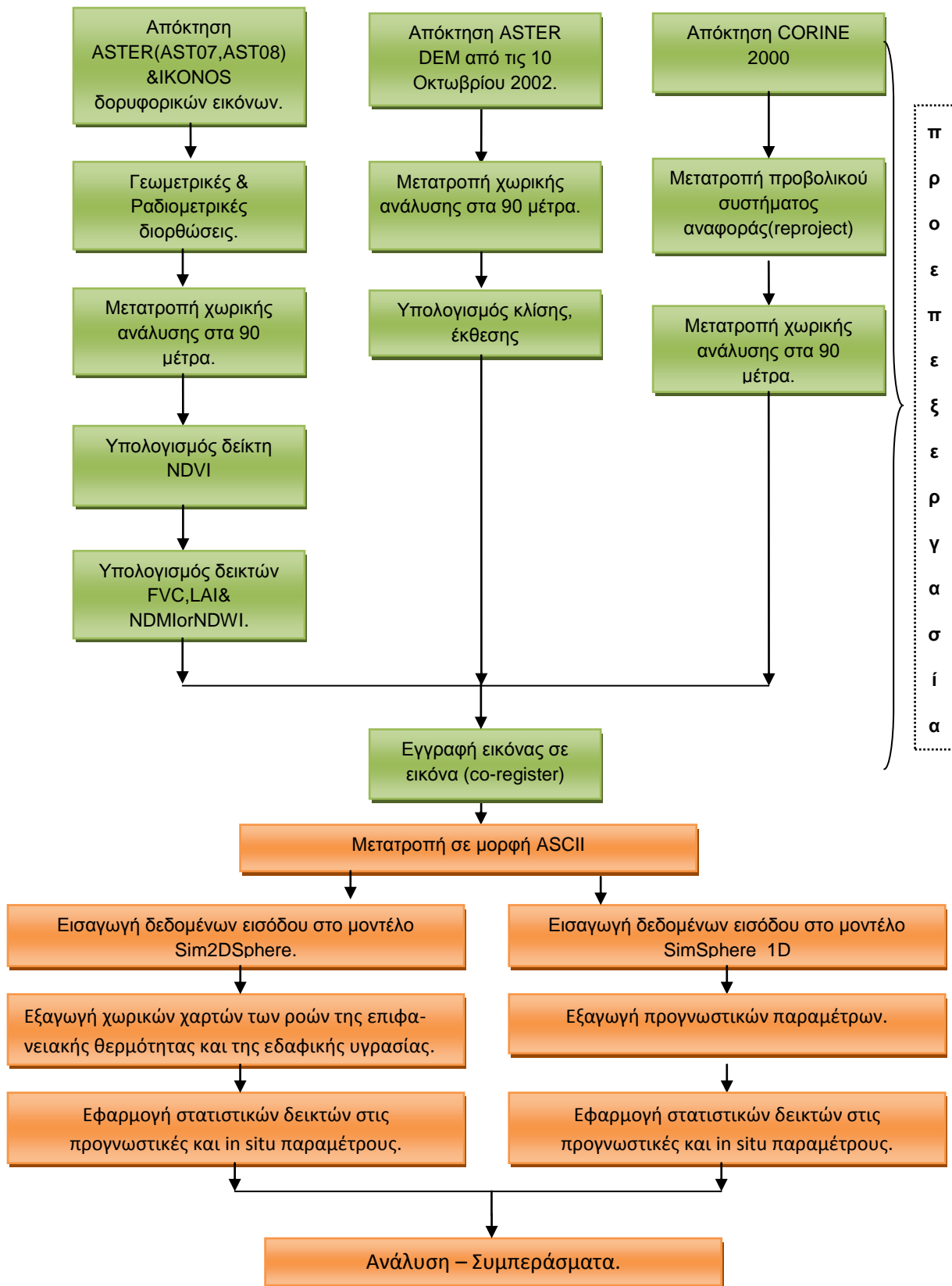
<i>Μέγεθος σκάφους</i>	1,83 m × 1,57 m (σε σχήμα εξαγωνικού πρίσματος)
<i>Χωρική ανάλυση</i>	Παγχρωματικό: 0,82 m, Πολυφασματικό: 3.2 m
<i>Ακρίβεια θέσης</i>	9-15 μέτρα
<i>Εύρος κάλυψης τροχιάς</i>	11.3 km
<i>Off-ναδύρ απεικόνιση</i>	Έως 60ο
<i>Ραδιομετρική διακριτική ικανότητα</i>	11 bits
<i>Χρόνος επανεγγραφής</i>	Περίπου 3 ημέρες
<i>Υψόμετρο τροχιάς</i>	681 km
<i>Επιφάνεια καταγραφής</i>	240.000 km ² / ημέρα(Pan + MS)

3.4. Επιχειρησιακό προϊόν CORINE 2000

Οι πληροφορίες για τη χρήση/κάλυψη γης ανακτήθηκαν από το επιχειρησιακό προϊόν CORINE 2000, το οποίο αποτελεί τον πρώτο ψηφιακό χάρτη που δείχνει τις διάφορες μεταβολές στην κάλυψη/χρήση γης στην Ευρώπη από το 1990. Το συγκεκριμένο προϊόν παρέχεται δωρεάν από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (European Environmental Agency), σε χωρική ανάλυση 100 μέτρων και γεωδαιτική αναφορά στο WGS84/EGM96 (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2000-raster-1>). Η γεωμετρική του ακρίβεια κυμαίνεται μεταξύ 25-100 μέτρων και η θεματική του ακρίβεια είναι $\geq 85\%$ (The Thematic accuracy of CLC 2000: assessment using LUCAS, European Environment Agency; CLC 2000 technical guidelines, European Environment Agency). Περιέχει 44 κλάσεις της κάλυψης/χρήσης γης και για τη δημιουργία του βασίστηκε στις δορυφορικές εικόνες του Landsat-7 ETM.

3.5. Προ-επεξεργασία δεδομένων

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής (**Εικόνα 3.8**) παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την παραμετροποίηση του μοντέλου. Όλες οι ενέργειες που αφορούν την επεξεργασία των δεδομένων περιγράφονται στις επόμενες υποενότητες.



Εικόνα 3.8 Διάγραμμα ροής

3.5.1. Επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων

Η προεπεξεργασία των δορυφορικών εικόνων αφορά κυρίως τις γεωμετρικές και ραδιομετρικές διορθώσεις, και τη μετατροπή της χωρικής τους ανάλυσης σε μια κοινή για όλες.

Η ανάκτηση των πραγματικών τιμών των εικόνων, που έχουν τροποποιηθεί για λόγους μείωσης του αρχικού τους μεγέθους έγινε με τη χρήση του προγράμματος επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων ENVI (5.3). Για τις AST07 εικόνες εφαρμόστηκε κλίμακα 0.001 και για τις AST08 και IKONOS εικόνες κλίμακα 0.1.

Οι γεωμετρικές διορθώσεις περιλαμβάνουν την γεωαναφορά των εικόνων και την αλλαγή του προβολικού τους συστήματος. Τα προϊόντα ASTERLevel 1B και IKONOS παρέχονται ήδη γεωαναφερόμενα στην Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική προβολή (UTM) και γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS84. Το προβολικό σύστημα αναφοράς του επιχειρησιακού προϊόντος CORINE 2000 μετατράπηκε στο γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς WGS84 με τη χρήση του πολυωνυμικού μοντέλου πλησιεστέρου γείτονα (γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως nearest neighbor). Οι μετατροπές πραγματοποιήθηκαν μέσω του λογισμικού ENVI 5.3.

Επόμενο βήμα στην προεπεξεργασία των εικόνων αποτελεί η αλλαγή του μεγέθους των δεδομένων σε μια κοινή χωρική ανάλυση. Στη συγκεκριμένη εργασία, η ανάλυση των εικόνων της ανακλώμενης επιφάνειας του ASTER (AST07) και IKONOS, το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Elevation Model-DEM) και το προϊόν CORINE 2000 τροποποιήθηκε στην ανάλυση των 90 μέτρων της εικόνας κινητικής θερμοκρασίας (AST08). Η μετατροπή πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πολυωνυμικού μοντέλου πλησιεστέρου γείτονα (γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως nearest neighbor) μέσω του λογισμικού ENVI 5.3..

Τέλος μέσω του προγράμματος ENVI 5.3.. όλες οι εικόνες συνδυάστηκαν σε μία (layer stacking). Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της παραπάνω εντολής η κοινή χωρική ανάλυση των εικόνων.

3.5.2. Τοπογραφικές παράμετροι

Υπολογισμός της κλίσης (slope) και της έκθεσης/προσανατολισμού (aspect)

Οι χάρτες κλίσης (slope) και έκθεσης/προσανατολισμού (aspect) υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού ENVI 5.3., από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Elevation Model-DEM) του ASTER.

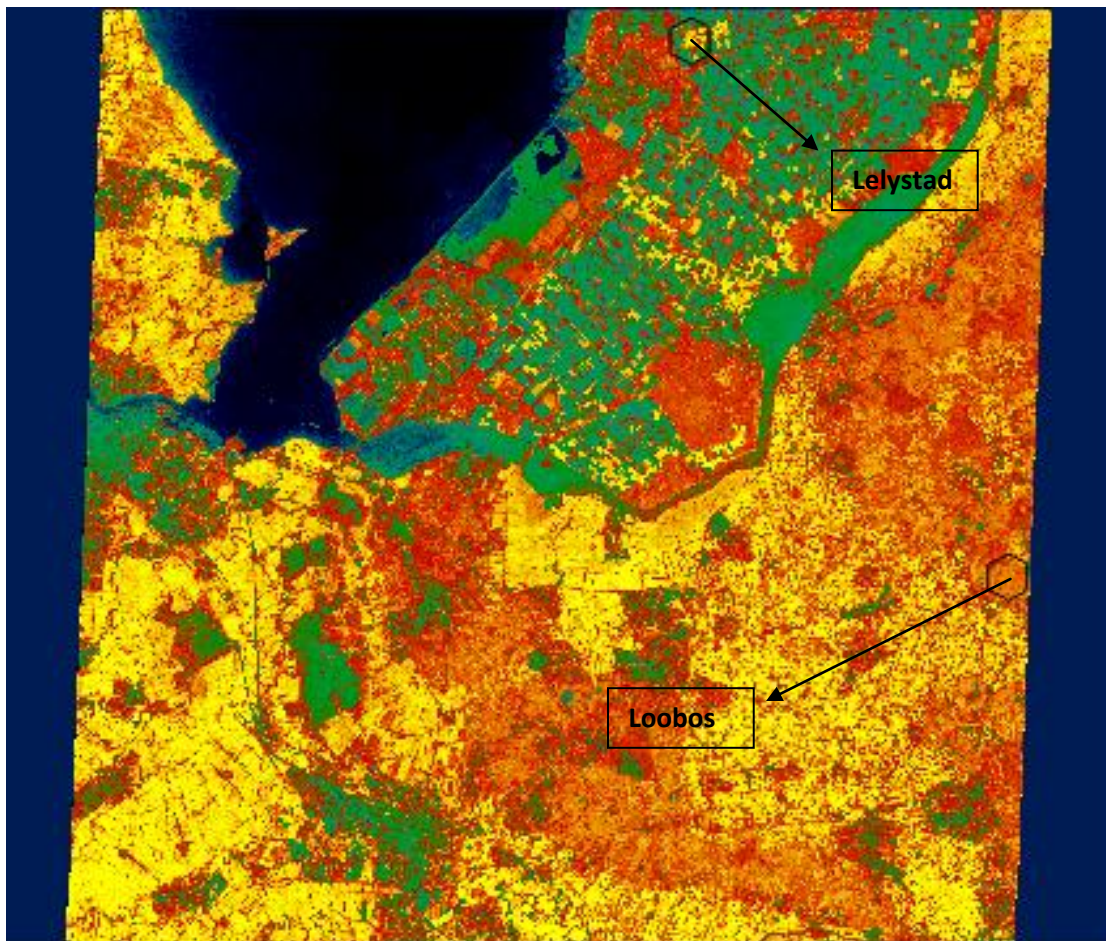
3.5.3. Παράμετροι βλάστησης

Υπολογισμός του Κανονικοποιημένου Δείκτη Βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index –NDVI)

Έπειτα υπολογίστηκε ο Κανονικοποιημένος Δείκτης Βλάστησης(Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) (**Εικόνα 3.9**), που αρχικά αναπτύχθηκε από τους Deering et al. (1975) και αποτελεί έναν από τους πιο πολυχρησιμοποιημένους δείκτες για την παρακολούθηση του φαινολογικού κύκλου διάφορων τύπων βλάστησης, την αξιολόγηση των περιόδων ξηρασίας καθώς και τον προσδιορισμό των οικολογικών ζωνών. Ο υπολογισμός του έγινε μέσω του εργαλείου εφαρμογής μαθηματικών εξισώσεων band math, του λογισμικού ENVI 5.3,στην εικόνα Surface Reflectance (AST07) Level1B και με την εφαρμογή του τύπου

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad [3.1]$$

Όπου το NIR υποδηλώνει την ανάκλαση στο κοντινό υπέρυθρο και το RED την ανάκλαση στο κόκκινο (ορατό).



Εικόνα 3.9. : Εφαρμογή του δείκτη NDVI στην εικόνα ASTER (AST07).

Υπολογισμός του ποσοστού φυτοκάλυψης (Fractional Vegetation Cover)

Για τον υπολογισμό του ποσοστού φυτοκάλυψης (Fractional Vegetation Cover - FVC) (Εικόνα 3.10) τροποποιήθηκε ο δείκτης NDVI για να βρεθεί η τιμή του τόσο για το ποσοστό της βλάστησης όσο και για το γυμνό έδαφος. Η αναγωγή του NDVI είχε προταθεί από τους (Choudhury et al., 1994), (Carlson et al., 1995), (Gillies et al., 1997), ως εξής:

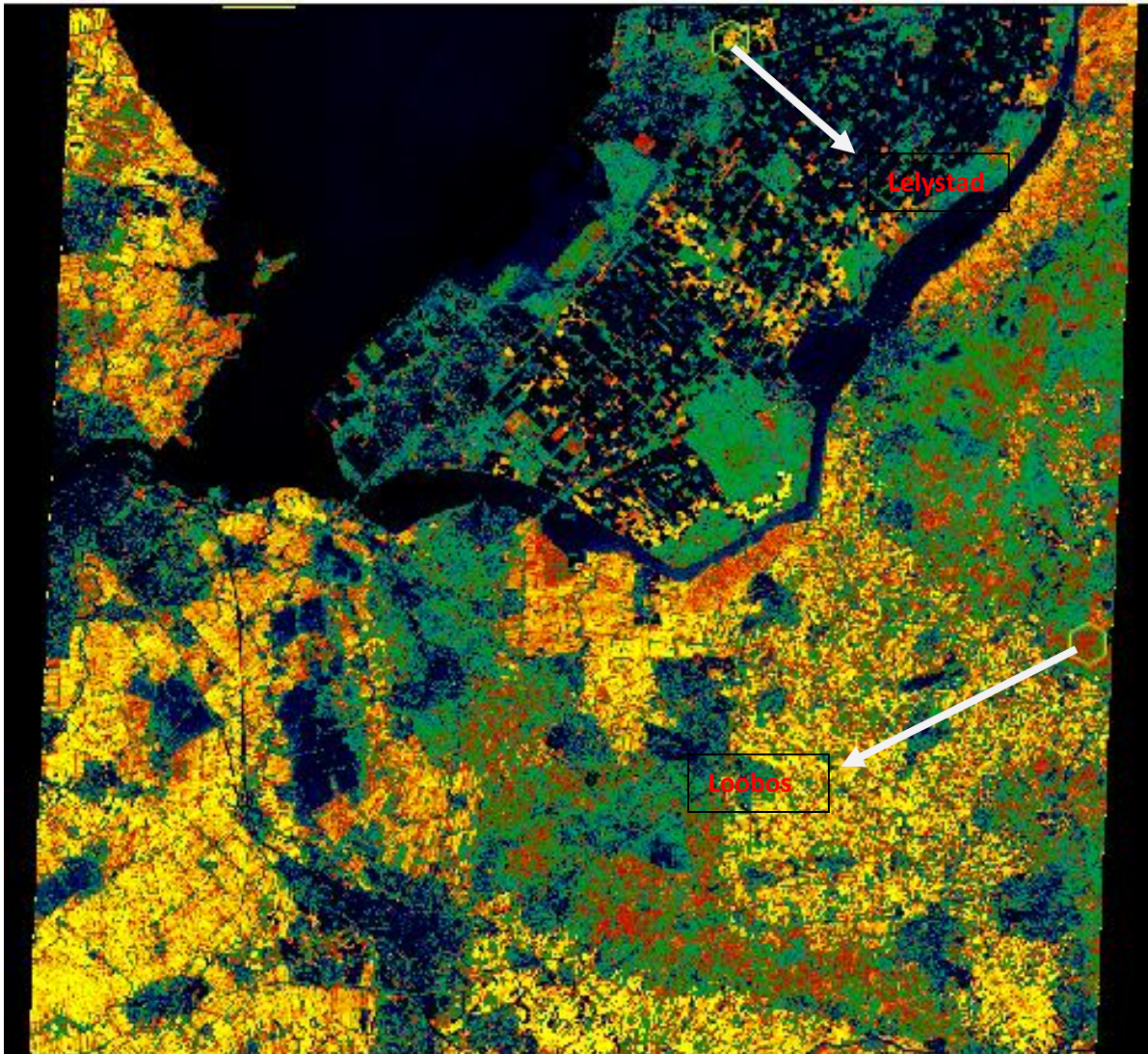
$$N = \frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_s - NDVI_0} [3.2],$$

όπου ο $NDVI_s$ είναι η τιμή του NDVI για το 100% της βλάστησης και $NDVI_0$ είναι η τιμή του NDVI για το γυμνό έδαφος και αφορά το 0.75 της επιφάνειας με πλήρη κάλυψη βλάστησης.

Έπειτα για την εξαγωγή του δείκτη FVC εφαρμόζεται ο τύπος που προτάθηκε από τους (Choudhury et al., 1994).

$$FVC = N^2 \quad [3.3],$$

όπου N είναι ο τροποποιημένος ως άνω NDVI.



Εικόνα 3.10. : Εφαρμογή του Δείκτη Fractional Vegetation Cover στην εικόνα ASTER (AST07).

Υπολογισμός του Ύψους της βλάστησης

Το ύψος της βλάστησης δόθηκε από το Fluxnet.

Υπολογισμός του Δείκτη Φυλλικής Επιφάνειας(Leaf Area Index)

Ο δείκτης Φυλλικής Επιφάνειας (Leaf Area Index-LAI) υπολογίστηκε από την εικόνα IKONOS-2, η χωρική ανάλυση της οποίας τροποποιήθηκε από το 1μ στα 90μ. Ο τύπος που υπολογίζει την φυλλική επιφάνεια εκφράζεται ως εξής:

$$LAI = 3,168 + EVI - 0,118 \quad [3.4]$$

όπου ο EVI είναι ο δείκτης Enhanced Vegetation Index και υπολογίζεται ως εξής:

$$EVI = 2,5 * \frac{NIR - RED}{NIR + C1RED - C2 * BLUE + L} \quad [3.5]$$

Όπου οι συντελεστές C1,C2 και L καθορίζονται εμπειρικά έως C1=6, C2=7,5 και L=1.

3.5.4. Υδρολογικές παράμετροι

Υπολογισμός του Κανονικοποιημένου Δείκτης Υγρασίας (Normalized Difference Moisture or Water Index –NDMI or NDWI)

Ο υπολογισμός του Κανονικοποιημένου Δείκτης Υγρασίας (NDMI) προέκυψε από την εφαρμογή του κάτωθι τύπου στην εικόνα του L1b του ASTER.

$$NDMI = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}, \quad [3.6]$$

όπου NIR= το κανάλι 3 του ASTER, SWIR=το κανάλι 4 του ASTER

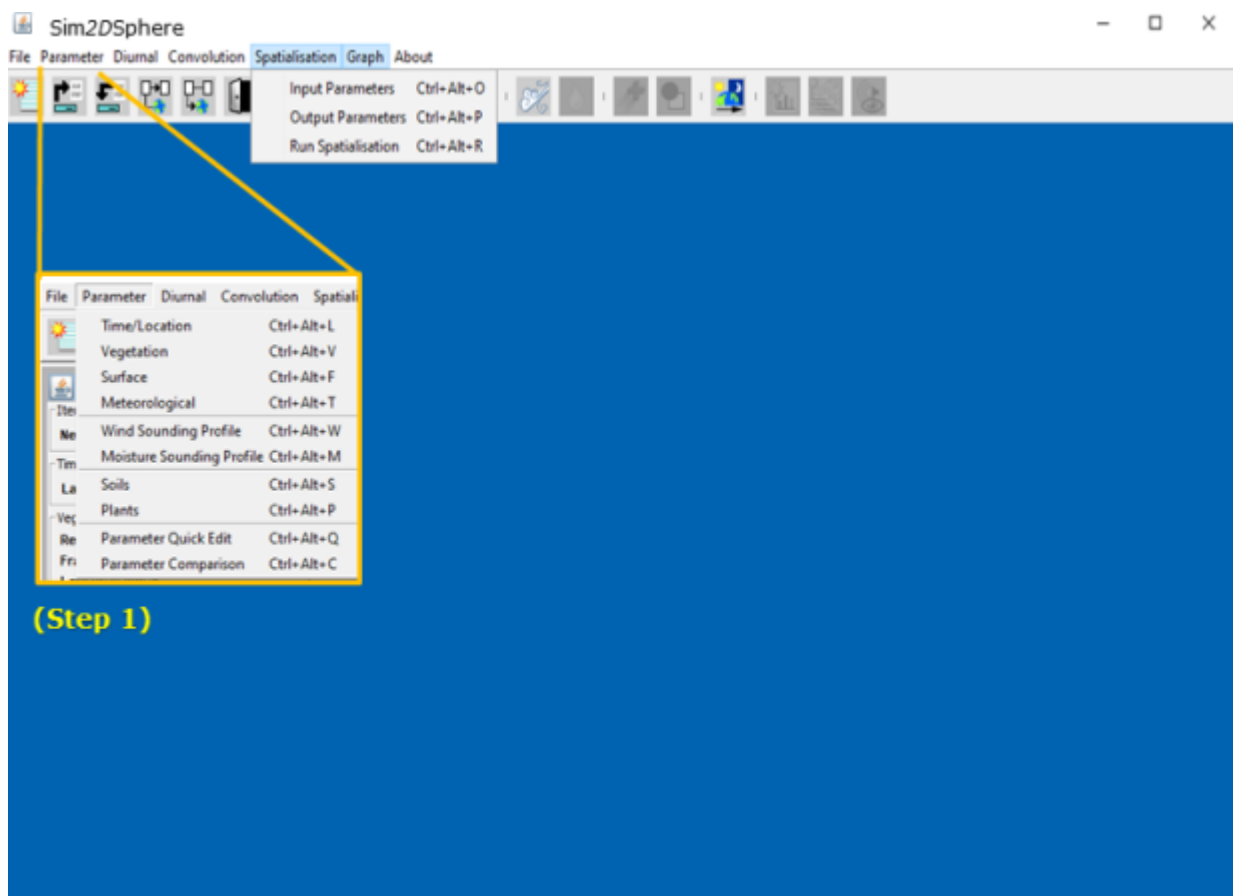
3.5.5. Μετεωρολογικές – Ατμοσφαιρικές παράμετροι

Τα δεδομένα εισόδου που αφορούν την παραμετροποίηση του ατμοσφαιρικού προφίλ στο μοντέλο ανακτήθηκαν από το πανεπιστήμιο του Wyoming. (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

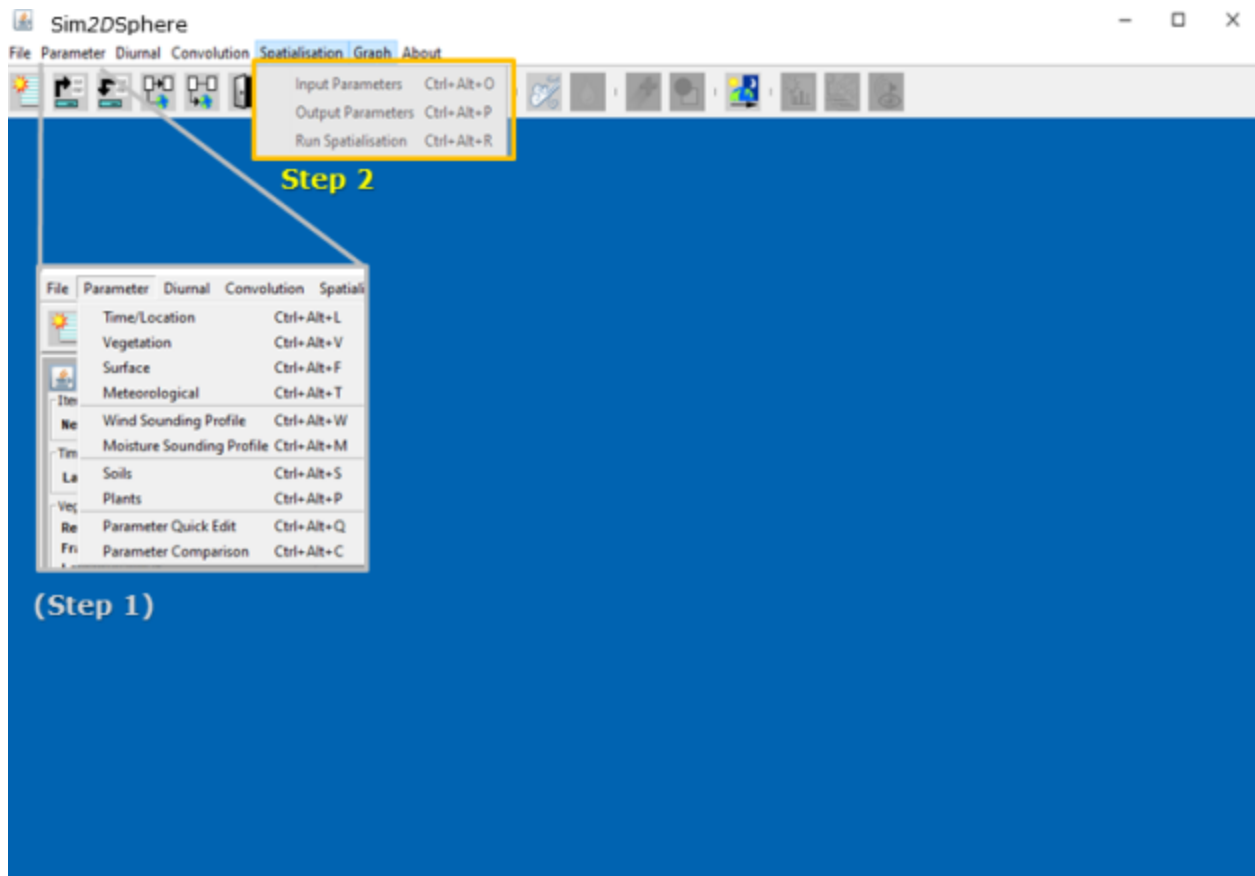
3.5. Εκτέλεση μοντέλου Sim2DSphere (Model run)

Αφού ολοκληρώθηκε η επεξεργασία όλων των δεδομένων ώστε να έρθουν στην κατάλληλη μορφή, δημιουργήθηκαν ζεύγη εικόνων (co-register) και μετατράπηκαν σε ASCII μορφή.

Το πρώτο βήμα στην εκτέλεση του μοντέλου αφορά την δημιουργία μιας καινούργιας προσομοίωσης (File>New Simulation) (**εικόνες 11.α και 11.β**). Μετά την ολοκλήρωση της προετοιμασίας (εισαγωγή προκαθορισμένων τιμών), δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να εισάγει μια ακόμα κατηγορία παραμέτρων, από τις οποίες σε επόμενο στάδιο θα εξαχθεί η χωρική πληροφορία (File>Local Parameter Import).

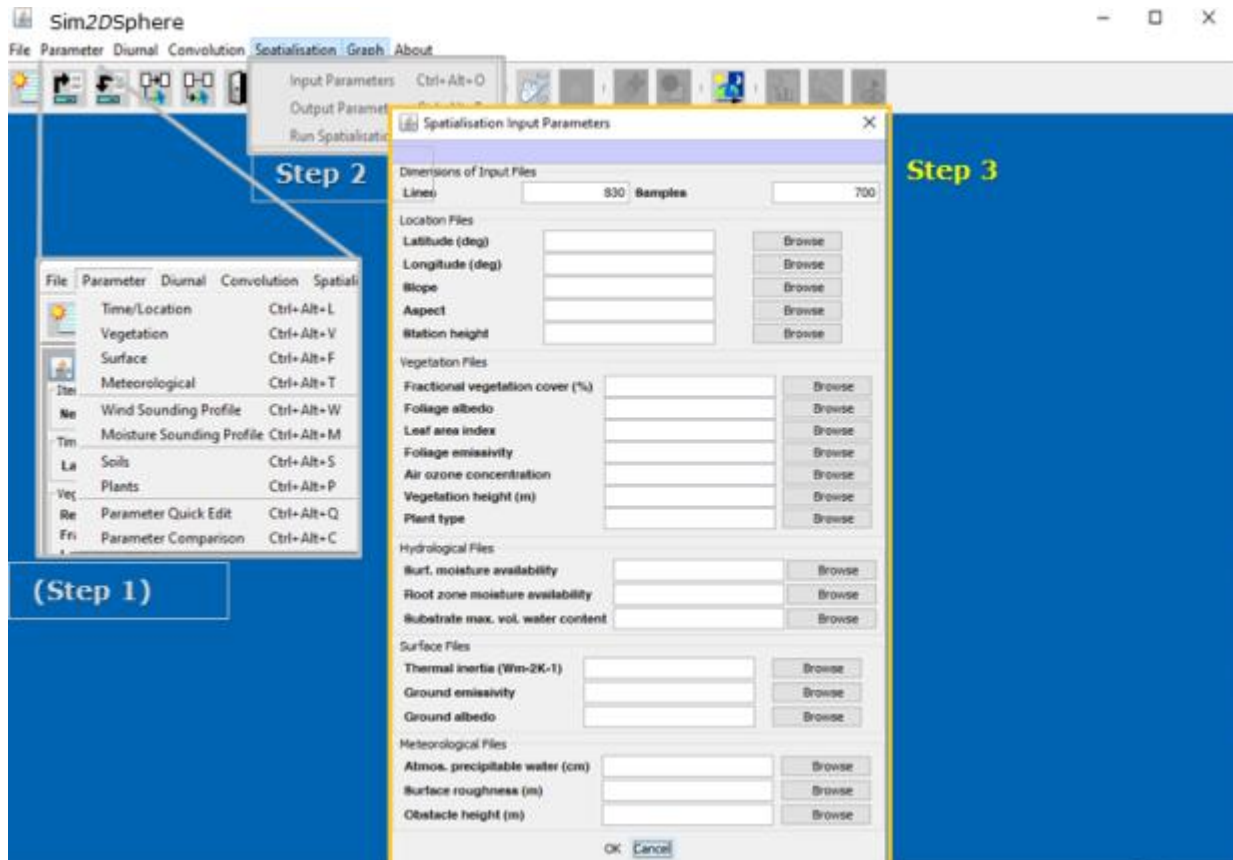


Εικόνα 3.11α.: Καθορισμός των μη χωρικών (Βήμα 1) και χωρικών (Βήμα 2) παραμέτρων για την περιοχή μελέτης.



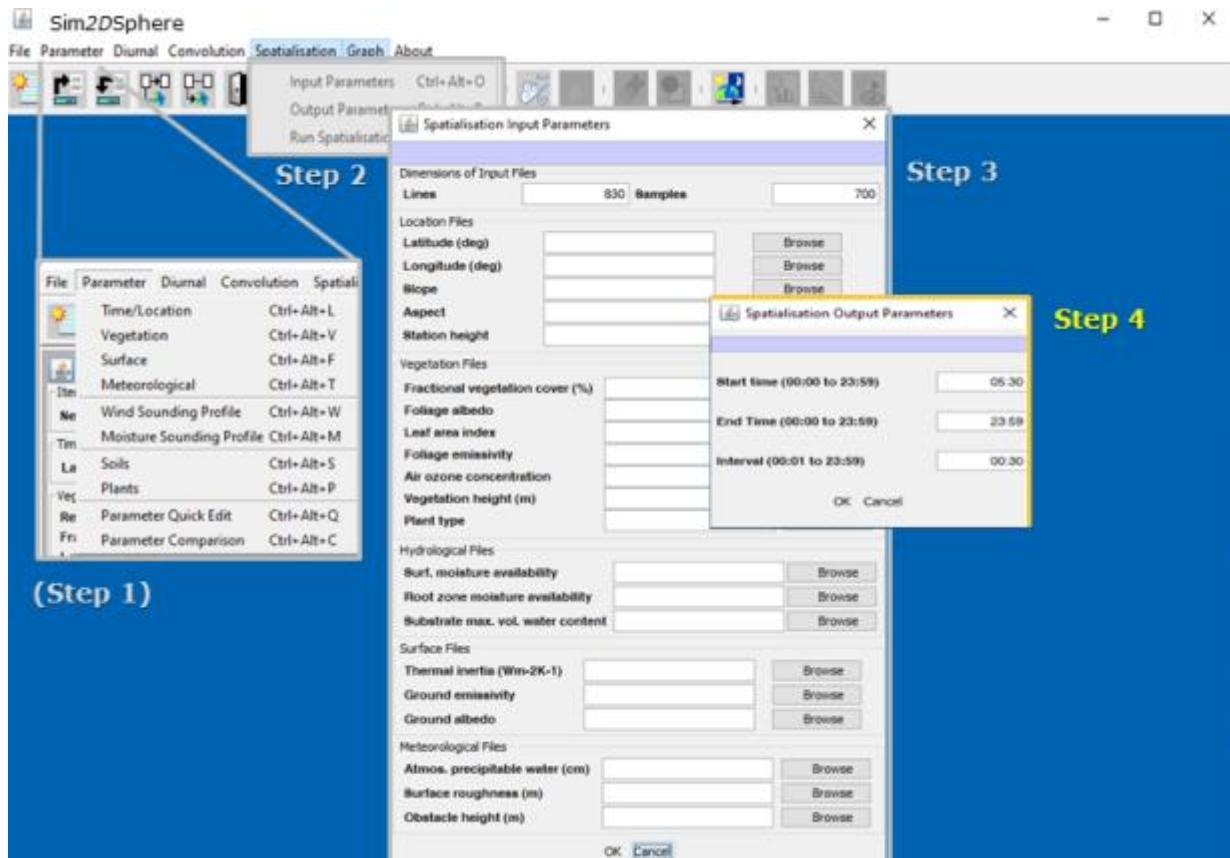
Εικόνα 3.11β.: Καθορισμός των μη χωρικών (Βήμα 1) και χωρικών (Βήμα 2) παραμέτρων για την περιοχή μελέτης.

Στην **εικόνα 3.12** παρουσιάζονται τα πρώτα βήματα εισαγωγής των χωρικών μεταβλητών στο μοντέλο. Μέσω της επιλογής “Spatialization>Input Parameters” ο χρήστης εισάγει τις εικόνες, υπό την προϋπόθεση ότι αυτές έχουν την ίδια χωρική αναφορά. Σε αυτό το βήμα καθορίζεται και η χωρική ανάλυση που θα έχουν τα προγνωστικά αποτελέσματα του μοντέλου.



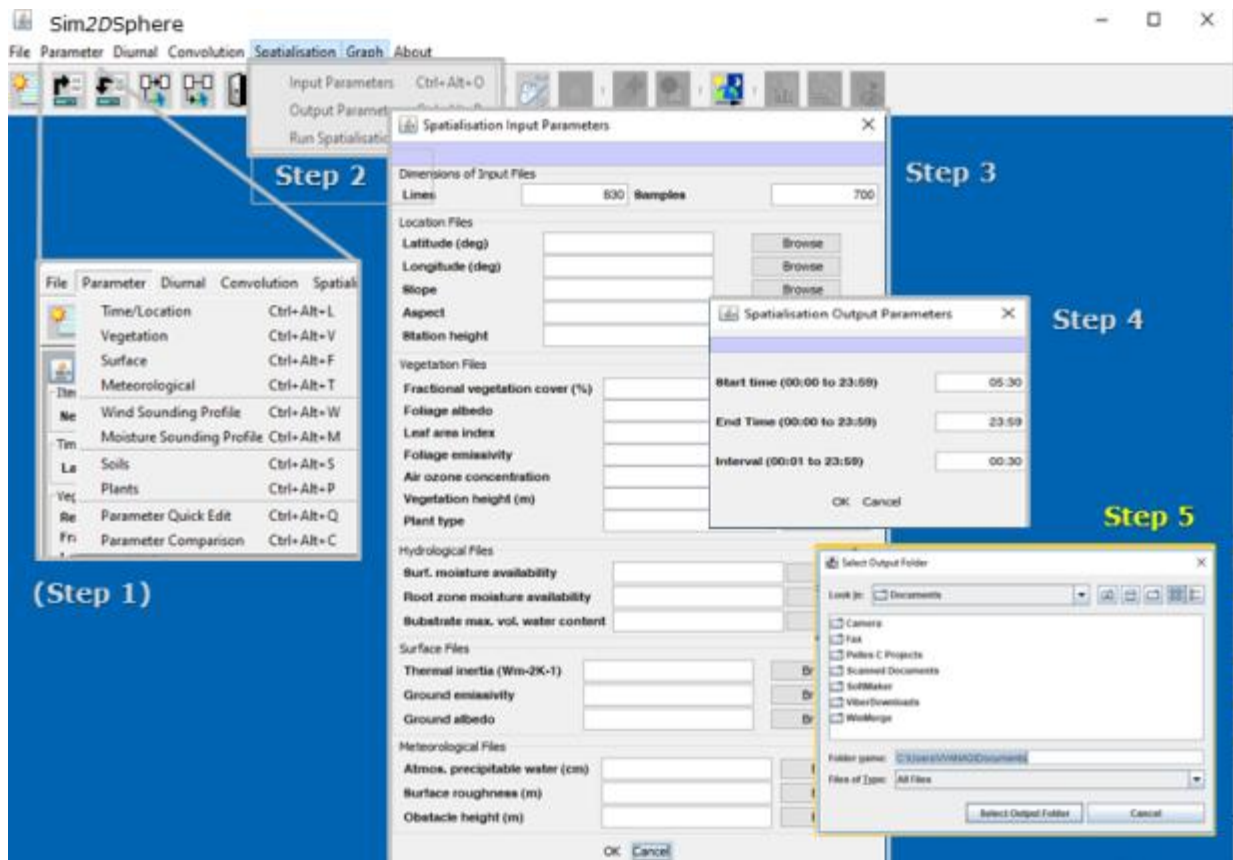
Εικόνα 3.12.: Η καρτέλα με τις χωρικές παραμέτρους που θα εισαχθούν σαν δεδομένα εισόδου στο μοντέλο (Βήμα 3).

Επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός του χρονικού βήματος (**εικόνα 3.13**) μέσω του “Spatialization>Output Parameters” .



Εικόνα 3.13.: Καθορισμός χρονικού βήματος από το χρήστη (Βήμα 4).

Τέλος, με την επιλογή “Spatialization>Run simulation” (εικόνα 3.14) επιλέγεται από το χρήστη ο φάκελος που θα αποθηκευτούν τα εξαγόμενα αρχεία.



Εικόνα 3.14: Επιλογή φακέλου αποθήκευσης των αποτελεσμάτων (Βήμα 5).

3.6. Στατιστική προσέγγιση ανάλυσης αποτελεσμάτων

Ο βαθμός συσχέτισης των αποτελεσμάτων μεταξύ των πραγματικών και υπολογισμένων τιμών θα πραγματοποιηθεί μέσω της σύγκρισής τους σημείο προς σημείο. Η αξιολόγηση τους θα προέλθει μέσω της ανάλυσης των στατιστικών ιδιοτήτων της μέσης τιμής σφάλματος (Bias/Mean Average Error), του μέσου απόλυτου σφάλματος (Mean absolute error), της τετραγωνικής ρίζας μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης του Pearson (R), τη μέγιστη και ελάχιστη τιμή (ErrMax, ErrMin), την τυπική απόκλιση (Standard Deviation) και τον συντελεστή κύρτωσης (Kurtosis). Στο **πίνακα 3.15** που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μαθηματικοί ορισμοί των ως άνω ιδιοτήτων.

Η μέση τιμή ή αριθμητικός μέσος αποτελεί το σπουδαιότερο και πιο χρησιμοποιημένο μέτρο για την περιγραφή της κεντρικής τάσης, συμβολίζεται με το κεφαλαίο γράμμα \bar{X}

και είναι το πηλίκο του αθροίσματος των παρατηρήσεων διαιρεμένο δια του πλήθους τους. Το μέσο απόλυτο σφάλμα αποτελεί την απόλυτη τιμή της μέσης τιμής.

Η τυπική απόκλιση είναι ένα από τα μέτρα μεταβλητότητας/διασποράς, αποτελεί την θετική τετραγωνική ρίζα της διακύμανσης και συμβολίζεται με το κεφαλαίο γράμμα S. Η διακύμανση μιας σειράς παρατηρήσεων χρησιμοποιείται για να εκφράσει τον μέσο των αποκλίσεων ($P_i - O_i$) από την μέση τιμή \bar{X} .

Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error) ορίζεται ως η τυπική απόκλιση των “υπολοίπων”. Ως “υπόλοιπο” (residual) ορίζεται η διαφορά μεταξύ της πραγματικής (in situ) τιμής “ O_i ” και της προβλεπόμενης από το μοντέλο τιμής “ P_i ”. Τα υπόλοιπα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην διερεύνηση της επάρκειας του μοντέλου και στη διαπίστωση αποκλίσεων από τις υποθέσεις. Το RMSE εκφράζει τον τρόπο κατανομής των υπολοίπων, δηλαδή πόσο συγκεντρωμένα είναι τα δεδομένα γύρω από τη γραμμή βέλτιστης εφαρμογής.

Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson συμβολίζεται με r και δίνει ένα μέτρο του μεγέθους της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ δύο μεταβλητών. Ορίζεται ως το πηλίκο της συνδιακύμανσης του P_i και O_i προς το γινόμενο της τυπικής αποκλίσης των P_i και O_i . Ο συντελεστής συσχέτισης παίρνει τιμές από -1 μέχρι +1. Θετικές τιμές έχουμε όταν μεγάλες τιμές της μιας μεταβλητής σχετίζονται με μεγάλες τιμές της άλλης μεταβλητής, ενώ αρνητικές τιμές φανερώνουν ότι μεγάλες τιμές της μιας μεταβλητής σχετίζονται με μικρές τιμές της άλλης. Όταν η τιμή του είναι ίση με -1 ή +1 τότε έχουμε μια τέλεια αρνητική ή θετική γραμμική συσχέτιση.

Τέλος ο συντελεστής κύρτωσης του Pearson ορίζεται με βάση τις δειγματικές κεντρικές ροπές και συμβολίζεται με το γράμμα β_2 . Για κανονικές κατανομές είναι $\beta_2=3$ (μεσόκυρτη), ενώ αν $\beta_2>3$ η κατανομή χαρακτηρίζεται πλατύκυρτη και αν $\beta_2<3$, χαρακτηρίζεται λεπτόκυρτη.

Πίνακας 3.15 με τις στατιστικές ιδιότητες. Όπου $i = 1, \dots, N$ ο αριθμός των παρατηρήσεων (στη συγκεκριμένη εργασία οι ώρες των παρατηρήσεων), P οι προβλέψεις και O τα δεδομένα in situ.

Όνομα	Περιγραφή	Μαθηματικός ορισμός
ME	Μέση τιμή σφάλματος (Bias or Mean Average Error)	$bias = MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)$
MAE	Μέσο απόλυτο σφάλμα (Mean Absolute Error)	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i - O_i $
Scatter / SD	Τυπική απόκλιση (Scatter or Standard Deviation)	$scatter = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N \sqrt{(P_i - O_i - \overline{(P_i - O_i)})^2}$
RMSE	Τετραγωνική ρίζα μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}$
R	Συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson (Pearson's Correlation Coefficient)	$R = \frac{\left[(\theta_{sat} - [\theta_{sat}]) (\theta_{in-situ} - [\theta_{in-situ}]) \right]}{\sigma_{sat} \sigma_{in-situ}}$
Kurtosis	Συντελεστής κύρτωσης του Pearson	$\beta_2 = \frac{m_4}{m_2^2}, \text{ όπου}$ $m_4 = \frac{\sum_{i=1}^v (P_i - O_i)^4}{v} \text{ και } m_2 = \frac{\sum_{i=1}^v (P_i - O_i)^2}{v}$

Οι συγκεκριμένες στατιστικές μετρήσεις έχουν χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν εκτός από άλλες ανάλογες μελέτες και για την αξιολόγηση ανάλογων επιχειρησιακών προϊόντων (Validation Report Evapotranspiration Products LSA-16, 2010; Bennett et al., 2013; Petropoulos et al., 2015).

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επαλήθευσης των αποτελεσμάτων του μοντέλου Sim2DSphere. Αυτή περιλαμβάνει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του με τις επίγειες μετρήσεις που παρέχονται από το επιχειρησιακό δίκτυο FLUXNET, για τους σταθμούς Loobos και Lelystad καθώς και μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της νέας έκδοσης του μοντέλου με αυτά του κλασσικού SimSphere.

4. Αποτελέσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από τα δύο μοντέλα Sim2DSphere και SimSphere 1D. Οι παράμετροι που παρουσιάζονται και αναλύονται στην επόμενη ενότητα είναι: η θερμοκρασία του αέρα (Air Temperature), η λανθάνουσα ροή θερμότητας (Latent Heat), η καθαρή ακτινοβολία (Net Radiation) και η αισθητή ροή θερμότητας (Sensible Heat). Η συζήτηση των αποτελεσμάτων γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.

4.1. Αποτελέσματα του μοντέλου Sim2DSphere

Πίνακας 4.1.Αποτελέσματα μοντέλου Sim2DSphere

Site name:	Air Temperature	Latent Heat	Net Radiation	Sensible Heat
LELYSTAD				
ME	-2.76	18.94	30.89	-2.49
MAE	2.88	23.41	109.19	36.20
RMSE	3.42	35.53	128.70	43.11
R	0.86	0.62	0.85	0.69
ErrMin	-8.69	-33.79	-91.81	-105.30
ErrMax	1.22	95.69	247.49	46.43
St.Dev	2.05	30.50	126.66	43.63
Kurtosis	3.90	2.66	1.68	2.49

Site name:	Air Temperature	Latent Heat	Net Radiation	Sensible Heat
LOOBOS				
ME	-3.12	-12.24	-116.75	-52.87
MAE	3.12	18.42	117.37	104.54
RMSE	3.41	26.97	156.98	126.65
R	0.94	0.79	0.98	0.87
ErrMin	-7.09	-77.43	-267.83	-268.82
ErrMax	-0.11	24.83	3.28	89.75
St.Dev	1.38	24.36	106.38	116.67
Kurtosis	4.44	3.30	1.35	1.58

Air Temperature (Tair):

Σταθμός Lelystad:

Από τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.1** προκύπτει ότι οι τιμές έχουν μεγάλη απόκλιση από τον μέσο τους ($ME = -2.76 \text{ C}^\circ$, $SD=2.05$). το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής ($MAE=2.88$) και το εύρος σφάλματος των παρατηρήσεων κυμαίνεται μεταξύ -8.69 C° και 1.22 C° . Το RMSE είναι 3.42 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.86$) φανερώνει πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος η κατανομή των παρατηρήσεων σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=3.90$) έχει πλατύκυρτη μορφή.

Σταθμός Loobos:

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.1** οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα ως προς τον μέσο τους ($ME = -3.12 \text{ C}^\circ$, $SD=1.38$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=3.12$) και οι ακραίες τιμές των σφαλμάτων είναι ελάχιστη -7.09 C° και μέγιστη -0.11 C° . Το RMSE είναι 3.41 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.94$) φανερώνει πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος οι παρατηρήσεις σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=4.44$) παρουσιάζουν πλατύκυρτη κατανομή.

Latent heat (LE):

Σταθμός Lelystad:

Από τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.1** προκύπτει ότι οι τιμές έχουν μεγάλη απόκλιση από τον μέσο τους ($ME = 18.94 \text{ Wm}^{-2}$, $SD=30.50$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=23.41$) και το εύρος σφάλματος των παρατηρήσεων κυμαίνεται μεταξύ -33.79 Wm^{-2} και $95,69 \text{ Wm}^{-2}$. Το RMSE είναι 35.53 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.62$) υποδεικνύει μια μέση γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος η κατανομή των παρατηρήσεων σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=2.66$) έχει λεπτόκυρτη μορφή.

Σταθμός Loobos:

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.1** οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα ως προς τον μέσο τους ($ME = -12.24 \text{ Wm}^{-2}$, $SD=24.36$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=18.42$) και οι ακραίες τιμές του σφάλματος των παρατηρήσεων είναι ελάχιστη -77.43 Wm^{-2} και μέγιστη 24.83 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 26.97 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.79$) φανερώνει μια ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος οι παρατηρήσεις σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=3.30$) παρουσιάζουν πλατύκυρτη κατανομή.

Net radiation (Rn):

Σταθμός Lelystad:

Από τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.1** προκύπτει ότι οι τιμές έχουν μεγάλη απόκλιση από τον μέσο τους ($ME = 30.89 \text{ Wm}^{-2}$, $SD=126.66$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=109.19$) και το εύρος σφάλματος των παρατηρήσεων κυμαίνεται μεταξύ -99.81 Wm^{-2} και 247.49 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 128.70 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.85$) υποδεικνύει μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος η κατανομή των παρατηρήσεων σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=1.68$) έχει λεπτόκυρτη μορφή.

Σταθμός Loobos:

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.1** οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα ως προς τον μέσο τους ($ME = -116.75 \text{ Wm}^{-2}$, $SD=106.38$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=117.37$) και οι ακραίες τιμές του σφάλματος των παρατηρήσεων είναι ελάχιστη -267.83 Wm^{-2} και μέγιστη 3.28 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 156.98 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.98$) φανερώνει μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και

παρατηρούμενων τιμών. Τέλος οι παρατηρήσεις σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=1.35$) παρουσιάζουν λεπτόκυρτη κατανομή.

Sensible heat (H):

Σταθμός Lelystad:

Από τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.1** προκύπτει ότι οι τιμές έχουν μεγάλη απόκλιση από τον μέσο τους ($ME = -2.49 \text{ Wm}^{-2}$, $SD=43.63$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=36.20$) και το εύρος σφάλματος των παρατηρήσεων κυμαίνεται μεταξύ -105.30 Wm^{-2} και 46.43 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 43.11 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.69$) υποδεικνύει μια μέση γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος η κατανομή των παρατηρήσεων σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=2.49$) έχει λεπτόκυρτη μορφή.

Σταθμός Loobos:

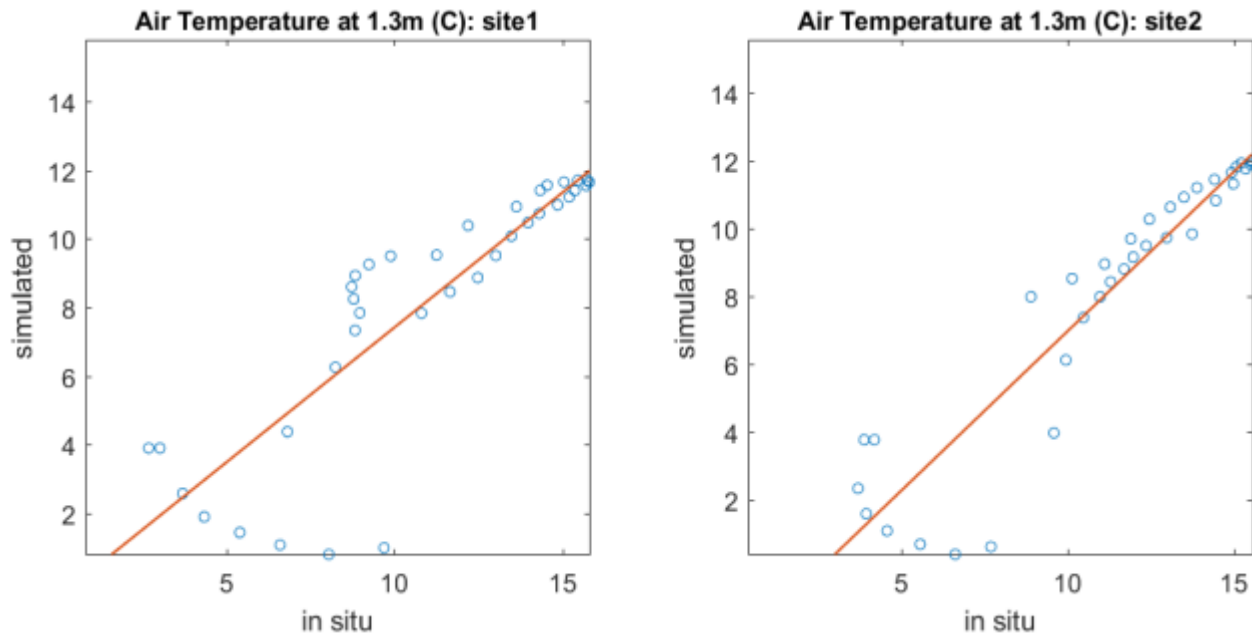
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.1** οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα ως προς τον μέσο τους ($ME = -52.87 \text{ Wm}^{-2}$, $SD=116.67$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=104.54$) και οι ακραίες τιμές του σφάλματος των παρατηρήσεων είναι ελάχιστη -268.82 Wm^{-2} και μέγιστη 89.75 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 126.65 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.87$) φανερώνει μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος οι παρατηρήσεις σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=1.58$) παρουσιάζουν λεπτόκυρτη κατανομή.

Συμπερασματικά:

Θερμοκρασία του αέρα (Air Temperature - T_{air})

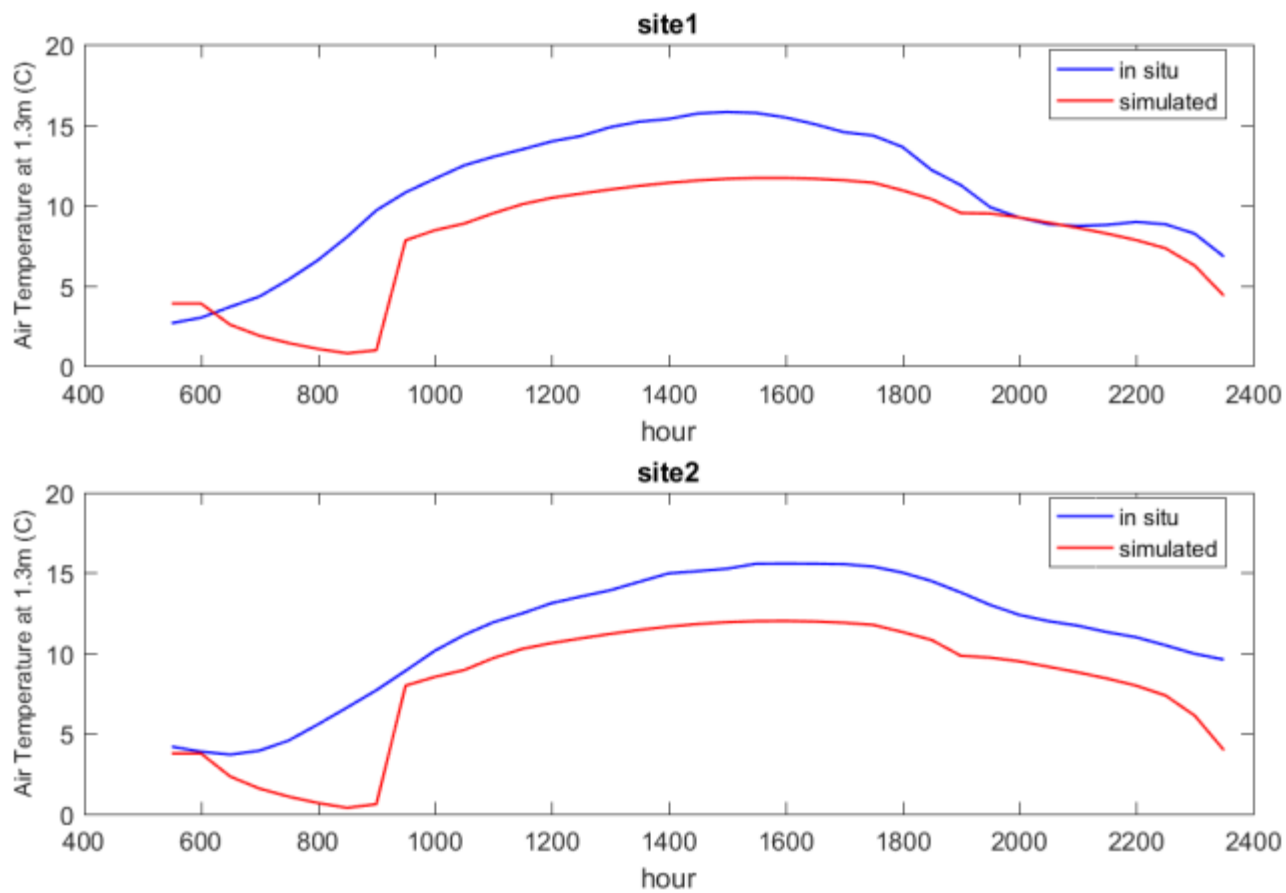
Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στον **πίνακα 4.1** προκύπτει ότι από τους δύο σταθμούς ο Lelystad εμφάνισε οριακά μεγαλύτερο RMSE (Lelystad= 3.42 Wm^{-2} , Loobos = 3.41 Wm^{-2}) και μεγαλύτερη μεταβλητότητα μεταξύ του μέσου σφάλματος και της τυπικής απόκλισης. Η πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των

προσομοιωμένων και οι παρατηρούμενων τιμών, που εκφράζεται με το συντελεστή συσχέτισης του Pearson (Lelystad=0.86, Loobos=0.94), φαίνεται και στην **εικόνα 4.2** Οι τιμές και για τους δύο σταθμούς κατανέμονται πάνω ή κοντά στη γραμμή εφαρμογής.

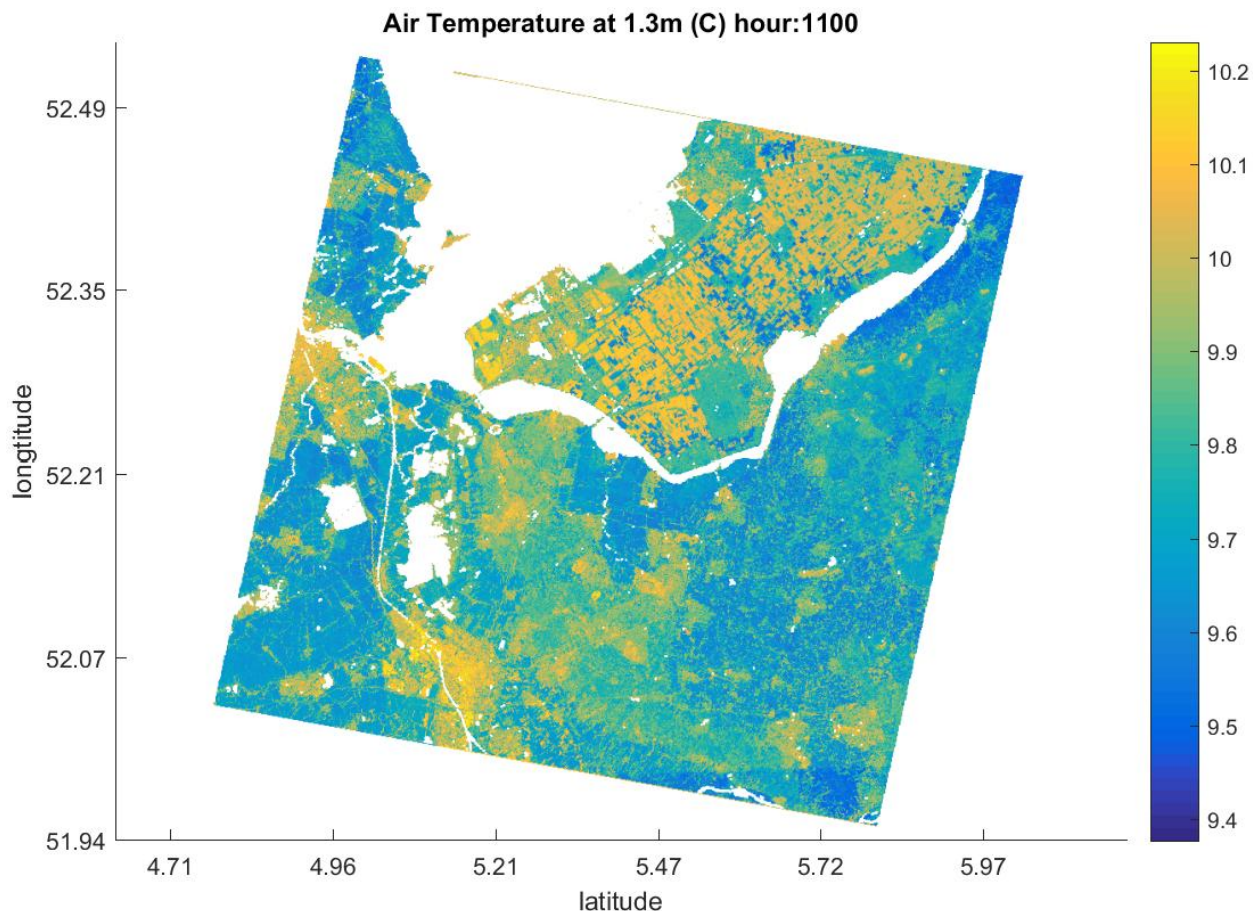


Εικόνα 4.2. Διάγραμμα διασποράς για την θερμοκρασία του αέρα. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos.

Όσον αφορά το διάγραμμα της **εικόνας 4.3** γίνεται αντιληπτό ότι το μοντέλο Sim2DSphere έκανε πανομοιότυπη προσομοίωση και για τους δύο σταθμούς. Με εξαίρεση το χρονικό διάστημα 6.00-9.00 που το μοντέλο εκτίμησε χαμηλότερα την T_{air} και στους δύο σταθμούς, ακολούθησε το μοτίβο της καμπύλης των in situ τιμών. Για το σταθμό Lelystad οι προσομοιωμένες με τις παρατηρούμενες τιμές για το χρονικό διάστημα 20.00-21.00 βρίσκονται σε ταύτιση.



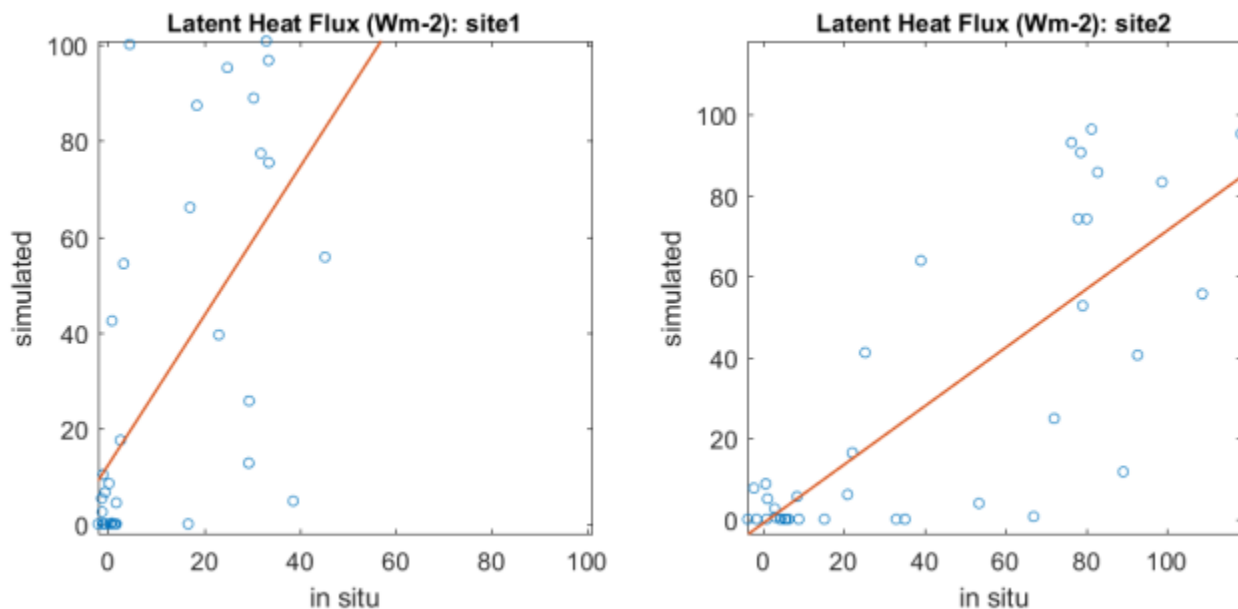
Εικόνα 4.3. Σύγκριση μεταξύ των in situ και των προσομοιωμένων από το μοντέλο Sim2DSphere τιμών για την θερμοκρασία του αέρα. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos.



Εικόνα 4.4. Χωρικός χάρτης για την θερμοκρασία του αέρα από το μοντέλο Sim2DSphere.

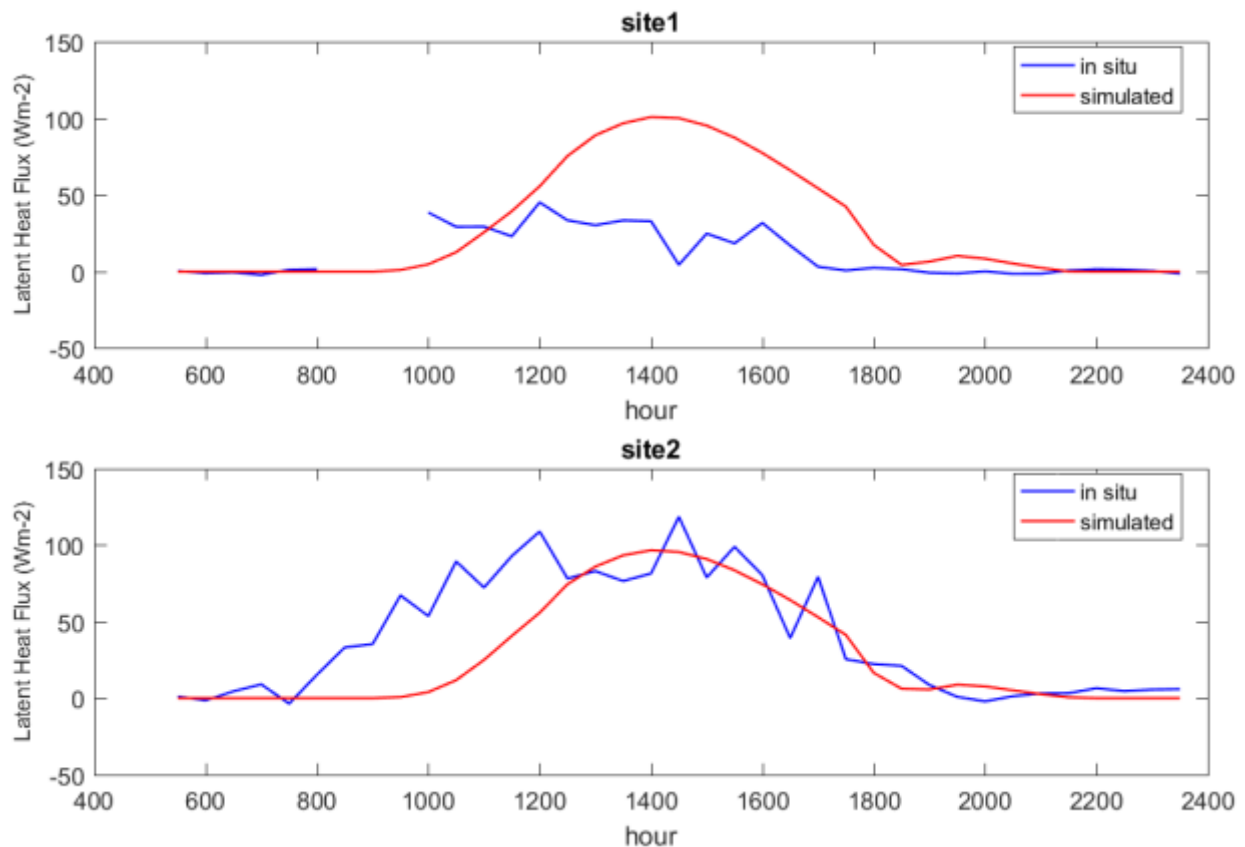
Λανθάνουσα ροή θερμότητας (Latent Heat-LE)

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στον **πίνακα 4.1** προκύπτει ότι από τους δύο σταθμούς ο Lelystad εμφάνισε μεγαλύτερο RMSE (Lelystad= 35.53 Wm^{-2} , Loobos= 26.97 Wm^{-2}) και ο Loobos μεγαλύτερη μεταβλητότητα μεταξύ του μέσου σφάλματος και της τυπικής απόκλισης. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson υποδεικνύει μια μέση γραμμική συσχέτιση για το σταθμό του Lelystad και ισχυρή για το σταθμό του Loobos (Lelystad=0.62, Loobos=0.79). Αυτό είναι εμφανές και στο διάγραμμα διασποράς που παρουσιάζεται στη **εικόνα 4.5** με τιμές να κατανέμονται μακριά από τη γραμμή εφαρμογής.



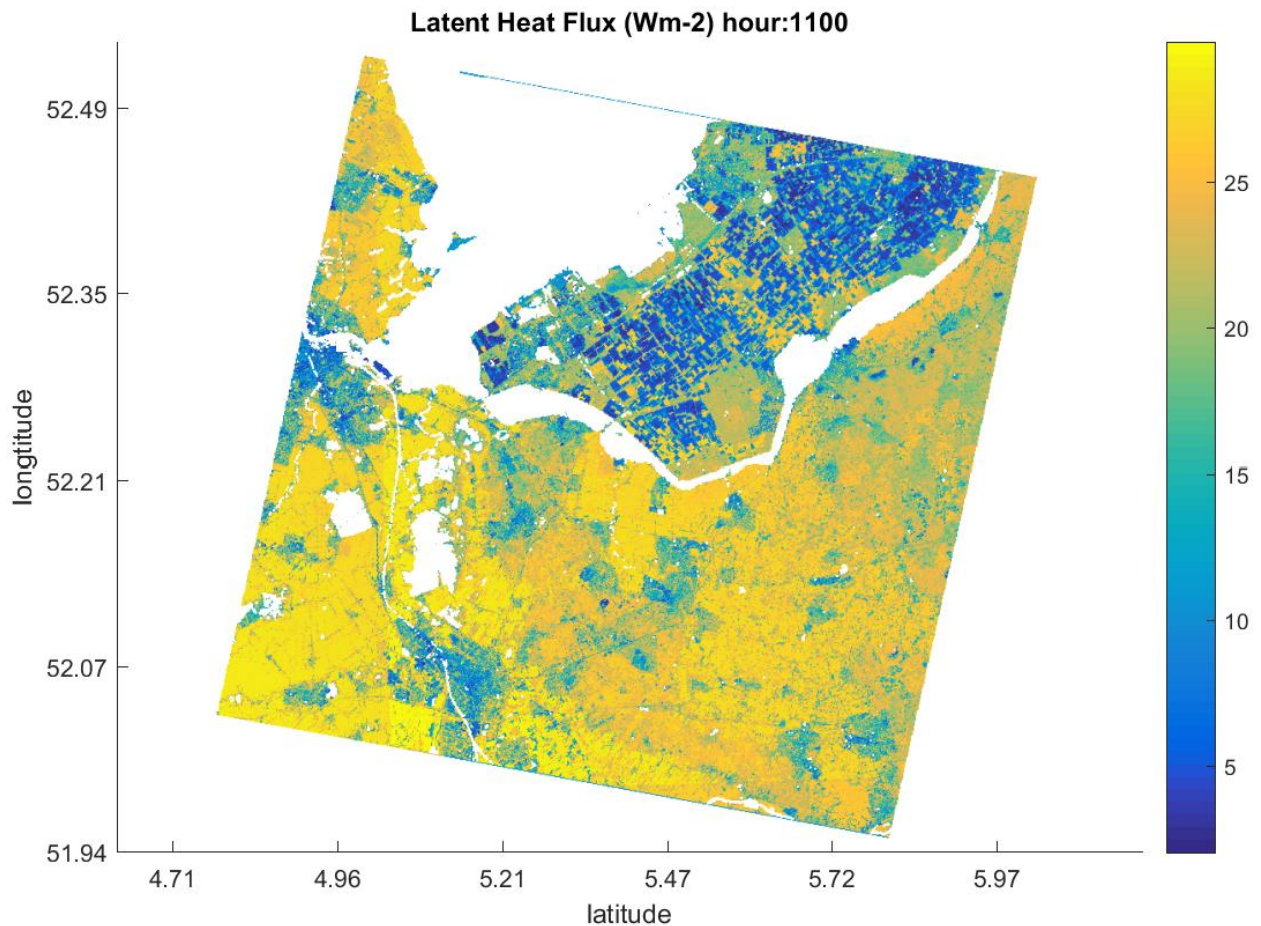
Εικόνα 4.5. Διάγραμμα διασποράς για τη λανθάνουσα ροή θερμότητας. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos.

Στην **εικόνα 4.6** παρουσιάζεται το διάγραμμα σύγκρισης των προσομοιωμένων με τις παρατηρούμενες τιμές. Είναι εμφανές ότι το μοτίβο των προσομοιωμένων τιμών ακολούθησε καλύτερα την καμπύλη των in situ για το σταθμό του Loobos. Για το σταθμό του Lelystad υπάρχει επικάλυψη της γραμμής των προσομοιωμένων με των παρατηρούμενων τιμών για τις πρωινές (6.00-8.00) και βραδινές ώρες (21.00-24.00). Για τις υπόλοιπες ώρες υπάρχει μία υπερεκτίμηση του LE από το μοντέλο. Όσον αφορά τα αποτελέσματα για τον σταθμό Loobos όπως αυτά παρουσιάζονται στην **εικόνα 4.6**, το μοντέλο ακολούθησε καλύτερα την καμπύλη των παρατηρούμενων τιμών, με τις προσομοιώσεις για τις πρωινές (6.00-8.00) και βραδινές ώρες (21.00-24.00) να βρίσκονται πολύ κοντά ακόμα και να ταυτίζονται με τις πραγματικές. Για το χρονικό διάστημα (8.00-12.00) η λανθάνουσα ροή θερμότητας εκτιμήθηκε χαμηλότερα από τις πραγματικές τιμές. Από τις (12.00-18.00) ώρες η καμπύλη των εκτιμώμενων τιμών ακολουθεί το μοτίβο των πραγματικών με μια ομαλοποίηση αυτών.



Εικόνα 4.6. Σύγκριση μεταξύ των in situ και των προσομοιωμένων από το μοντέλο Sim2DSphere τιμών για τη λανθάνουσα ροή θερμότητας. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos.

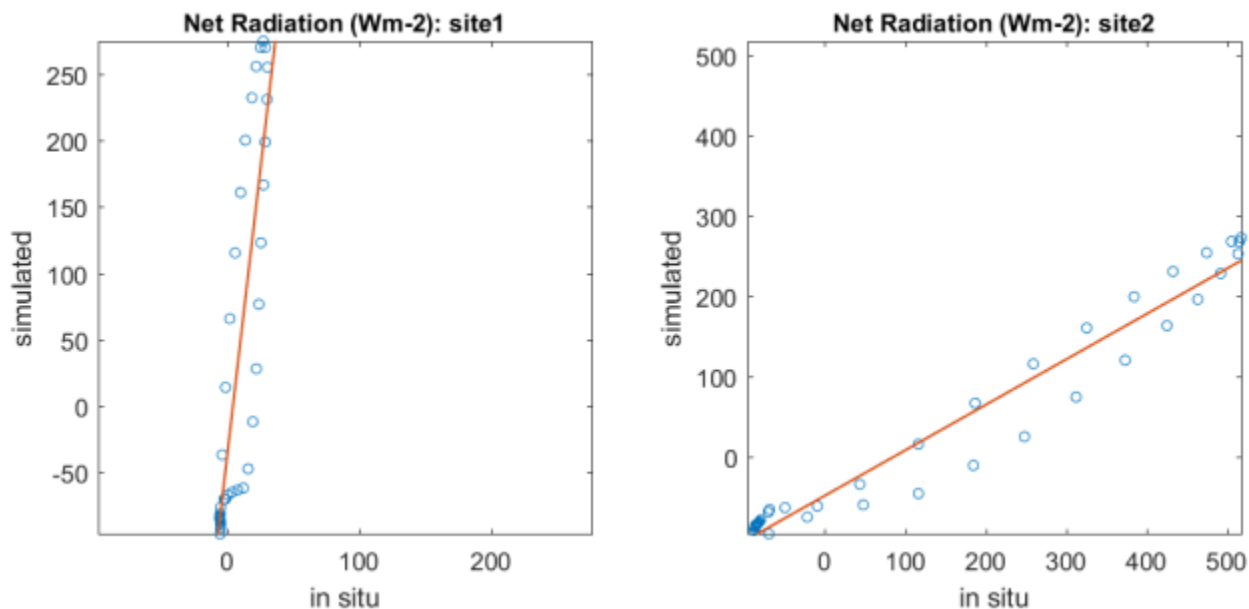
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στη μελέτη των (Petrooulos et al., 2014) για τους παράγοντες που επηρεάζουν τη λανθάνουσα ροή θερμότητας, προέκυψε ότι εκτός από τους τοπογραφικούς παράγοντες που την επηρεάζουν στον μεγαλύτερο βαθμό, σημαντικό ρόλο παίζει και το ποσοστό φυτοκάλυψης. Όπως, η κλίση και ο προσανατολισμός του εδάφους, έτσι και το ποσοστό φυτοκάλυψης παίζει καθοριστικό ρόλο στην ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια και κατ' επέκταση στην ανακλώμενη και διάχυτη. Μια άλλη παράμετρος που επηρεάζει την λανθάνουσα ροή θερμότητας είναι η εδαφική υγρασία. Ενδεχομένως αυτός να είναι και ο λόγος που το μοντέλο πραγματοποίησε καλύτερες προσομοιώσεις για τον σταθμό του Loobos.



Εικόνα 4.7 Χωρικός χάρτης για τη λανθάνουσα ροή θερμότητας από το μοντέλο Sim2DSphere.

Καθαρή ακτινοβολία (Net radiation-Rn)

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν **πίνακα 4.1** προκύπτει ότι από τους δύο σταθμούς ο Loobos εμφάνισε μεγαλύτερο RMSE (Lelystad=128.70 Wm^{-2} , Loobos=156.98 Wm^{-2}) και ο Lelystad μεγαλύτερη μεταβλητότητα μεταξύ του μέσου σφάλματος και της τυπικής απόκλισης. Πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση υποδεικνύεται από τον συντελεστή του Pearson και για τους δύο σταθμούς (Lelystad=0.85, Loobos=0.98), αυτό είναι εμφανές και στην **εικόνα 4.8** όπου φαίνεται η κατανομή των τιμών πάνω στην γραμμή εφαρμογής.

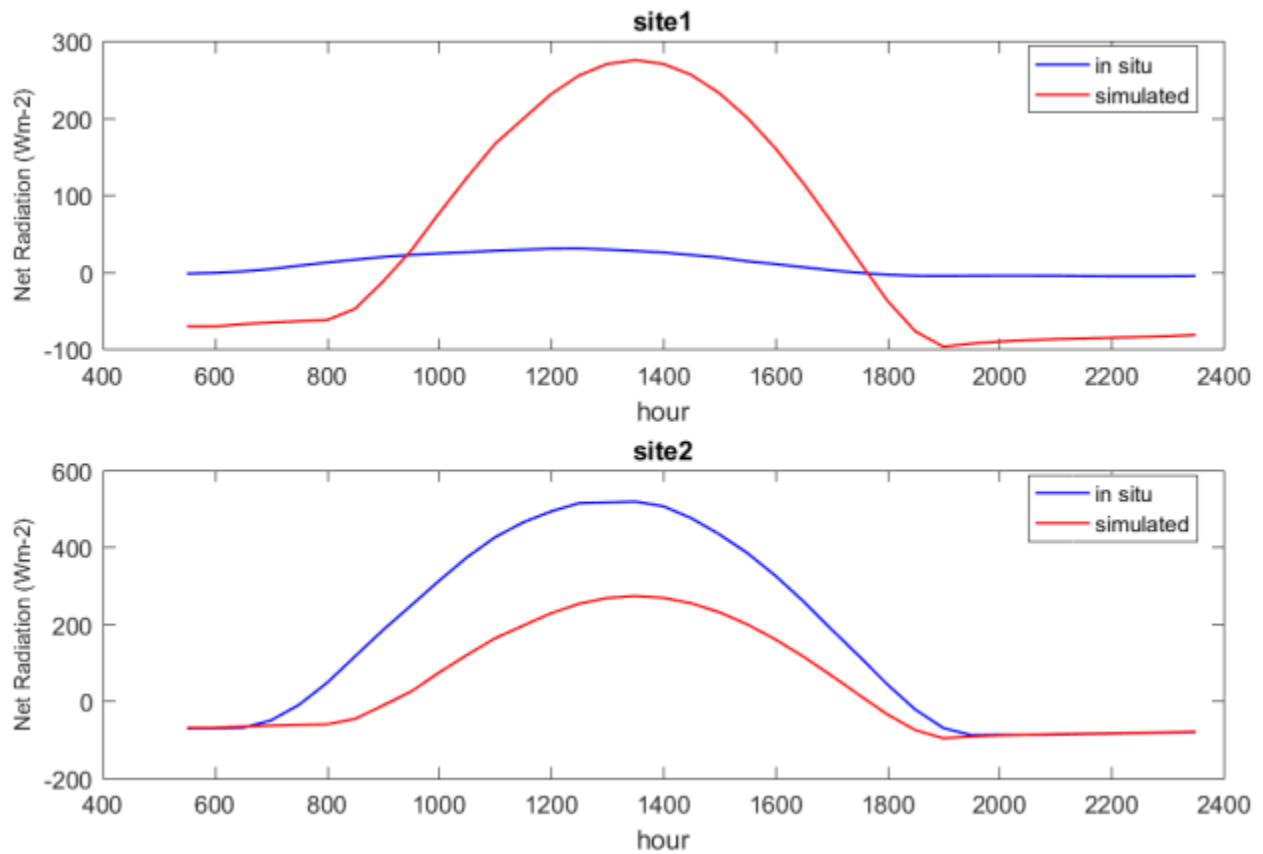


Εικόνα 4.8. Διάγραμμα διασποράς για την καθαρή ακτινοβολία. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos.

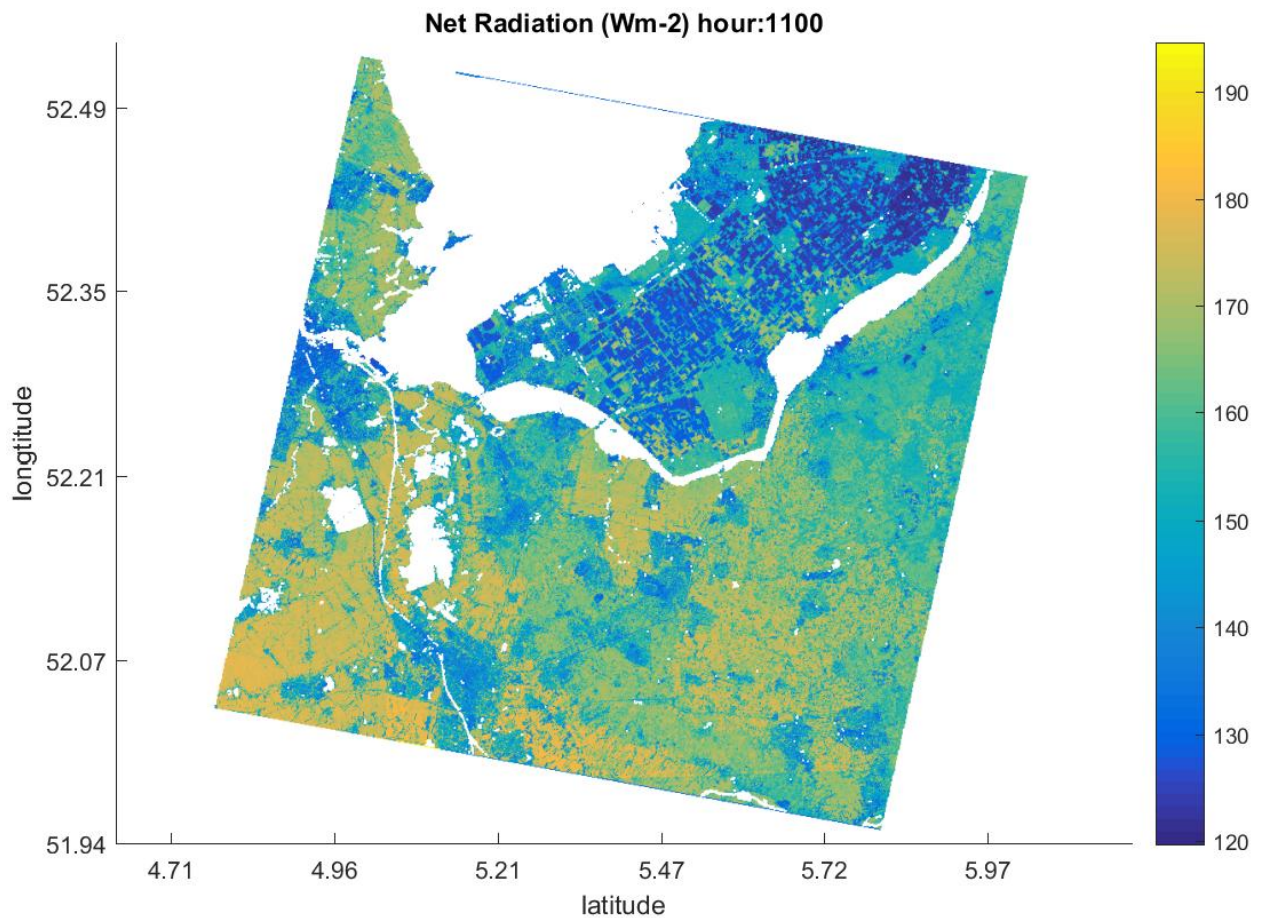
Όσον αφορά τα διαγράμματα σύγκρισης, όπως αυτά παρουσιάζονται στην **εικόνα 4.9** η καμπύλη που υπολογίστηκε από το μοντέλο για τον σταθμό Loobos ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα, με τις τιμές για τις πρωινές ώρες (6.00-7.00) να βρίσκονται πολύ κοντά στις πραγματικές και τις απογευματινές και βραδινές ώρες (19.00-24.00) να βρίσκονται σε πλήρη ταύτιση. Για τις υπόλοιπες ώρες της ημέρας το μοντέλο υποεκτίμησε την καθαρή ακτινοβολία, ακολουθώντας παρόλα το μοτίβο της καμπύλης των πραγματικών τιμών, με μέγιστη τιμή τις ώρες 13.00-14.00. Για το σταθμό του Lelystad το μοντέλο δεν ακολούθησε το μοτίβο της καμπύλης των πραγματικών τιμών. Για τις πρωινές (6.00-9.00) και απογευματινές και βραδινές ώρες (18.00-24.00) οι προβλέψεις ήταν μικρότερες από τις πραγματικές, ενώ για την υπόλοιπη ημέρα οι προβλέψεις ήταν μεγαλύτερες από τις πραγματικές τιμές.

Όπως προκύπτει από τη μελέτη των (Petrooulos et al., 2014) οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την καθαρή ακτινοβολία είναι οι τοπογραφικοί, κλίση και προσανατολισμός, και το ποσοστό φυτοκάλυψης (Fr) και φυλλικής επιφάνειας (LAI). Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, δεδομένου ότι η κλίση και ο προσανατολισμός είναι στα ίδια επίπεδα και για τους δύο σταθμούς, Loobos και Lelystad, η διαφορά στα αποτελέσματα πιθανόν να εξηγείται από την διαφορετικότητα στην χρήση/κάλυψη γης των δύο σταθμών. Το μοντέλο προσέγγισε καλύτερα την καμπύλη των πραγματικών

τιμών για τον σταθμό του Loobos που αποτελεί ένα δάσος κωνοφόρων και έχει υψηλότερο δείκτη φυλλικής επιφάνειας(LAI).



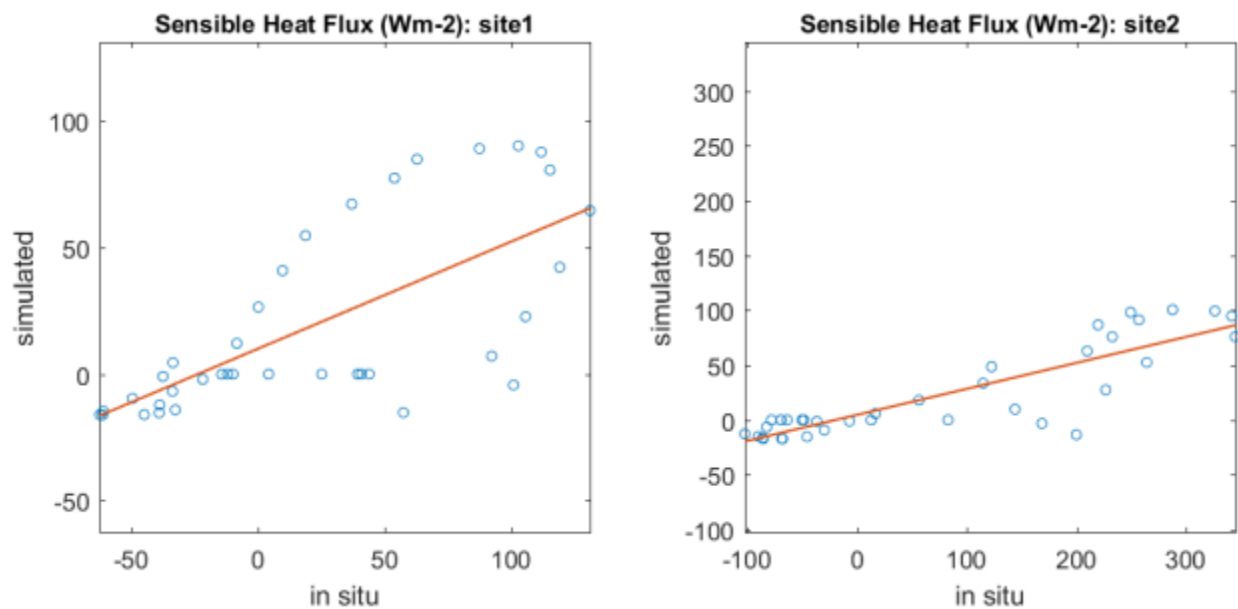
Εικόνα 4.9 Σύγκριση μεταξύ των in situ και των προσομοιωμένων από το μοντέλο Sim2DSphere τιμών για την καθαρή ακτινοβολία. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos.



Εικόνα 4.10 Χωρικός χάρτης για την καθαρή ακτινοβολία από το μοντέλο Sim2DSphere.

Αισθητή ροή θερμότητας (Sensible Heat Flux-H)

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν **πίνακας 4.1** προκύπτει ότι από τους δύο σταθμούς ο Loobos εμφάνισε μεγαλύτερο RMSE (Lelystad= 43.11 Wm^{-2} , Loobos= 126.65 Wm^{-2}) και ο Lelystad μεγαλύτερη μεταβλητότητα μεταξύ του μέσου σφάλματος και της τυπικής απόκλισης. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson υποδεικνύει μια μέση γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων με τις παρατηρούμενες τιμές για το σταθμό του Lelystad ενώ ισχυρή γραμμική συσχέτιση για το σταθμό του Loobos (Lelystad=0.69, Loobos=0.87). Από το διάγραμμα διασποράς που παρουσιάζεται στη **εικόνα 4.11** φαίνεται ότι οι τιμές για το σταθμό Loobos κατανέμονται πιο κοντά στην γραμμή εφαρμογής, ενώ για τον σταθμό Lelystad αποκλίνουν αρκετά από αυτή.

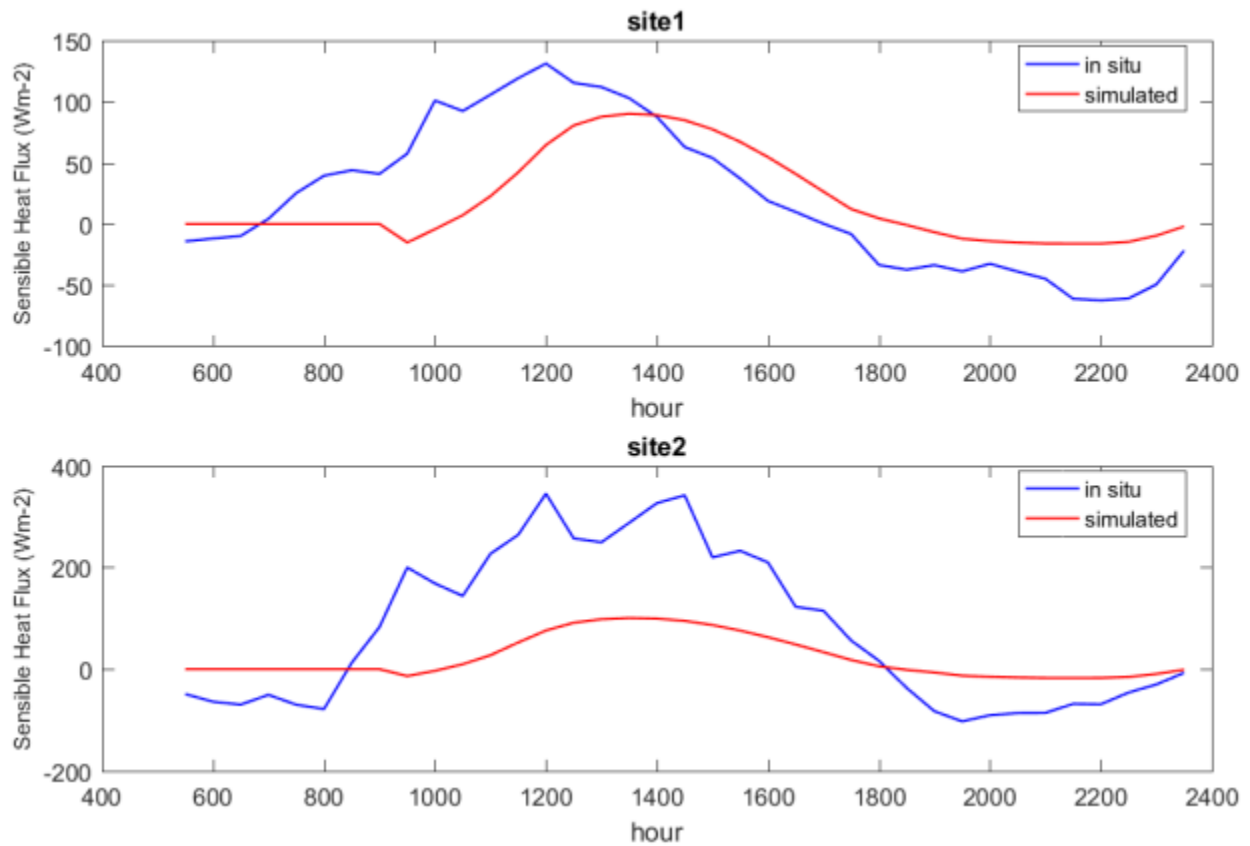


Εικόνα 4.11 Διάγραμμα διασποράς για την αισθητή ροή θερμότητας. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos.

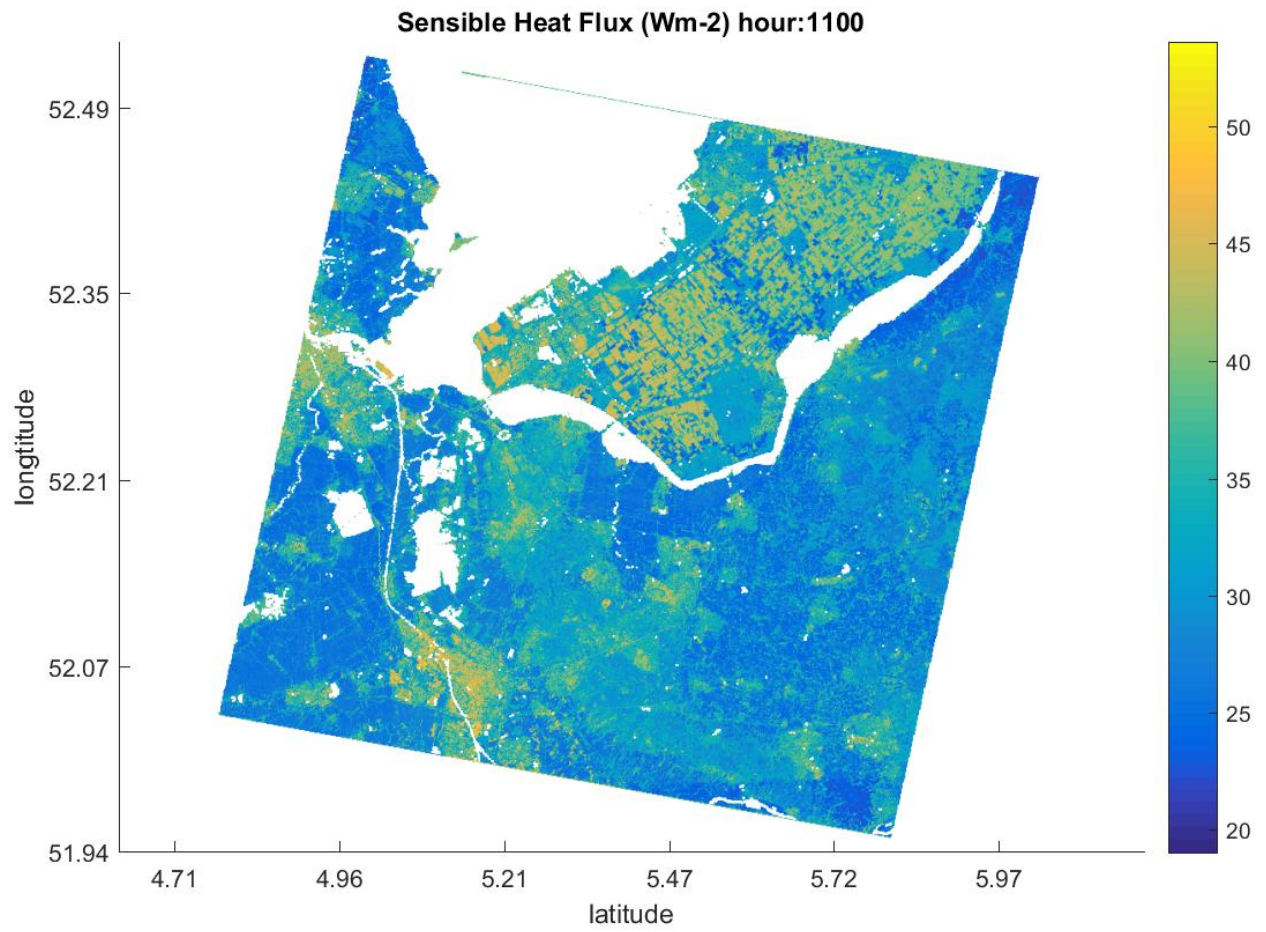
Στην **εικόνα 4.12** που παρουσιάζονται τα διαγράμματα σύγκρισης των προσομοιωμένων με τις πραγματικές τιμές, γίνεται εμφανές ότι η καμπύλη των προσομοιωμένων τιμών ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα για τον σταθμό Lelystad. Οι πρωινές (6.00-7.00) και μεσημεριανές έως βραδινές ώρες (14.00-24.00) βρίσκονται πολύ κοντά με το μοντέλο να υπερεκτιμά την αισθητή ροή θερμότητας. Για τις ώρες 7.00-14.00 το μοντέλο υποεκτίμησε την αισθητή ροή θερμότητας. Για το σταθμό Loobos οι πρωινές (6.00-8.00) και απογευματινές έως βραδινές ώρες (18.00-24.00) υπολογίστηκαν καλύτερα, με το μοντέλο να υπερεκτιμά την αισθητή ροή θερμότητας. Για το διάστημα 8.00-18.00 το μοντέλο υποεκτίμησε την αισθητή ροή θερμότητας.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την αισθητή ροή θερμότητας είναι οι τοπογραφικοί, κλίση και προσανατολισμός, και το ποσοστό φυτοκάλυψης (F_r) και το ύψος της βλάστησης (Petropoulos et al., 2014). Στην συγκεκριμένη μελέτη η κλίση και ο προσανατολισμός είναι στα ίδια επίπεδα και για τους δύο σταθμούς, Loobos και Lelystad, η διαφορά στα αποτελέσματα πιθανόν να εξηγείται από την διαφορετικότητα στην χρήση/κάλυψη γης των δύο σταθμών. Το μοντέλο προσέγγισε καλύτερα την

καμπύλη των πραγματικών τιμών για τον σταθμό του Lelystad που αποτελεί μια χορτολιβαδική έκταση με χαμηλότερο ύψος βλάστησης.



Εικόνα 4.12 Σύγκριση μεταξύ των in situ και των προσομοιωμένων από το μοντέλο Sim2DSphere τιμών για την αισθητή ροή θερμότητας. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos



Εικόνα 4.13 Χωρικός χάρτης για την αισθητή ροή θερμότητας από το μοντέλο Sim2DSphere.

4.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων Sim2DSphere με το SimSphere 1D

4.2.1. Αποτελέσματα του μοντέλου SimSphere 1D

Πίνακας 4.14 Αποτελέσματα του μοντέλου SimSphere 1D

Site name:	Air Temperature	Latent Heat	Net Radiation	Sensible Heat
LELYSTAD				
ME	-6.19	8.03	31.37	-0.61
MAE	6.19	10.07	113.53	27.89
RMSE	6.36	15.45	132.35	33.78
R	0.93	0.84	0.95	0.85
ErrMin	-8.1	-16.99	-91.88	-76.62
ErrMax	-2.42	50.81	248.61	54.11
St.Dev	1.9	13.51	130.41	34.28
Kurtosis	5.86	3.95	1.53	2.15

Site name:	Air Temperature	Latent Heat	Net Radiation	Sensible Heat
LOOBOS				
ME	-3.71	-1.36	-59.99	-39.88
MAE	3.71	17.44	60.80	93.23
RMSE	4.3	22.62	83.94	115.23
R	0.81	0.84	0.99	0.9
ErrMin	-8.99	-53.76	-172.84	-249.6
ErrMax	-0.09	45.76	5.25	96
St.Dev	2.28	22.93	59.54	110.94
Kurtosis	2.82	2.79	1.74	1.73

Air Temperature (T_{air}):

Σταθμός Lelystad:

Από τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.14** προκύπτει ότι οι τιμές έχουν μεγάλη απόκλιση από τον μέσο τους ($ME = -6.03 \text{ C}^\circ$, $SD=2.83$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=6.19$) και το εύρος σφάλματος των παρατηρήσεων κυμαίνεται μεταξύ -8.72 C° και 0.18 C° . Το RMSE είναι 6.51 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.85$) φανερώνει πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος η κατανομή των παρατηρήσεων σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=3.42$) έχει πλατύκυρτη μορφή.

Σταθμός Loobos:

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.14** οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα ως προς τον μέσο τους ($ME = -4.02 \text{ C}^\circ$, $SD=2.23$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=3.71$) και οι ακραίες τιμές του σφάλματος των παρατηρήσεων είναι ελάχιστη -6.65 C° και μέγιστη -0.21 C° . Το RMSE είναι 4.5 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.87$) φανερώνει πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος οι παρατηρήσεις σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=2.36$) παρουσιάζουν λεπτόκυρτη κατανομή

Latent heat (LE):

Σταθμός Lelystad:

Από τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.14** προκύπτει ότι οι τιμές έχουν μεγάλη απόκλιση από τον μέσο τους ($ME = 8.03 \text{ Wm}^{-2}$, $SD=13.51$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=10.07$) και το εύρος σφάλματος των παρατηρήσεων κυμαίνεται μεταξύ -16.99 Wm^{-2} και 50.81 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 15.45 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.84$) υποδεικνύει μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος η κατανομή των παρατηρήσεων σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=3.42$) έχει πλατύκυρτη μορφή.

Σταθμός Loobos:

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.14** οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα ως προς τον μέσο τους ($ME = -1.36 \text{ Wm}^{-2}$, $SD=59.54$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=17.44$) και οι ακραίες τιμές του σφάλματος είναι ελάχιστη -53.76 Wm^{-2} και μέγιστη 45.76 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 22.62 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.84$) φανερώνει μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος οι παρατηρήσεις σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=2.36$) παρουσιάζουν λεπτόκυρτη κατανομή.

Net radiation (Rn):

Σταθμός Lelystad:

Από τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.14** προκύπτει ότι οι τιμές έχουν μεγάλη απόκλιση από τον μέσο τους ($ME = 31.37 \text{ Wm}^{-2}$, $SD = 130.41$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=113.53$) και το εύρος σφάλματος κυμαίνεται μεταξύ -91.88 Wm^{-2} και 248.61 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 132.35 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.85$) υποδεικνύει μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος η κατανομή των παρατηρήσεων σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=1.53$) έχει λεπτόκυρτη μορφή.

Σταθμός Loobos:

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.14** οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα ως προς τον μέσο τους ($ME = -59.99 \text{ Wm}^{-2}$, $SD=59.54$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=60.80$) και οι ακραίες τιμές σφάλματος είναι ελάχιστη -172.84 Wm^{-2} και μέγιστη 5.25 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 83.94 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.99$) φανερώνει μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος οι παρατηρήσεις σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=1.74$) παρουσιάζουν λεπτόκυρτη κατανομή.

Sensible heat (H):

Σταθμός Lelystad:

Από τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.14** προκύπτει ότι οι τιμές έχουν μεγάλη απόκλιση από τον μέσο τους ($ME = -0.61 \text{ Wm}^{-2}$, $SD = 34.28$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=27.89$) και το εύρος σφάλματος των παρατηρήσεων κυμαίνεται μεταξύ -76.6 Wm^{-2} και 54.11 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 33.78 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.85$) υποδεικνύει μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος η κατανομή των παρατηρήσεων σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=2.15$) έχει λεπτόκυρτη μορφή.

Σταθμός Loobos:

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του **πίνακα 4.14** οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα ως προς τον μέσο τους ($ME = -39.88 \text{ Wm}^{-2}$, $SD=110.94$). Το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής είναι ($MAE=93.23$) και οι ακραίες τιμές σφάλματος είναι ελάχιστη -249.6 Wm^{-2} και μέγιστη 96 Wm^{-2} . Το RMSE είναι 115.23 Wm^{-2} . Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson ($R=0.9$) φανερώνει μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών. Τέλος οι παρατηρήσεις σύμφωνα με τον συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=1.73$) παρουσιάζουν λεπτόκυρτη κατανομή.

4.2.2. Σύγκριση αποτελεσμάτων των Sim2DSphere με το SimSphere 1D

Πίνακας 4.15. Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων 1D και 2D με την εφαρμογή των στατιστικών δεικτών της μέσης τιμής σφάλματος(bias), του μέσου απόλυτου σφάλματος (Mean absolute error), της τετραγωνικής ρίζας μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), του συντελεστή γραμμικής συσχέτισης του Pearson (RP), της μέγιστης και ελάχιστης τιμής (ErrMax, ErrMin), της τυπικής απόκλισης (Standard Deviation) και του συντελεστή κύρτωσης (Kurtosis).

	1 D				2D			
site name:	Air Tem	Lat Heat	Net Rad	Sens Heat	Air Tem	Lat Heat	Net Rad	Sens Heat
LELYSTAD								
ME	-6.19	8.03	31.37	-0.61	-2.76	18.94	30.89	-2.49
MAE	6.19	10.07	113.53	27.89	2.88	23.41	109.19	36.20
RMSE	6.36	15.45	132.35	33.78	3.42	35.53	128.70	43.11
R	0.93	0.84	0.95	0.85	0.86	0.62	0.85	0.69
ErrMin	-8.1	-16.99	-91.88	-76.62	-8.69	-33.79	-91.81	-105.30
ErrMax	-2.42	50.81	248.61	54.11	1.22	95.69	247.49	46.43
St.Dev	1.9	13.51	130.41	34.28	2.05	30.50	126.66	43.63
Kurtosis	5.86	3.95	1.53	2.15	3.90	2.66	1.68	2.49
	1 D				2D			
site name:	Air Tem	Lat Heat	Net Rad	Sens Heat	Air Tem	Lat Heat	Net Rad	Sens Heat
LOOBOS								
ME	-3.71	-1.36	-59.99	-39.88	-3.12	-12.24	-116.75	-52.87
MAE	3.71	17.44	60.80	93.23	3.12	18.42	117.37	104.54
RMSE	4.3	22.62	83.94	115.23	3.41	26.97	156.98	126.65
R	0.81	0.84	0.99	0.9	0.94	0.79	0.98	0.87
ErrMin	-8.99	-53.76	-172.84	-249.6	-7.09	-77.43	-267.83	-268.82
ErrMax	-0.09	45.76	5.25	96	-0.11	24.83	3.28	89.75
St.Dev	2.28	22.93	59.54	110.94	1.38	24.36	106.38	116.67
Kurtosis	2.82	2.79	1.74	1.73	4.44	3.30	1.35	1.58

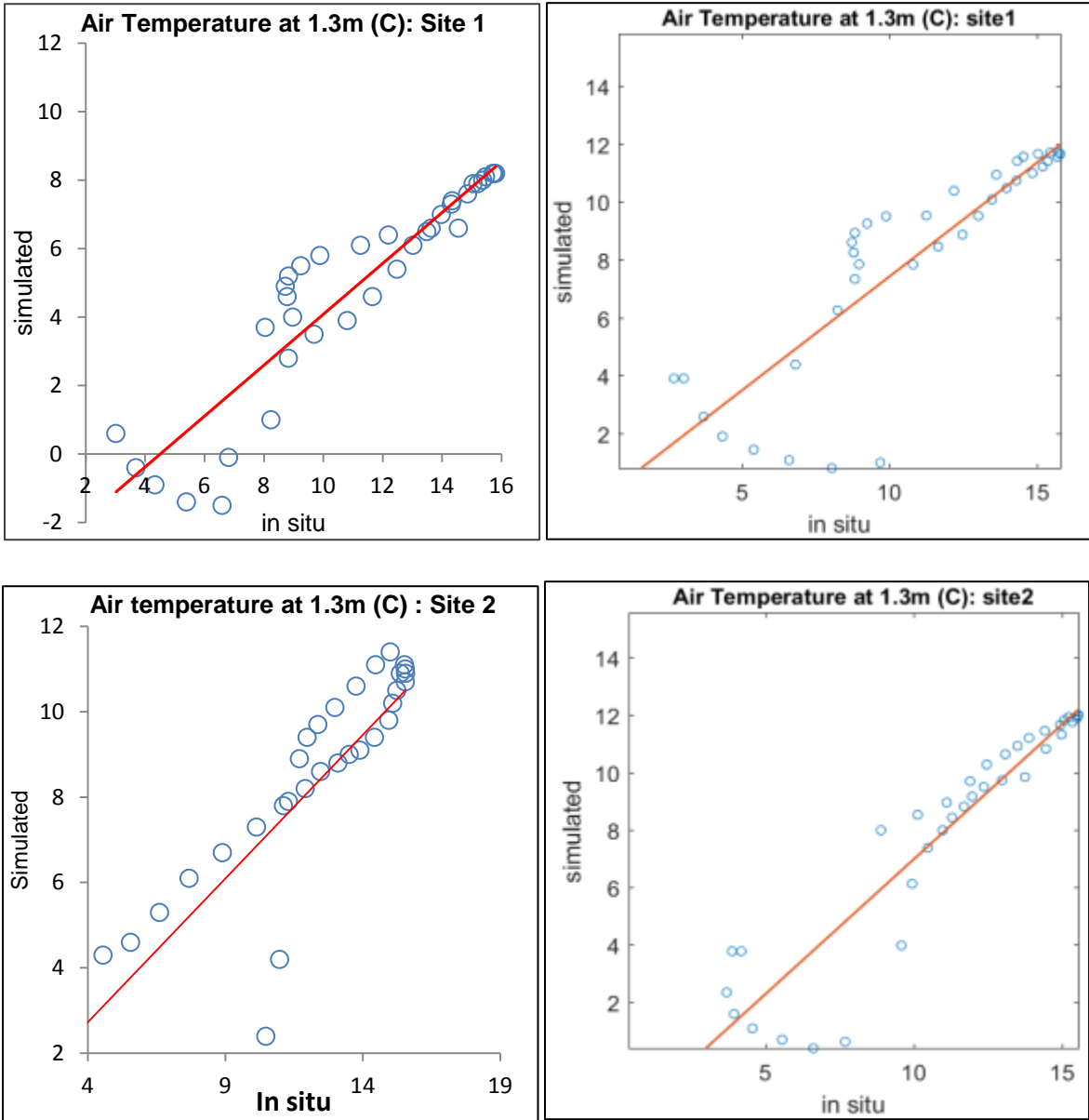
Θερμοκρασία του αέρα (Air Temperature-Tair)

Όπως είναι εμφανές από τον **πίνακα 4.15** αλλά και από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις **εικόνες 4.16 και 4.17** τα αποτελέσματα από τα δύο μοντέλα είναι πολύ κοντά. Το RMSE και MAE είναι μικρότερο στο Sim2DSphere και για τους δύο σταθμούς. Ο συντελεστής γραμμικής συσχέτισης του Pearson φανερώνει μια πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση μεταξύ των προσομοιωμένων και παρατηρούμενων τιμών

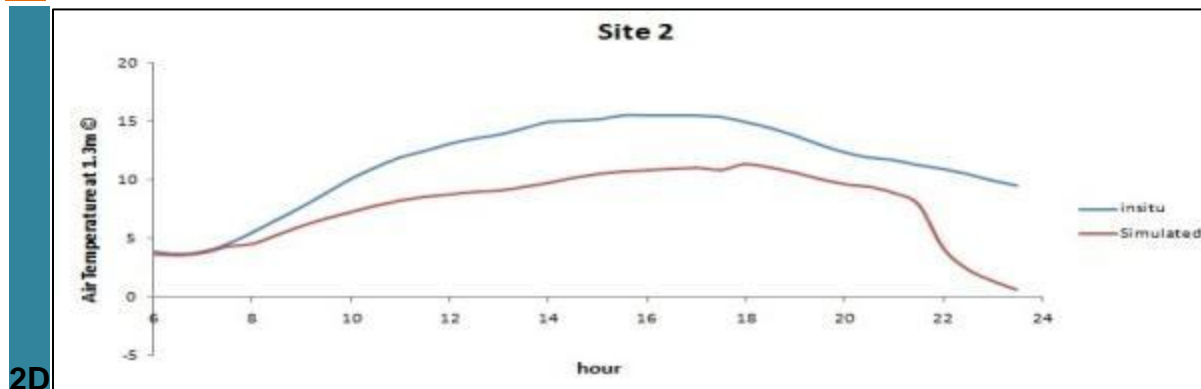
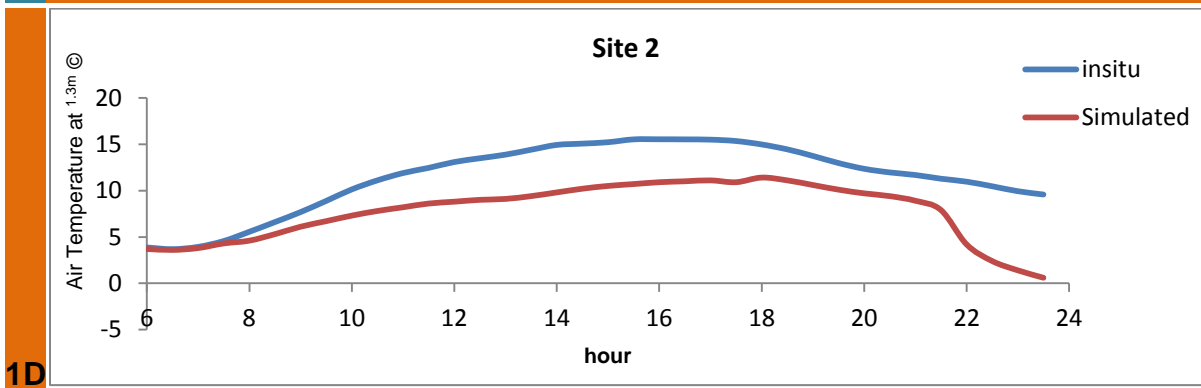
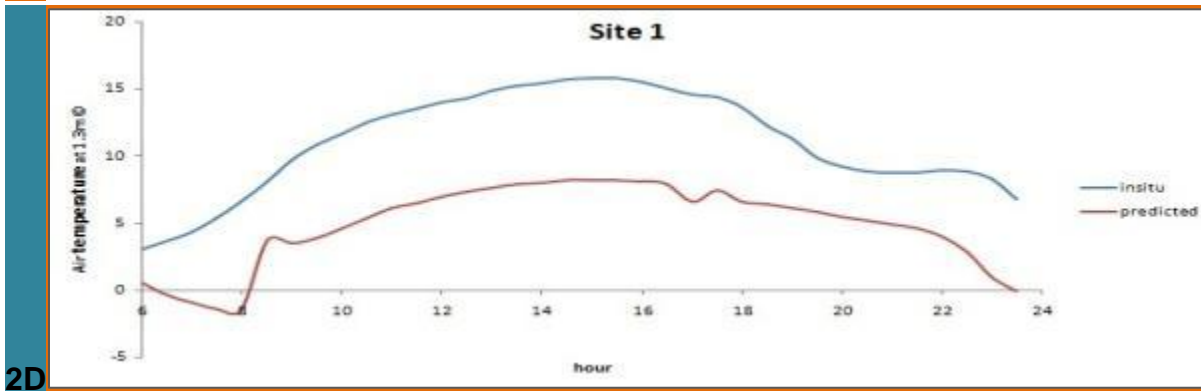
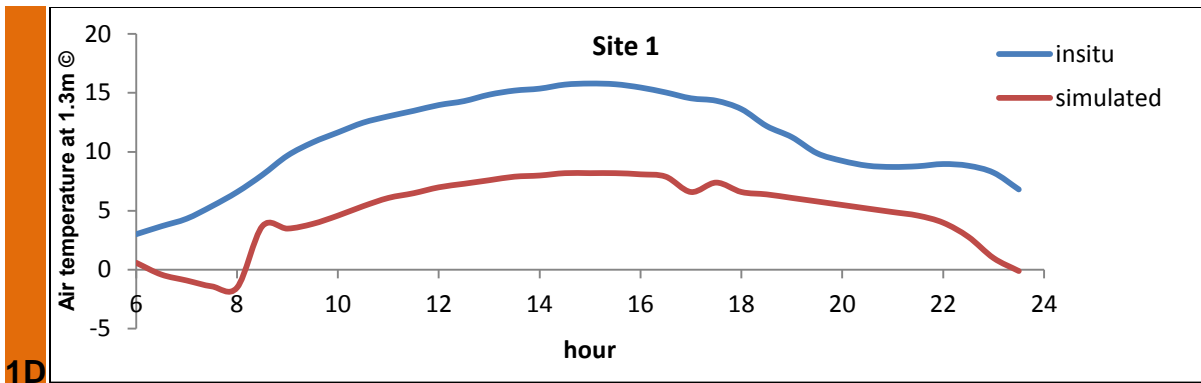
και στα δύο μοντέλα. Αυτό είναι εμφανές και στα διαγράμματα της **εικόνας 4.16** με τις τιμές να βρίσκονται πολύ κοντά στη γραμμή εφαρμογής. Η τυπική απόκλιση είναι μικρή και στα δύο μοντέλα. Οι κατανομές παρουσιάζονται ως πλατύκυρτες και στα δύο μοντέλα για τον σταθμό του Lelystad, ενώ για το σταθμό του Loobos το μοντέλο 1D υποδεικνύει λεπτόκυρτη κατανομή με συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=2.82$) και το μοντέλο 2D πλατύκυρτη κατανομή με συντελεστή κύρτωσης ($kurtosis=4.44$).

Όσον αφορά τα διαγράμματα της **εικόνας 4.17** τα μοντέλα Sim2DSphere και SimSphere 1D έκαναν πανομοιότυπες προσομοιώσεις και για τους δύο σταθμούς.

1 D	2D
------------	-----------



Εικόνα 4.16 Σύγκριση των διαγραμμάτων διασποράς των μοντέλων 1D και 2D για την θερμοκρασία του αέρα. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos.



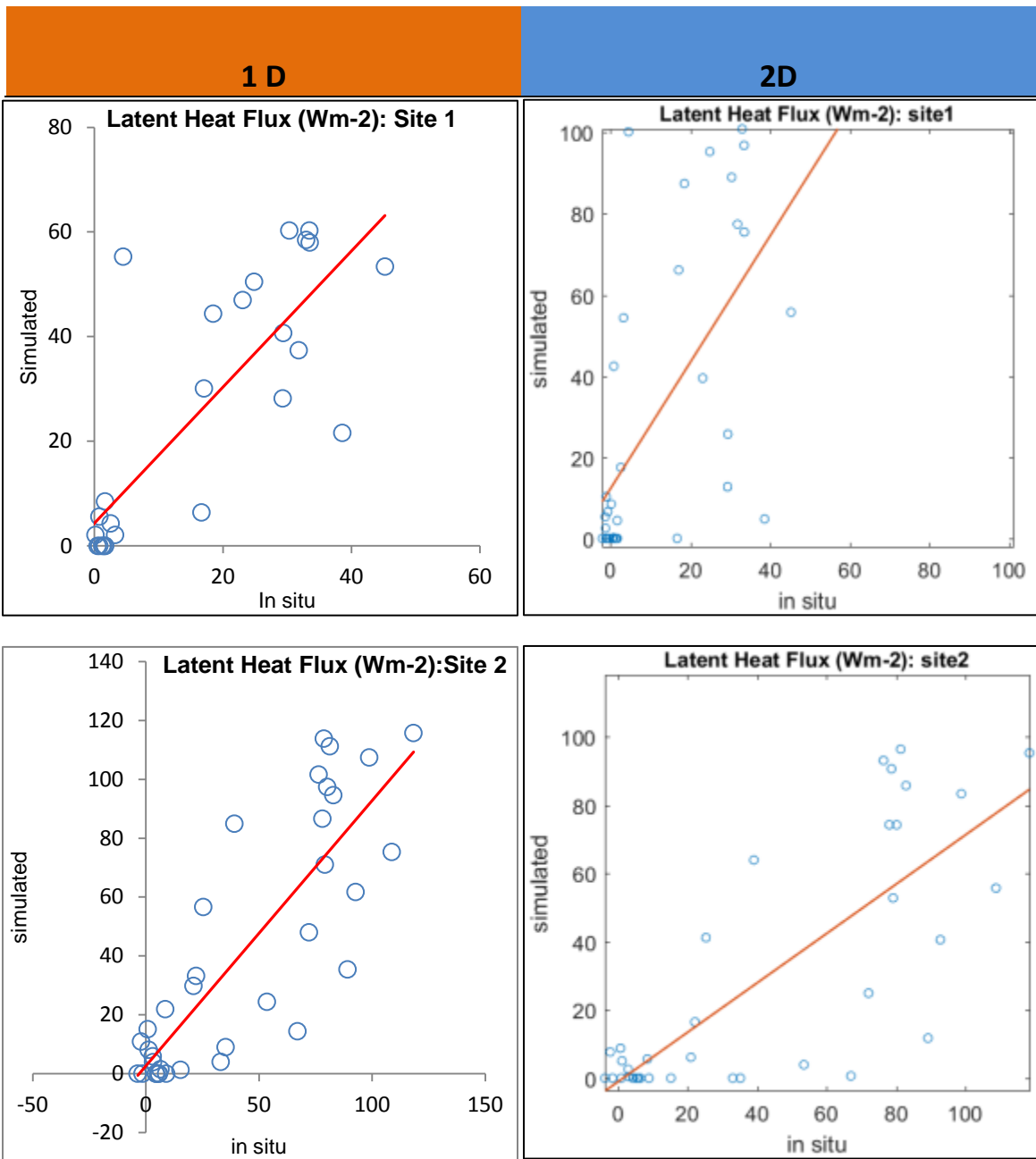
Εικόνα 4.17. Σύγκριση των in situ και των προσομοιωμένων από τα μοντέλα SimSphere 1D και Sim2DSphere τιμών για την θερμοκρασία του αέρα. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos.

Λανθάνουσα ροή θερμότητας (Latent Heat-LE)

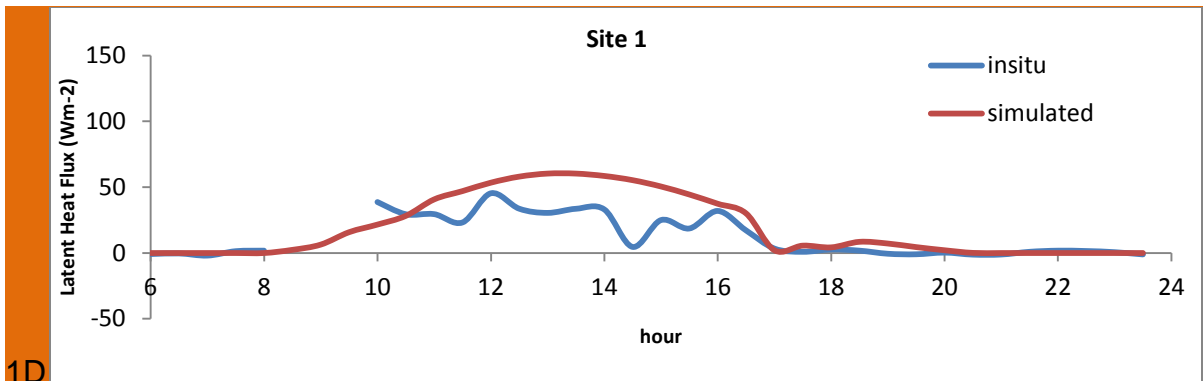
Όπως γίνεται αντιληπτό από τον **πίνακα 4.15** αλλά και από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις **εικόνες 4.18 και 4.19** τα αποτελέσματα από τα δύο μοντέλα είναι πολύ κοντά για το σταθμό του Loobos. Τα RMSE και MAE που εξήχθησαν από το μοντέλο Sim2DSphere πλησιάζουν αυτά του μοντέλου 1D. Επίσης η διασπορά των μεταβλητών γύρω από το μέσο, η οποία εκφράζεται με το δείκτη της τυπικής απόκλισης (St.Dev) έχει μικρή διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Όσον αφορά τη γραμμική συσχέτιση μεταξύ των παρατηρούμενων και προσομοιωμένων τιμών, τόσο το μοντέλο 2D όσο και το 1D φανέρωσαν πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση. Αυτό είναι εμφανές και στα διαγράμματα της **εικόνας 4.18** Η μόνη διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα έγκειται στον τρόπο κατανομής των παρατηρήσεων, που εκφράζεται με το συντελεστή κύρτωσης. Στο μοντέλο 2D η κατανομή παρουσιάζεται ως πλατύκυρτη (kurtosis=3.30), ενώ στο 1D λεπτόκυρτη (kurtosis=2.79).

Για το σταθμό του Lelystad τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο μοντέλων εμφάνισαν αρκετές διαφορές. Οι τιμές για τα RMSE και MAE υπολογίστηκαν πολύ υψηλότερες από το μοντέλο 2D. Η γραμμική συσχέτιση μεταξύ των παρατηρήσεων υπολογίστηκε ως μέση από το μοντέλο 2D ενώ ως πολύ ισχυρή από το μοντέλο 1D. Αυτό είναι εμφανές και στην **εικόνα 4.18** όπου τα σημεία για το σταθμό του Lelystad από το μοντέλο 2D κατανέμονται πιο μακριά από τη γραμμή εφαρμογής, συγκριτικά με αυτά του μοντέλου 1D. Διαφορές υπάρχουν επίσης στον τρόπο κατανομής των παρατηρήσεων, με το μοντέλο 2D να υποδεικνύει λεπτόκυρτη κατανομή, ενώ το 1D πλατύκυρτη.

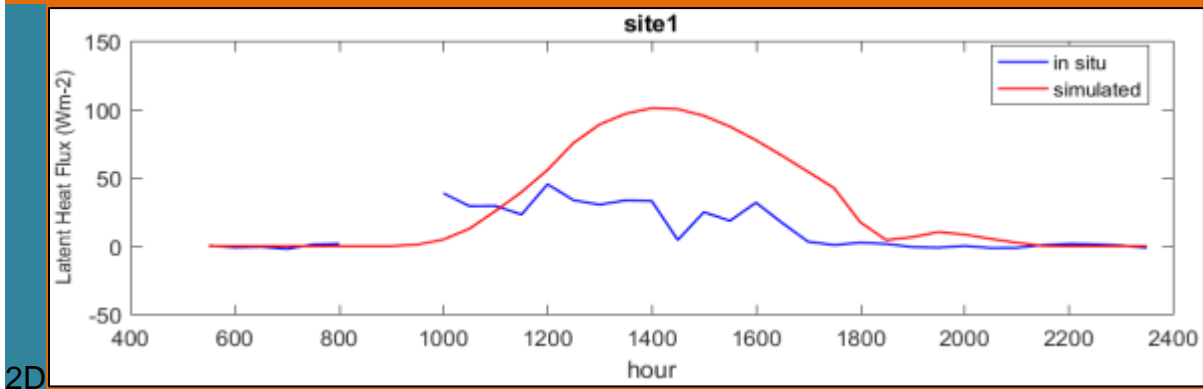
Όσον αφορά τα διαγράμματα της **εικόνας 4.19** τα μοντέλα Sim2DSphere και SimSphere 1D ακολούθησαν το ίδιο μοτίβο προσομοίωσης και για τους δύο σταθμούς. Για το σταθμό του Lelystad το μοντέλο 1D προσέγγισε καλύτερα τις in situ τιμές, ενώ για τον σταθμό του Loobos το Sim2DSphere.



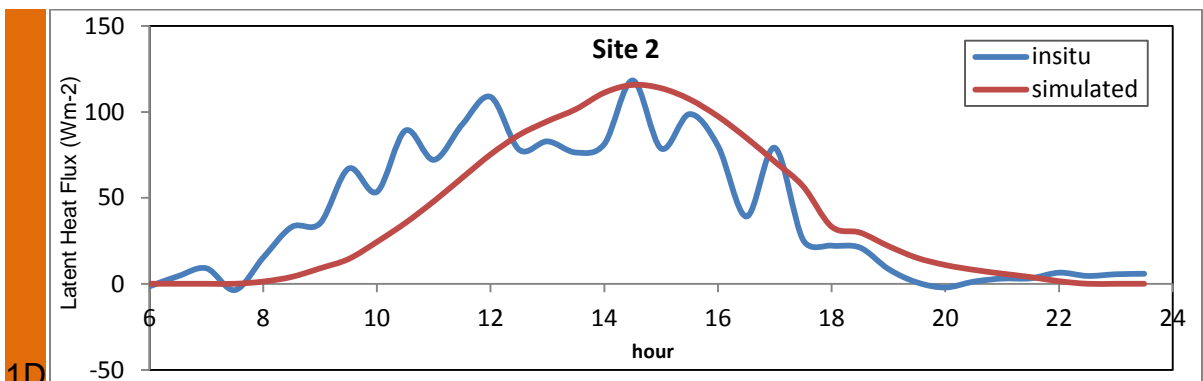
Εικόνα 4.18 Σύγκριση των διαγραμμάτων διασποράς των μοντέλων SimSphere 1D και Sim2DSphere για την λανθάνουσα ροή θερμότητας, Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos



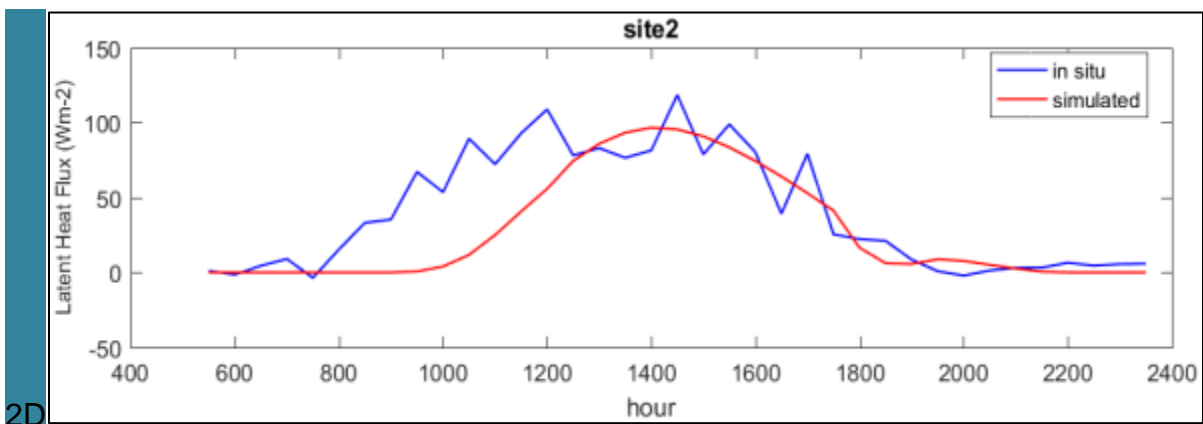
1D



2D



1D



2D

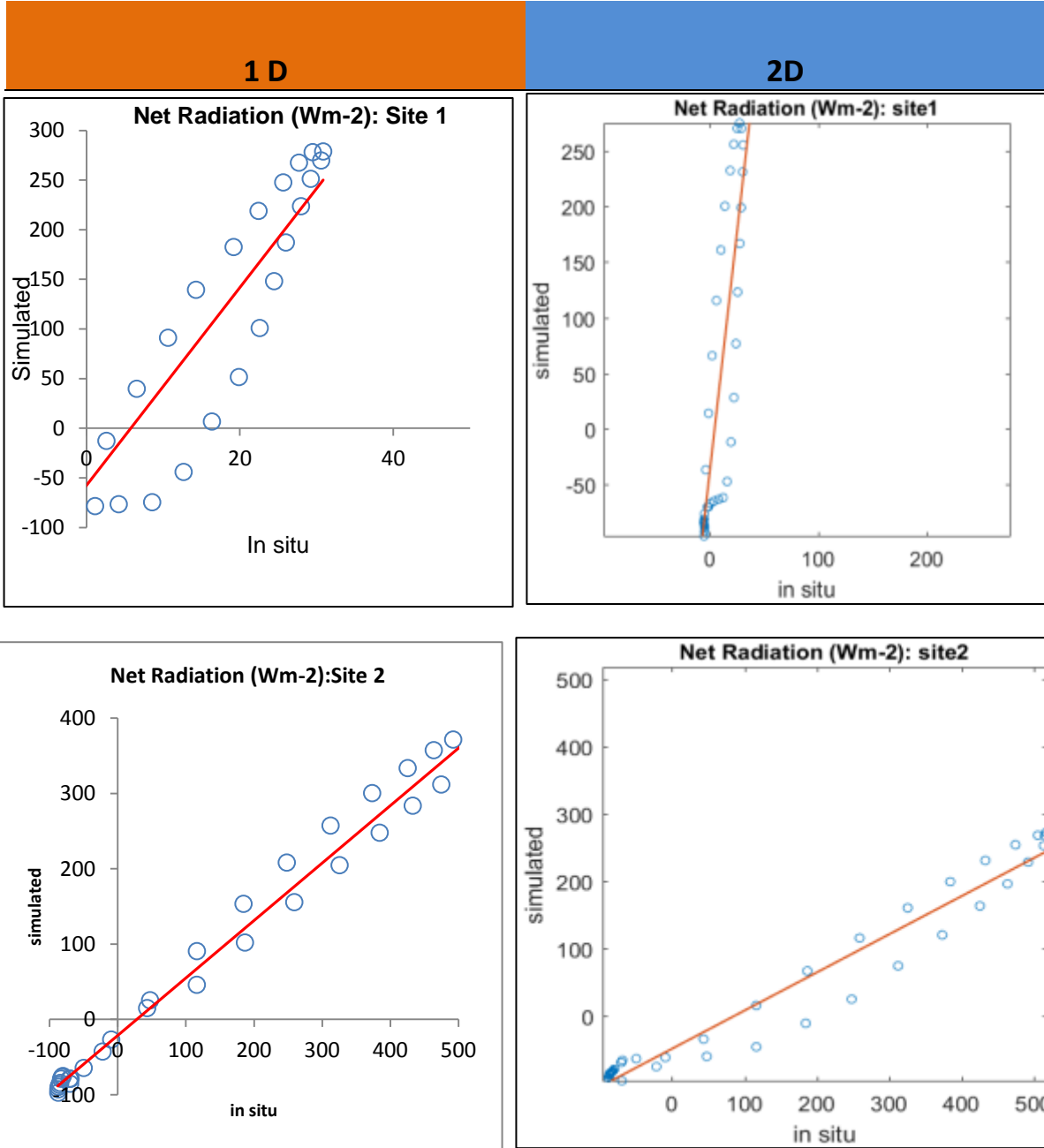
Εικόνα 4.19 Σύγκριση των in situ και των προσομοιωμένων από τα μοντέλα SimSphere 1D και Sim2DSphere τιμών για την λανθάνουσα ροή θερμότητας. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos

Καθαρή ακτινοβολία (Net radiation-Rn)

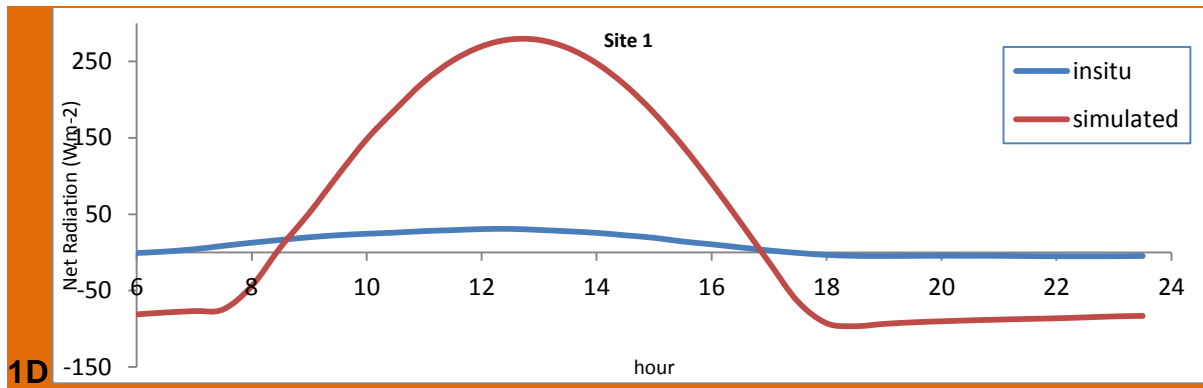
Με βάση τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον **πίνακα 4.15** προκύπτουν ότι για το σταθμό του Lelystad τα αποτελέσματα των μοντέλων 1D και 2D είναι πολύ κοντά. Τα RMSE και MAE έχουν ελάχιστη απόκλιση μεταξύ τους. Τα μοντέλα 1D και 2D παρουσιάζουν όμοια διασπορά των τιμών γύρω από το μέσο, πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση (**εικόνα 4.20**) και λεπτόκυρτη κατανομή. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το εύρος σφάλματος των παρατηρήσεων που είναι σχεδόν ίδιο για τα δύο μοντέλα (1D ErrMin=-91.88, ErrMax=248.61, 2D ErrMin=-91.81, ErrMax=247.49).

Όσον αφορά το σταθμό του Loobos τα αποτελέσματα των μοντέλων 1D και 2D φέρουν αρκετές διαφοροποιήσεις. Τα RMSE και MAE έχουν σχεδόν διπλάσια διαφορά. Η τυπική απόκλιση γύρω από το μέσο είναι αρκετά μεγαλύτερη στο μοντέλο 2D. Και τα δύο μοντέλα υποδεικνύουν πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση (**εικόνα 4.20**) και λεπτόκυρτες κατανομές.

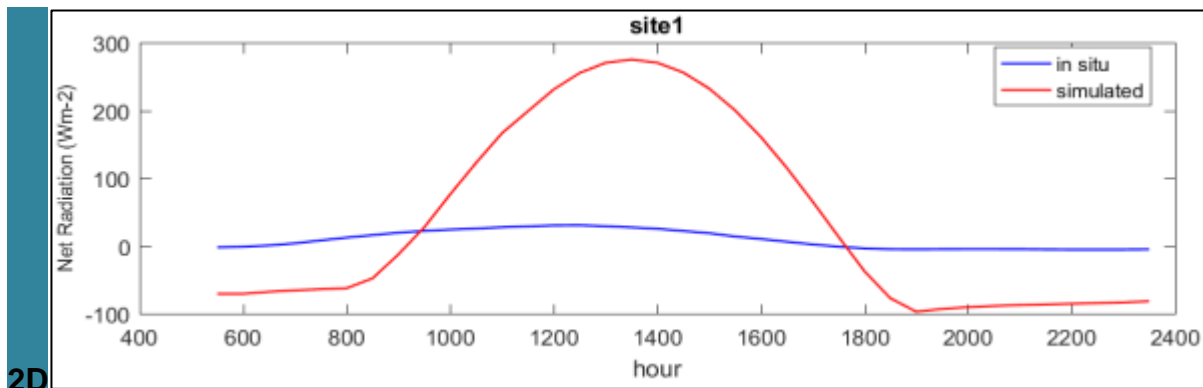
Όσον αφορά τα διαγράμματα της **εικόνας 4.21** τα μοντέλα Sim2DSphere και SimSphere 1D ακολούθησαν το ίδιο μοτίβο προσομοίωσης και για τους δύο σταθμούς.



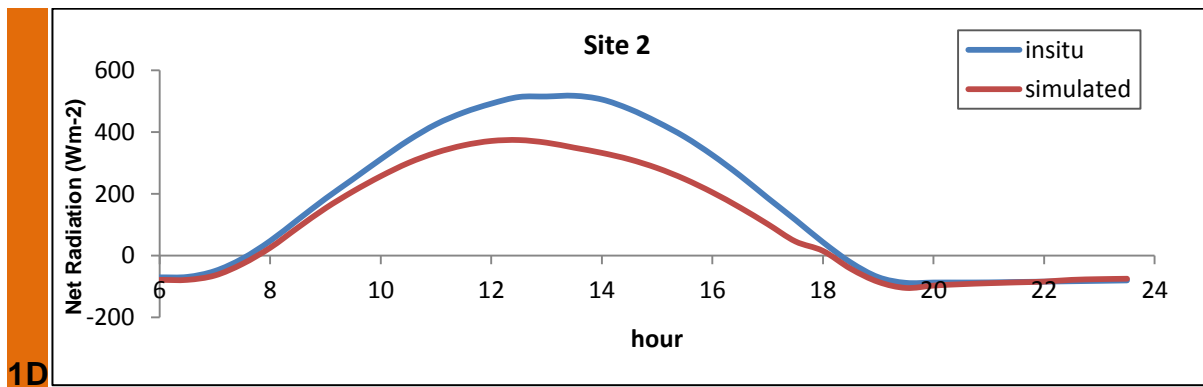
Εικόνα 4.20 Σύγκριση των διαγραμμάτων διασποράς των μοντέλων SimSphere 1D και Sim2DSphere για την καθαρή ακτινοβολία. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos



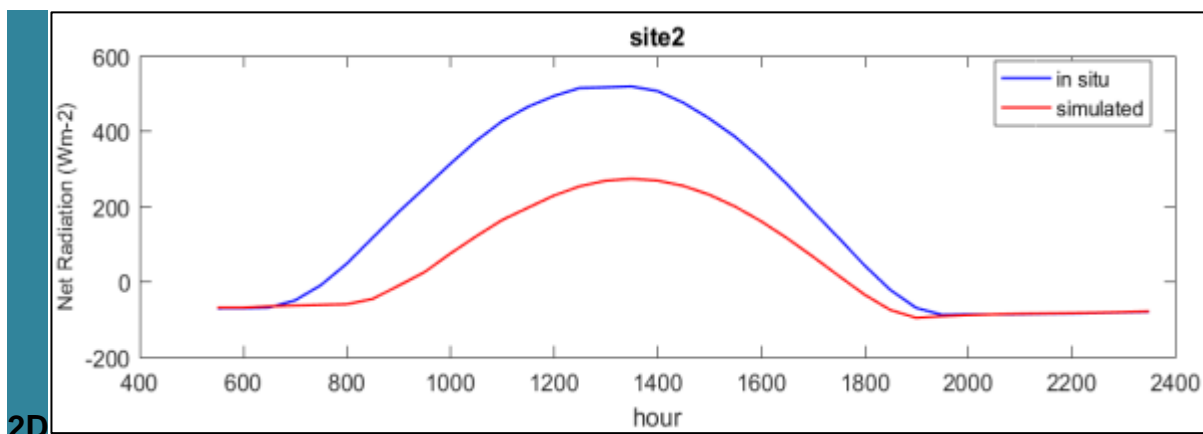
1D



2D



1D



2D

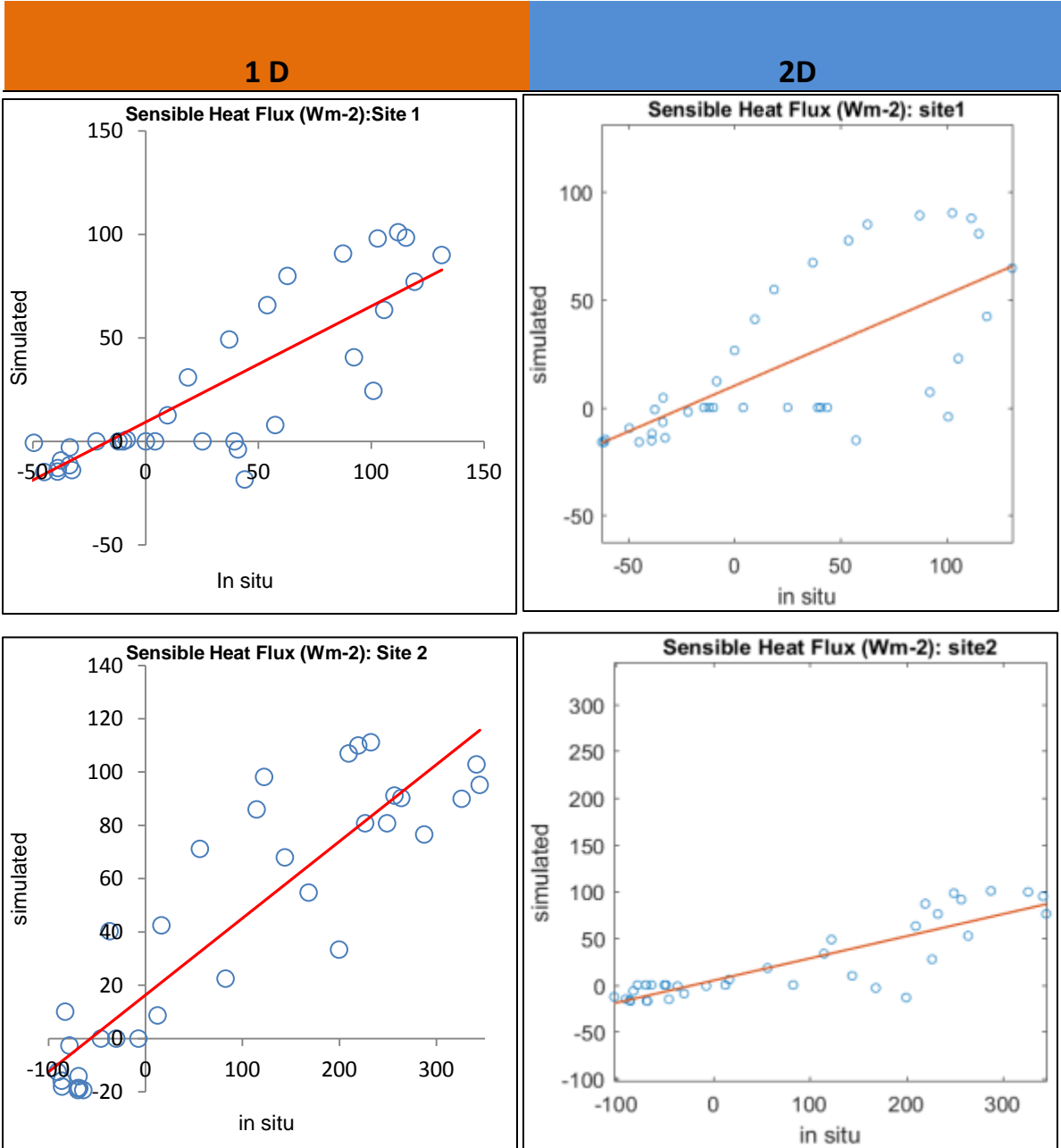
Εικόνα 4.21 Σύγκριση των in situ και των προσομοιωμένων από τα μοντέλα SimSphere 1D και Sim2DSphere τιμών για την καθαρή ακτινοβολία. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos

Αισθητή ροή θερμότητας (Sensible Heat Flux-H)

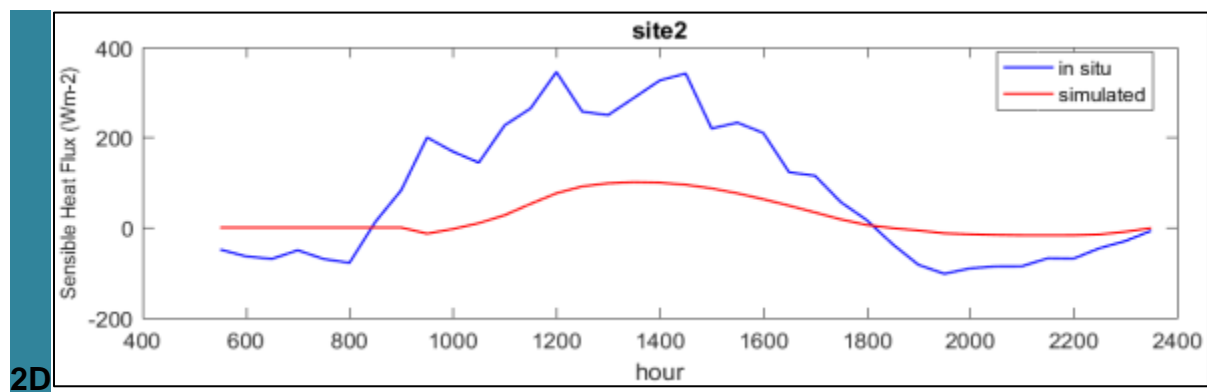
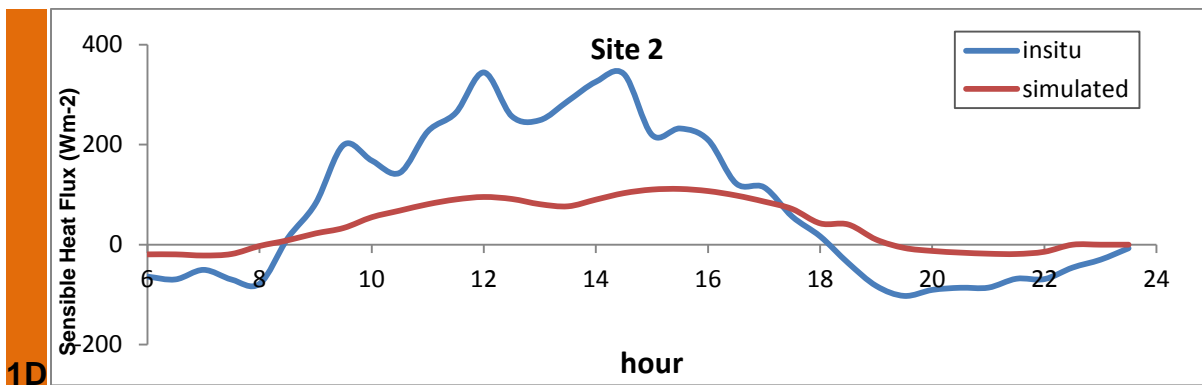
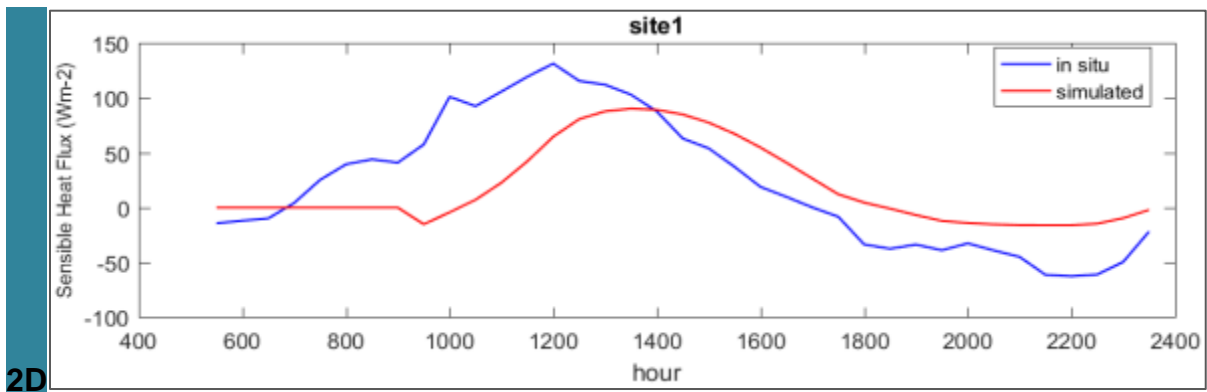
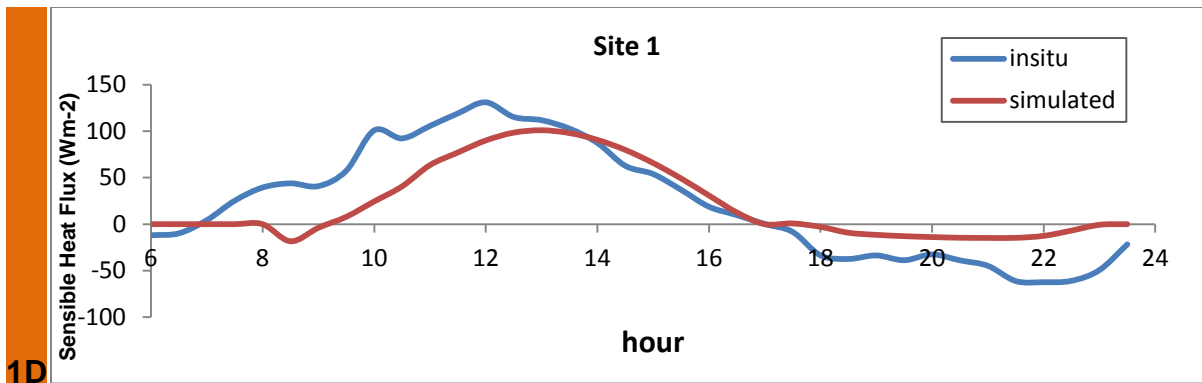
Με βάση τον **πίνακα 4.15** αλλά και από τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις **εικόνες 4.22 και 4.23** για το σταθμό του Loobos τα αποτελέσματα από τα δύο μοντέλα είναι πολύ κοντά. Τα RMSE και MAE που εξήχθησαν από το μοντέλο Sim2DSphere πλησιάζουν αυτά του μοντέλου 1D. Επίσης η διασπορά των μεταβλητών γύρω από το μέσο, η οποία εκφράζεται με το δείκτη της τυπικής απόκλισης (St.Dev) έχει μικρή διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα. Τόσο το μοντέλο 2D όσο και το 1D υποδεικνύουν πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση (**εικόνα 4.22**) και λεπτόκυρτες κατανομές στις παρατηρήσεις.

Για το σταθμό του Lelystad τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο μοντέλων φέρουν κάποιες διαφορές αλλά όχι με μεγάλες αποκλίσεις. Οι τιμές για τα RMSE και MAE είναι λίγο υψηλότερες στο μοντέλο 2D. Οι παρατηρήσεις του μοντέλου 2D έχουν μέση γραμμική συσχέτιση ενώ του μοντέλου 1D πολύ ισχυρή. Αυτό είναι εμφανές και στην **εικόνα 4.22** όπου τα σημεία για το σταθμό του Lelystad από το μοντέλο 2D κατανέμονται πιο μακριά από τη γραμμή εφαρμογής, συγκριτικά με αυτά του μοντέλου 1D. Και τα δύο μοντέλα υποδεικνύουν λεπτόκυρτη κατανομή στις παρατηρήσεις τους.

Όσον αφορά τα διαγράμματα της **εικόνα 4.23** τα μοντέλα Sim2DSphere και SimSphere 1D ακολούθησαν το ίδιο μοτίβο προσομοίωσης και για τους δύο σταθμούς.



Εικόνα 4.22 Σύγκριση των διαγραμμάτων διασποράς των μοντέλων SimSphere 1D και Sim2DSphere για την αισθητή ροή θερμότητας, Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos



Εικόνα 4.23 Σύγκριση των in situ και των προσομοιωμένων από τα μοντέλα SimSphere 1D και Sim2DSphere τιμών για την αισθητή ροή θερμότητας. Site 1: Lelystad, Site 2: Loobos

5. Συζήτηση - Μελλοντική έρευνα

A)Σχετικά με τον πρώτο στόχο της παρούσας διπλωματικής, τη σύγκριση δηλαδή των αποτελεσμάτων του μοντέλου Sim2DSphere με τα situ δεδομένα.

Η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής (MAE) εκφράζουν το μέσο σφάλμα πρόβλεψης του μοντέλου και υποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των μετρήσεων. Βάσει των αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, προκύπτει ότι είχαμε καλύτερα αποτελέσματα και για τους δύο σταθμούς για την παράμετρο της θερμοκρασίας του αέρα (Tair). Επίσης, για την παράμετρο της λανθάνουσας θερμοκρασίας (LE) ο σταθμός του Loobos πραγματοποίησε καλές προβλέψεις, με τα RMSE και MAE να έχουν σχετικά χαμηλές τιμές. Μεγαλύτερη απόκλιση από τις πραγματικές τιμές εμφανίζει ο σταθμός του Loobos για την παράμετρο της καθαρής ακτινοβολίας (Rn).

Η διασπορά των μεταβλητών γύρω από το μέσο, η οποία εκφράζεται με το δείκτη της τυπικής απόκλισης (St.Dev) ήταν μικρότερη για το σταθμό του Loobos και για την παράμετρο της θερμοκρασίας του αέρα (Tair). Ακολουθεί ο σταθμός του Lelystad για την ίδια παράμετρο. Μεγαλύτερη διασπορά γύρω από το μέσο εμφάνισε ο σταθμός του Lelystad για την παράμετρο της καθαρής ακτινοβολίας(Rn).

Την ισχυρότερη θετική γραμμική συσχέτιση μεταξύ των πραγματικών και προσομοιωμένων τιμών, έχουμε για το σταθμό του Loobos για την παράμετρο της καθαρής ακτινοβολίας(Rn). Ο σταθμός του Lelystad εμφάνισε τις χαμηλότερες τιμές στη γραμμική συσχέτιση για τις παραμέτρους της λανθάνουσας ροής θερμότητας (LE) και αισθητής ροής θερμότητας (H). Ο συντελεστής κύρτωσης (kurtosis) προσδιορίζει κατά πόσο μία κατανομή περιέχει ακραίες τιμές σε σχέση με την κανονική κατανομή. Λεπτόκυρτες κατανομές υποδεικνύουν δεδομένα που δεν περιέχουν ακραίες τιμές, ενώ πλατύκυρτες δεδομένα που περιέχουν ακραίες τιμές. Λεπτόκυρτη κατανομή με τα μικρότερα ποσοστά kurtosis εμφανίζει η παράμετρος της καθαρής ακτινοβολίας (Rn) για το σταθμό του Loobos. Ακολουθεί ο σταθμός του Lelystad για την ίδια παράμετρο. Τον υψηλότερο συντελεστή κύρτωσης κι επομένως δεδομένα που περιέχουν ακραίες

τιμές εμφανίζει ο σταθμός του Loobos για τη παράμετρο της θερμοκρασίας του αέρα (Tair).

Δεδομένου ότι οι τοπογραφικοί παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο τα αποτελέσματα του μοντέλου (Petrooulos et al. 2014) είναι ίδιοι και για τους δύο σταθμούς, οι λόγοι που ενδεχομένως επηρέασαν τις εκτιμήσεις του μοντέλου Sim2DSphere και οδήγησαν σε υποεκτίμηση ή υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων φαίνεται να είναι το ποσοστό φυτοκάλυψης (Fr), η εδαφική υγρασία (Mo), ο δείκτης φυλλικής επιφάνειας (LAI) και το ύψος της βλάστησης. Σύμφωνα με την μελέτη των Villegas et al. (2010) ειδικά το ποσοστό φυτοκάλυψης και το ύψος βλάστησης παίζουν καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό της λανθάνουσας (LE) και αισθητής ροής θερμότητας (H). Λόγω της σκίασης από το φύλλωμα των φυτών τα εδάφη δεν εκτίθενται απευθείας στην ηλιακή ακτινοβολία μειώνοντας με αυτό τον τρόπο την εξάτμιση. Επίσης τα δέντρα ανακόπτουν την ταχύτητα του ανέμου και αυξάνουν τη διαπνοή.

Για τη λανθάνουσα ροή θερμότητας (LE), η οποία επηρεάζεται από το ποσοστό φυτοκάλυψης και την εδαφική υγρασία, το μοντέλο Sim2DSphere πραγματοποίησε καλύτερες προσομοιώσεις για τον σταθμό του Loobos που αφορά ένα δάσος κωνοφόρων. Η παράμετρος της καθαρής ακτινοβολίας (Rn), η οποία επηρεάζεται από το ποσοστό φυτοκάλυψης και το δείκτη φυλλικής επιφάνειας, εκτιμήθηκε επίσης καλύτερα για τη δασική έκταση του Loobos. Όσον αφορά την αισθητή ροή θερμότητας (H), που επηρεάζεται από το ποσοστό φυτοκάλυψης και το ύψος βλάστησης το μοντέλο προσέγγισε καλύτερα την καμπύλη των πραγματικών τιμών για τον σταθμό του Lelystad που αποτελεί μια χορτολιβαδική έκταση με χαμηλότερο ύψος βλάστησης. Τέλος για την παράμετρο της θερμοκρασίας του αέρα (Tair) το μοντέλο Sim2DSphere έκανε πανομοιότυπη προσομοίωση και για τους δύο σταθμούς ακολουθώντας το μοτίβο της καμπύλης των in situ τιμών, με εξαίρεση το χρονικό διάστημα 6.00-9.00 που το μοντέλο εκτίμησε χαμηλότερα την Tair και στους δύο σταθμούς.

Η επαλήθευση των αποτελεσμάτων του μοντέλου μέσω του δικτύου FLUXNET επιβεβαιώνει την αξιοπιστία και την ακρίβεια στις προβλέψεις του μοντέλου. Μολαταύτα λόγω του μικρού μεγέθους δείγματος (δύο επίγειοι σταθμοί) και του περιορισμένου χρονικού εύρους παρατηρήσεων (30 Μαρτίου 2004) δεν καθίσταται δυνατή η εξαγωγή

πλήρως αντιπροσωπευτικών συμπερασμάτων για το μοντέλο Sim2DSphere, παρά μόνο κάποιων τεκμηριωμένων εκτιμήσεων που θα τροφοδοτήσουν ερωτήματα για μελλοντικές έρευνες.

B) Ο δεύτερος στόχος αφορά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων Sim2DSphere και SimSphere 1D .

Συγκριτικά με το μοντέλο SimSphere 1D και συγκεκριμένα για την παράμετρο της θερμοκρασίας του αέρα (T_{air}), τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων ήταν πολύ κοντά τόσο για το σταθμό του Lelystad όσο και του Loobos, με την τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και το απόλυτο σφάλμα μέσης τιμής (MAE) να εμφανίζεται χαμηλότερο στο εξελιγμένο μοντέλο Sim2DSphere. Όσον αφορά τις υπόλοιπες παραμέτρους, το Sim2DSphere προσέγγισε πολύ καλά για το σταθμό του Loobos τη λανθάνουσα ροή θερμότητας (LE) και την αισθητή ροή θερμότητας (H). Για το σταθμό του Lelystad υπήρχαν κάποιες διαφοροποιήσεις συγκριτικά με τα αποτελέσματα του SimSphere 1D για τις παραμέτρους της λανθάνουσας και της αισθητής ροής θερμότητας. Τα αποτελέσματα για την παράμετρο της καθαρής ακτινοβολίας (R_n) ήταν επίσης πολύ κοντά για τα δύο μοντέλα.

Το μοτίβο προσομοίωσης των εκτιμήσεων για τα Sim2DSphere και SimSphere 1D ήταν πανομοιότυπο και για τους δύο σταθμούς σε όλες τις παραμέτρους.

Τέλος με βάση τις καινούργιες τροποποιήσεις το εξελιγμένο μοντέλο συγκριτικά με το SimSphere 1D προσφέρει ευκολία στην εφαρμογή του με την απευθείας εισαγωγή των δορυφορικών δεδομένων, ταχύτητα με την παράλληλη εκτέλεση των υπολογισμών των παραμέτρων και τη δυνατότητα να χειρίζεται μεγάλο όγκο δεδομένων λόγω του cloud environment και της Java 8.

Κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας

A) Δεδομένου ότι οι σημαντικότεροι παράγοντες επιρροής των εκτιμήσεων του μοντέλου, δηλαδή η κλίση και ο προσανατολισμός, ήταν ίδιοι στην συγκεκριμένη διπλωματική, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να κατευθυνθεί στην εξακρίβωση της ακρίβειας του μοντέλου για περισσότερες ημέρες και σε περιοχές του δικτύου FLUXNET που παρουσιάζουν ποικιλομορφία τόσο ως προς τους τύπους χρήσης/κάλυψης γης, όσο και στις ως προς τις τοπογραφικές συνθήκες.

B) Στην παρούσα διπλωματική έγινε ανάλυση 4 από τις 32 συνολικά μεταβλητές του ενεργειακού ισοζυγίου που υπολογίζονται από το Sim2DSphere. Μια ακόμα κατεύθυνση της μελλοντικής έρευνας θα μπορούσε να είναι ως προς τις υπόλοιπες μεταβλητές που εκτιμώνται από το μοντέλο.

Γ) Τέλος, η πρόταση για κατεύθυνση της μελλοντικής έρευνας αφορά την καθιέρωση του Sim2DSphere ως ένα αυτόνομο εργαλείο έρευνας και διδασκαλίας προσιτό στο ευρύ κοινό. Με περαιτέρω έρευνα μπορεί να αυτοματοποιηθούν ακόμα περισσότερο κάποιες λειτουργίες, ώστε η χρήση του μοντέλου να είναι προσιτή ακόμα και για άτομα που κατέχουν βασικές γνώσεις υπολογιστών και Τηλεπισκόπησης.

Πηγές:

Ξένη βιβλιογραφία

1. Alfaro, R., Fady, B., Vendramin, G., Dawson, I., Fleming, R., Romero, C.R., Lindig-Cisneros, R., Murdock, T., Vinceti, B., Navarro, C.M., Skråppa, T., Baldinelli, G., El-Kassaby, Y. και Loo, J., 2014. "The role of forest genetic resources in responding to biotic and abiotic factors in the context of anthropogenic climate change", Διαθέσιμο στο <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.04.006> (Ημερομηνία πρόσβασης 6 Μαΐου 2014)
2. Alkama, R., και Cescatti, A., 2016. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover. *Science* Τόμος 351, Σελίδες 600–604. doi:<http://dx.doi.org/10.1126/science.aac8083>.
3. Anagnostopoulos, V., Petropoulos, G., Ireland, G. και Carlson, T., 2017. 'A modernized version of a 1D soil vegetation atmosphere transfer model for improving its future use in land surface interactions studies', *Environmental Modelling & Software*, Τόμος 90 (C). <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.004>
4. Appiah Mensah, A., Akoto Sarfo, D και Tetteh Partey, S., 2018. "Assessment of vegetation dynamics using remote sensing and GIS: A case of Bosomtwe Range Forest Reserve, Ghana", Διαθέσιμο στο <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>, (Ημερομηνία πρόσβασης 18 Δεκεμβρίου 2018)
5. Artés, T., Oom, D., Rigo, D., Durrant, T., Maianti, P., Libert, G. και Ayanz, J., 2019. 'A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behavior', *Scientific Data*. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.10284101>
6. Arthur, T., Hartanft, S., Carlson, T.N. και Clarke, K.C., 2003. 'Satellite and ground-based microclimate and hydrologic analyses coupled with a regional urban growth model', *Remote Sensing of Environment*, Τόμος 86, Σελίδες 385-400. doi:[10.1016/S0034-4257\(03\)00080-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00080-4)
7. Bounoua, L., Zhang, P., Mostovoy, G., Thome, K., Masek, J., Imhoff, M., Shepherd, Marshall, Quattrochi, D., Santanello, J., Silva, J., Wolfe, R. και Toure, A.M., 2015. Impact of urbanization on US surface climate, *Environ. Res. Lett.*, Τόμος 10, 84010. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084010>.
8. Bruckler, L. και Witono, H, 1989. 'Use of remotely sensed soil moisture content as boundary conditions in soil atmosphere water transport modeling. -Estimating soil water balance'. *Water Resour. Res.*, Τόμος 25, Σελίδες 2437-2447.
9. Buytaert, W., Céleri, R., Bièvre, B., Cisneros, F., Wyseure, G., Deckers, J. και Hofstede, R., 2006. Human impact on the hydrology of the Andean páramos, *Earth-Science Reviews*, Τόμος 79(1-2), Σελίδες 53-72. DOI: [10.1016/j.earscirev.2006.06.002](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.002)
10. Caldararo, N., 2002. 'Human ecological intervention and the role of forest fires in human ecology', *Science of The Total Environment*, Τόμος 292, Σελίδες 141–165. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)01067-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01067-1)
11. Carlson T.N. και Boland F.E., 1978. 'Analysis of urban-rural canopy using a surface heat flux/temperature model', *J. Appl. Meteorology*, Τόμος 17 (7), Σελίδες 998-1013. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1978\)017<0998:AOURCU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1978)017<0998:AOURCU>2.0.CO;2)
12. Carlson, T., 2007. 'An overview of the "triangle method" for estimating surface evapotranspiration and soil moisture from satellite imagery', *Sensors*, Τόμος 7, Σελίδες 1612-1629
13. Carlson, T.N. και Arthur, S.T., 2000. 'The impact of land use- land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective', *Global and Planetary Change*, Τόμος 25, Σελίδες 49-65. 68. DOI: [10.1016/S0921-8181\(00\)00021-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(00)00021-7)
14. Carlson, T.N.; Gillies, R.R.; Schmugge, T.J. 1995. 'An Interpretation of Methodologies for Indirect Measurement of Soil-Water Content'. *Agricultural and Forest Meteorology*, Τόμος 77, Σελίδες 191-205.
15. Carlson, T.N. και Bunce, J.A., 1996. 'Will a doubling of atmospheric carbon dioxide concentration lead to an increase or a decrease in water consumption by crops?' *Ecological Modelling*, Τόμος 88, Σελίδες 241-246. [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(95\)00110-7](https://doi.org/10.1016/0304-3800(95)00110-7)
16. Cescatti, A., 2007. 'Indirect estimates of canopy gap fraction based on the linear conversion of hemispherical photographs: Methodology and comparison with standard thresholding

- techniques', *Agricultural and Forest Meteorology*, Τόμος 143(1-2), Σελίδες 1-12. DOI: [10.1016/j.agrformet.2006.04.009](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.04.009)
17. Chauhan, N.S., Miller, S. και Ardanuy, P., 2003. 'Spaceborne soil moisture estimation at high resolution: a microwave-optical/IR synergistic approach', *International Journal of Remote Sensing*, Τόμος 22, Σελίδες 4599-4646. <https://doi.org/10.1080/0143116031000156837>
 18. Chen, X., Vogelmann, J. E., Rollins, M., Ohlen, D., Key, C. H., Yang, L., Huang, C. και Shi, H., 2011. 'Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing, spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest', *International Journal of Remote Sensing* 2011, Κεφάλαιο 32 (23), Σελίδες 7905-7927.
 19. Chuvieco, E., Mouillot, F., Werf, G., Miguel, J., Tanase, M., Koutsias, N., Garcia, M., Yebra, M., Padilla, M., Gitas, I., Heil, A., Hawbaker, T. και Giglio, L., 2019. 'Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation'. *Remote Sensing of Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>
 20. Ciais, P., Sabine, C., Govindasamy, B., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R., Piao, S. και Thornton, P., 2013. 'Carbon and Other Biogeochemical Cycles', IPCC. Διαθέσιμο στο https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf
 21. Da Ponte, E., Mack, B., Wohlfart, C., Rodas, O., Fleckenstein, M., Oppelt, N., Dech, S. και Kuenzer, C., 2017. Assessing Forest Cover Dynamics and Forest Perception in the Atlantic Forest of Paraguay, Combining Remote Sensing and Household Level Data, *Forests*, Τόμος 8(10), Σελίδες 389. doi:10.3390/f8100389
 22. Dimitrakopoulos, A., Vlahou, M., Anagnostopoulou, C. και Mitsopoulos, I., 2011. 'Impact of drought on wildland fires in Greece: Implications of climatic change?'. *Climatic Change*, Τόμος 109, Σελίδες 331–347. <https://doi:10.1007/s10584-011-0026-8>.
 23. Ellison, D., Morris C., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M., Creed, I., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D., Tobella, A., Ilstedt, U., Teuling, A., Gebreyohannis, Gebrehiwot S., Sands, D., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y. και Sullivan, C., 2017. 'Trees, forests and water: Cool insights for a hot world', Διαθέσιμο στο <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002> (Ημερομηνία πρόσβασης 9 Φεβρουαρίου 2017)
 24. European Commission, 2017. 'Αίτια της κλιματικής αλλαγής' [online] Διαθέσιμος στο : https://ec.europa.eu/clima/change/causes_el [Ημερομηνία πρόσβασης 1 Δεκεμβρίου 2017].
 25. FAO, 2016. 'Global Forest Resources Assessment 2015: How Are the World's Forests Changing?' FAO, Rome.
 26. Farina, A., 2008. 'Principles and methods in landscape ecology: towards a science of the landscape', Springer Science & Business Media. DOI: [10.1007/978-1-4020-5535-5](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5535-5)
 27. Forest Europe, 2015: State of Europe's Forests 2015.
 28. Friedlingstein, P., Jones, M., O'Sullivan, M., Andrew, R., Hauck, J., Peters, G., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., Bakker, D., Canadell, J., Ciais, P., Jackson, R., Anthoni, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., Bopp, L., Buitenhuis, E., Chandra, N., Chevallier, F., Chini, Currie K., Feely, R., Gehlen, M., Gilfillan, D., Gkritzalis, T., Goll, D., Gruber, N., Gutekunst, S., Harris, I., Haverd, V., Houghton, R., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A., Joetzjer, E., Kaplan, J., Kato, E., Goldewijk, K., Korsbakken, J., Landschützer, P., Lauvset, S., Lefèvre, Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Marland, G., McGuire, P., Melton, J., Metz, N., Munro, D., Nabel, J., Nakaoka, S., Neill, C., Omar, A., Ono, T., Peregón, A., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Resplandy, L., Robertson, E., Rödenbeck, C., Séférian, R., Schwinger, J., Smith, N., Tans, P., Tian, H., Tilbrook, B., Tubiello, F., Van der Werf, G., Wiltshire, A. και Zaehle, S., 2019. Global Carbon Budget 2019, *Earth System Science Data*, Τόμος 11, Σελίδες 1783–1838, 2019 <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>.
 29. Gillies, R.R., 1993. 'A Physically-based Land Use Classification Scheme Using Remote Solar and Thermal Infrared Measurements Suitable for Describing Urbanisation', PhD thesis. University of Newcastle, UK.
 30. Gillies, R.R., Kustas, W.P., Humes, K.S., 1997. A verification of the 'triangle' method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized

- Difference Vegetation Index (NDVI) and surface, *Int.J. remote Sens.*, Τόμος 18 (15), Σελίδες 3145-3166.
31. Gouveia, C., DaCamara, C. και Trigo, R., 2010. 'Post-fire vegetation recovery in Portugal based on spot/vegetation data', *Natural Hazards and Earth System Science* , Τόμος 10 (4), Σελίδες 673-684.
 32. Grace, J., and Malhi, Y., 2002. 'Global change: Carbon dioxide goes with the flow', *Nature*, Τόμος 416, Σελίδες 594-595.
 33. Granz, D., Zhang, X. και Carlson, T.N., 1999. 'Observations and model simulations link stomatal inhabitation to impaired hydraulic conductance following ozone exposure in cotton', *Plant Cell Environment*, Τόμος 22, Σελίδες 1201-1210. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00486.x>
 - Gulinck, H., Múgica, M., Vicente de Lucio, J. και Atauri, J., 2001. 'A framework for comparative landscape analysis and evaluation based on land cover data, with an application in the Madrid region (Spain)', *Landscape and urban planning* , Τόμος 55 (4), Σελίδες 257-270. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00159-1](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00159-1)
 34. Hesslerová, P., Pokorný, J., Brom, J. και Rejšková–Procházková, A., 2013. Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: consequences for the local climate. *Ecol. Eng.* Τόμος 54, Σελίδες 145–154. [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.036](http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.036).
 35. Ireland, G., Petropoulos, G.P., Carlson, T.N. και Purdy, S., 2015. Addressing the ability of a land biosphere model to predict key biophysical vegetation characterization parameters with Global Sensitivity. *Analysis Environ. Model. Softw*, Τόμος 65, Σελίδες 94-107. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.010>
 36. Jenkins C. και Joppa L., 2009. 'Expansion of the global terrestrial protected area system', *Biological Conservation*. [doi:10.1016/j.biocon.2009.04.016](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.04.016)
 37. Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S.I., Sheffield, J., Goulden, M.L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., και De Jeu, R., 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, Τόμος 467, Σελίδες 951–954.
 38. Keenan, R., Reams, G, Achard, F., Freitas, J., Grainger, A. και Lindquist, E., 2015. "Dynamics of global forest area: Results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015" , Διαθέσιμο στο <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>. (Ημερομηνία πρόσβασης 7 Σεπτεμβρίου 2015)
 39. Lee, S., 2011. Atmospheric science: Aerosols, clouds and climate, *Nature Geoscience*., Τόμος 4, Σελίδες 826–827. <https://doi.org/10.1038/ngeo1340>.
 1. Kowalski, A. S., Sartore, M., Burrett, R., Berbigier, P. και Loustau, D., 2003, 'The annual carbon budget of a French pine forest (*Pinus pinaster*) following harvest', *Global Change Biology*, Τόμος 9 (7), Σελίδες 1051 – 1065. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00627.x>
 2. Lee, X., Goulden, M.L., Hollinger, D.Y., Barr, A., Black, T.A., Bohrer, G., Bracho, R., Drake, B., Goldstein, A., Gu, L., Katul, G., Kolb, T., Law, B.E., Margolis, H., Meyers, T., Monson, R., Munger, W., Oren, R., Paw, U.K.T., Richardson, A.D., Schmid, H.P., Staebler, R., Wofsy, S. και Zhao, L., 2011. Observed increase in local cooling effect of deforestation at higher latitudes. *Nature* Τόμος 479, Σελίδες 384–387. [doi:http://dx.doi.org/10.1038/nature10588](http://dx.doi.org/10.1038/nature10588).
 3. Li, Y., Zhao, M., Motesharrei, S., Mu, Q., Kalnay, E. και Li, S., 2015. Local cooling and warming effects of forests based on satellite observations. *Nat. Commun.* Τόμος 6, 6603. [doi:http://dx.doi.org/10.1038/ncomms7603](http://dx.doi.org/10.1038/ncomms7603).
 4. Lin, J.X., Sampson, D.A και Ceulemans, R., 2001. 'The effect of crown position and tree age on resin-canal density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles', *Canadian Journal of Botany*, Τόμος 79, Σελίδες 1257-1261. DOI: [10.1139/cjb-79-11-1257](https://doi.org/10.1139/cjb-79-11-1257)
 5. Liu, L., Shawki, D., Voulgarakis, A., Kasoar, M., Samset, B. H., Myhre, G., Forster, P. M., Hodnebrog, Ø., Sillmann, J., Aalbergstjø, S. G., Boucher, O., Faluvegi, G., Iversen, T., Kirkevåg, A., Lamarque, J.-F., Olivie, D., Richardson, T., Shindell, D. και Takemura, T., 2018 . A PDRMIP Multimodel Study on the Impacts of Regional Aerosol Forcings on Global and Regional Precipitation Climate, Τόμος 31 (11), Σελίδες 4429–4447. Διαθέσιμο στο <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0439.1>

6. Maes, W.H., Pashuysen, T., Trabucco, A., Veroustraete, F. και Muys, B., 2011. Does energy dissipation increase with ecosystem succession? Testing the ecosystem exergy theory combining theoretical simulations and thermal remote sensing observations. *Ecol. Model.*, Τόμος 222, Σελίδες 3917–3941. [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.08.028](http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.08.028).
7. Malhi, Y., Aragão, L., Galbraith, D., Huntingford, C., Fisher, R., Zelazowski, P., Sitch, S., McSweeney, C. και Meir, P., 2009. Exploring the likelihood and mechanism of a climate-change-induced dieback of the Amazon rainforest, *PNAS*, Τόμος 106 (49), Σελίδες 20610-20615. Διαθέσιμο στο <https://doi.org/10.1073/pnas.0804619106>
8. Michael, G., 2018. 'The rise and the fall of global forests', *Current Biology Magazine*, Τόμος 28, Έκδοση 6, Σελίδες 245 – 248, Διαθέσιμο στο <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096098221830304X> (Ημερομηνία πρόσβασης 19 Μαρτίου 2018)
9. Michael, G., 2014. 'Fears for the woods and the trees', *Current Biology Magazine* Τόμος 24, Έκδοση 1, Σελίδες 1 – 4, Διαθέσιμο στο <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960982213015832> (Ημερομηνία πρόσβασης 6 Ιανουαρίου 2014)
10. Moran, M., Peters-Lidard, C.D., Watts, J.M. και McElroy, S., 2004. 'Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models', *Canadian Journal of Remote Sensing*, Τόμος 30 (5), Σελίδες 805-824. <https://doi.org/10.5589/m04-043>
11. Moreira, F., Viedma, O., Arianoutsou, M., Curt, T., Koutsias, N., Rigolot, E., Barbati, A., Corona, P., Vaz, P. και Xanthopoulos, G., 2011. 'Landscape–wildfire interactions in southern Europe: implications for landscape management'. *Journal of environmental management*, 2011, Τόμος 92 (10), Σελίδες 2389-2402.
12. Naidoo, R., Balmford, A., Costanza R., Fisher B., Green R. E., Lehner B., Malcolm T. R., και Ricketts T. H., 2008. Global mapping of ecosystem services and conservation priorities, *PNAS*, Τόμος 105, Σελίδες 9495–9500. [doi 10.1073.pnas.0707823105](https://doi.org/10.1073.pnas.0707823105).
13. Nishida, K., Nemani, R. R., Running, S. W. και Glassy, J. M., 2002. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation, *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, Τόμος 108 (D9), 4270. [doi:10.1029/2002JD002062](https://doi.org/10.1029/2002JD002062), 2003
14. North, M., Petropoulos, G., Ireland, G. και McCalmont, J., 2015. "Appraising the capability of a land biosphere model as a tool in modeling land surface interactions: results from its validation at selected European ecosystems", *Earth System Dynamics Discussions*, Τόμος 6, Σελίδες 217–265. [doi:10.5194/esdd-6-217-2015](https://doi.org/10.5194/esdd-6-217-2015)
15. Olioso, A., Carlson, T.N., Brisson N., 1996. 'Simulation of diurnal transpiration and photosynthesis of a water stressed soybean crop', *Agric. Forest Meteorol.*, Τόμος 81, Σελίδες 41-59.
16. Olioso, A., Chauki, H., Courault, D. και Wigneron, J.-P., 1999. 'Estimation of evapotranspiration and photosynthesis by assimilation of remote sensing data into SVAT models'. *Remote Sensing of Environment*, Τόμος 68, Σελίδες 341-356. [DOI:10.1016/S0034-4257\(98\)00121-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00121-7)
17. Olson D., Dinerstein E., Wikramanayake E., Burgess N., Powell G., Underwood E., D'amico J., Itoua I., Strand H., Morrison J., Loucks C., Allnut T., Ricketts T., Kura Y., Lamoreux J., Wettengel W., Hedao P. και Kassem K., 2001. 'Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth', *BioScience*, Τόμος 51 ' [DOI: 10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0933:TEOTWA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0933:TEOTWA]2.0.CO;2)
18. Otle, C. και Vidal-Madjar, D., 1994. 'Assimilation of soil moisture inferred from infrared remote sensing in a hydrological model over the HAPEX-MOBILHY region', *Journal of Hydrology*, Τόμος 158, Σελίδες 241-264. <https://doi.org/10.1155/2017/1086456>
19. Pausas, J. και Fernández-Muñoz, S., 2012. 'Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime'. *Climatic Change*, Τόμος 110, Σελίδες 215–226. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0060-6>.
20. Petropoulos, G., Ireland, G., Lamine, S., Ghilain, N., Anagnostopoulos, V., North, M., Srivastava, P.K. και Georgopoulou, H., 2016. 'Evapotranspiration estimates from SEVIRI to support sustainable water management'. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Τόμος 49, Σελίδες 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.02.006>

21. Petropoulos, G.P., Griffiths, H. και Tarantola, S., 2013b. Sensitivity analysis of the SimSphere SVAT model in the context of EO-based operational products development. *Environ. Modell. Softw.*, Τόμος 49, Σελίδες 166-179.. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.07.010>
22. Petropoulos, G., Partsinevelos, P. και Hristopulos, D., 2019. ENVISioN-EO: Developing Innovative Methodologies, Land Biosphere Modelling Tools and EO Products to Increase our Capability to Model Land Surface Processes. Πρακτικά Συνεδρίου από το ESA's Living Planet Symposium, που διεξήχθη στο Μιλάνο 13-17 Μαΐου 2019. Φορέας διεξαγωγής: ESA.
23. Petropoulos, G., Carlson, T. και Wooster, M., 2009. 'An Overview of the Use of the SimSphere Soil Vegetation Atmosphere Transfer (SVAT) Model for the Study of Land- Atmosphere Interactions', *Sensors*, Τόμος 9, Σελίδες 4286-4308. [doi: 10.3390/s90604286](https://doi.org/10.3390/s90604286)
24. Petropoulos, G., Geiffiths, H., Carlson, T., Ioannou-Katidis, P. και Holt, T., 2014. "SimSphere model sensitivity analysis towards establishing its use for deriving key parameters characterising land surface interactions", *Geoscientific Model Development*, Τόμος 7, Σελίδες 1873–1887. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1873-2014>
25. Petropoulos, G., 2009. 'A global Bayesian sensitivity analysis of the 1d SimSphere soil–vegetation–atmospheric transfer (SVAT) model using Gaussian model emulation', *Ecological Modelling*, Τόμος 220(19), Σελίδες 2427-2440. [DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2009.06.006](https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.06.006)
26. Petropoulos, G., Anagnostopoulos, V. και Hristopulos, D., 2019. 'A new software tool for the analysis of land surface interactions: "Sim2DSphere"', ...
27. Pokorný, J., Brom, J., Cermák, J. και Hesslerová, P., 2010. Solar energy dissipation and temperature control by water and plants. *Int. J. Water*, Τόμος 5, Σελίδες 311–336. [doi:http://dx.doi.org/10.1504/IJW.2010.038726.](https://doi.org/10.1504/IJW.2010.038726)
28. Ridler, M.E., Sandholt, I., Butts, M., Lerer, S., Mougin, E., Timouk, F. και Madsen, H., 2012. Calibrating a soil vegetation atmosphere transfer model with remote sensing estimates of surface temperature and soil surface moisture in a semi arid environment', *Journal of Hydrology*, Τόμος 436, Σελίδες 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.047>
29. San-Miguel-Ayanz, J., Moreno, J., M. και Camia, A., 2013. 'Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: lessons learned and perspectives', *Forest Ecology and Management*, Τόμος 294, Σελίδες 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.050>
30. Scheffers, B.R., Meester, L., Bridge, T., Hoffmann, A., Pandolfi, J., Corlett, R., Butchart, S. Pearce-Kelly, P., Kovacs, K., Dudgeon, D., Pacifici, M., Rondinini, C., Foden, W., Martin, T. Mora, C., Bickford, D. και Watson, J., 2016. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people, *Science*, Τόμος 354, Τεύχος 6313. [DOI: 10.1126/science.aaf7671](https://doi.org/10.1126/science.aaf7671)
31. Schmuck, G, San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Libertà, G., Petroliagkis, T., Di Leo, M., Rodrigues, D., Boccacci, F. και Schulte, E., 2015. 'Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2014.' [https://doi:10.2788/1082.](https://doi.org/10.2788/1082)
32. Schrumpf, M., Schulze, E.D., Kaiser, K. και Schumacher, J., 2011. 'How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories', *Biogeosciences*, Τόμος 8, Σελίδες 1-20. [DOI: 10.5194/bg-8-723-2011](https://doi.org/10.5194/bg-8-723-2011)
33. Sellers, P.; Randall, D., Collatz, J., Berry, J., Field C., Dazlich, D., Zhang, C., Collelo, G. και Bounous, A., 1996. 'A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs: Model formulation', *J. Climatol*, Τόμος 9, Σελίδες 676-705.
34. Shang, C., Coops, N., Wulder, M., White, J. και Herмосilla, T., 2019. "Update and spatial extension of strategic forest inventories using time series remote sensing and modeling", Διαθέσιμο στο <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101956>, (Ημερομηνία πρόσβασης 16 Σεπτεμβρίου 2019)
35. Srivastava, P.K., Han, D., Ramirez, M.A. και Islam, T., 2013a. Appraisal of SMOS soilmoisture at a catchment scale in a temperate maritime climate. *J. Hydrol.*, Τόμος 498, Σελίδες 292–304.
36. Srivastava, P.K., Han, D., Ramirez, M.A., Islam, T., 2013b. Machine learning techniques for downscaling SMOS satellite soil moisture using MODIS landsurface temperature for hydrological application, *Water Resour. Manage*, Τόμος 27, Σελίδες 3127–3144.
37. Srivastava, P.K., Han, D., Rico Ramirez, M.A., Islam, T., 2013c. Comparative assessment of evapotranspiration derived from NCEP and ECMWF global datasets through weather research and forecasting model, *Atmos. Sci. Lett*, Τόμος 14, Σελίδες 118–125.

38. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., Vries, W., de Wit, C.A., de Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B. και Sörlin, S., 2015. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. *Science* Τόμος 347, 1259855. [doi:http://dx.doi.org/10.1126/science.1259855](http://dx.doi.org/10.1126/science.1259855).
39. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. και Midgley, P.M., 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. Διαθέσιμο στο http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Frontmatter_FINAL.pdf
40. Tölle, M. H., Gutjahr, O., Thiele, J. C. και Busch, G., 2014. Increasing bioenergy production on arable land: Does the regional and local climate respond? Germany as a case study, *J. Geophys. Res. Atmos.*, Τόμος 119, Σελίδες 2711–2724. [doi: https://doi.org/10.1002/2013JD020877](https://doi.org/10.1002/2013JD020877)
41. Valentini, R., Dore, S., Marchi, G., Mollicone, D., Panfyorov, M., Rebmann, C., Kolle, O. και Schulze, E. D., 2000. 'Carbon and water exchanges of two contrasting central Siberia landscape types: regenerating forest and bog', *Functional Ecology*, Τόμος 14, Σελίδες 87-96. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2000.00396.x>
42. Veldman, J. W., Overbeck, G. E., Negreiros, D., Mahy, G., Stradic, S., Wilson, G., Durigan, F. G., Buisson, E. Putz, F. Bond, W., 2015. Where Tree Planting and Forest Expansion are Bad for Biodiversity and Ecosystem Services, *BioScience*, Τόμος 65, Τεύχος 10, Σελίδες 1011–1018. Διαθέσιμο στο <https://doi.org/10.1093/biosci/biv118>
43. Villegas, J.C., Breshears, D.D., Zou, C.B. και Law, D.J., 2010. Ecohydrological controls of soil evaporation in deciduous drylands: how the hierarchical effects of litter, patch and vegetation mosaic cover interact with phenology and season, *Journal of Arid Environments*, Τόμος 74 (5), Σελίδες 595-602.
44. Wang, C.J., Zhang, Z.X. και Wan, J.Z., 2019. "Vulnerability of global forest ecoregions to future climate Change", Διαθέσιμο στο <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00760>, (Ημερομηνία πρόσβασης 17 Αυγούστου 2019)
45. Woodward, A., 2019. 'Climate change: Disruption, risk and opportunity', Τόμος 1, Έκδοση 6, Σελίδες 44 – 49. Διαθέσιμο στο <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589791819300027> (Ημερομηνία πρόσβασης 19 Μαρτίου 2019)

Ελληνική βιβλιογραφία

46. Ντάφης Σπύρος, 1986. Δασική Οικολογία, Εκδόσεις Γιαχούδη.
47. Σταυρακούδης, Δ., 2013. 'Μεθοδολογίες ανάπτυξης ασαφών συστημάτων ταξινόμησης με χρήση εξελικτικών αλγορίθμων: Εφαρμογή σε προβλήματα υψηλής διαστατικότητας', Διδακτορική διατριβή. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ.
48. Τοπάλογλου, Χ., 2008. 'Ποιοτική και ποσοτική σύγκριση ανελαστικών-ασαφούς λογικής αλγορίθμων ταξινόμησης για τη διάκριση βιοφυσικών στοιχείων με τη χρήση δορυφορικών εικόνων'. Διδακτορική διατριβή. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ.
49. Χαλκιάς Χ., 2006. Όροι και έννοιες επιστήμης γεωγραφικών πληροφοριών, Αθήνα, Εκδόσεις, ΙΩΝ.
50. Χριστοδουλάκης, 2012. 'Το περιβάλλον, αυτός ο κόσμος ο μικρός, ο μέγας'