



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Φαινολογία της ευρωπαϊκής οξιάς (*Fagus sylvatica*) με τη χρήση
τηλεπισκόπησης και συσχέτιση με κλιματικές παραμέτρους.**

Δούμκου Όλγα

Επιβλέπων καθηγητής: Κυπαρίσσης Άρης

Βόλος, 2023

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ
ΑΓΡΟΤΙΚΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Φαινολογία της ευρωπαϊκής οξιάς (*Fagus sylvatica*) με τη χρήση
τηλεπισκόπησης και συσχέτιση με κλιματικές παραμέτρους.

Phenology of European beech (*Fagus sylvatica*) using remote sensing and relationships
with climatic variables.

Δούμκου Όλγα

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Άρης Κυπαρίσσης (επιβλέπων) Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής
Παραγωγής και αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Αθανάσιος Σφουγγάρης (μέλος) Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής
και αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Περσεφόνη Μαλέτσικα (μέλος) Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής
Παραγωγής και αγροτικού Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κύριο Άρη Κυπαρίσση, Αναπληρωτή Καθηγητή στο Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής και Αγροτικού Περιβάλλοντος για την καθοδήγηση του και την άριστη συνεργασία μας.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του ΤΓΦΠΑΠ.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	iv
Περίληψη.....	x
Abstract	xi
1. Εισαγωγή.....	1
1.1 Οξιά	1
1.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά	1
1.1.2 Γεωγραφική κατανομή	1
1.2 Τηλεπισκόπηση	2
1.2.1 Αισθητήρες.....	3
1.3 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS).....	4
1.4 Φασματική συμπεριφορά της βλάστησης	5
1.5 Τηλεπισκόπηση στη γεωργία.....	5
1.6 Δείκτες βλάστησης	6
1.6.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index).....	7
1.7 Δορυφόροι	8
1.7.1 Αισθητήρες MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).....	9
1.8 Κλιματική αλλαγή	9
1.8.1 Κλιματική αλλαγή και φαινολογία των φυλλοβόλων	10
1.9 Σκοπός της εργασίας.....	11
2. Υλικά & Μέθοδοι.....	12
2.1 Περιοχή μελέτης	12
2.2 Δορυφορικά δεδομένα	16
2.2.1 Επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων	17
2.3 Χρονοσειρές NDVI	17
2.4 Αυτόματος υπολογισμός SOS-EOS	19
2.5 Μετεωρολογικά δεδομένα	20
2.6 Στατιστική.....	23
3. Αποτελέσματα	24
3.1 SOS-EOS-LOS	24
3.2 Φαινολογία	28
3.3 Συσχετίσεις	30
4. Συζήτηση	36

5. Συμπεράσματα	38
Βιβλιογραφία.....	39
Παράρτημα.....	45
Χρονοσειρές NDVI	45
Διαγράμματα συσχέτισης WorldClim – Power.....	46
Διαγράμματα συσχέτισης Φαινολογικές – Μετεωρολογικές παράμετροι	49
Ομβροθερμικά διαγράμματα	58

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. Τιμές δείκτη NDVI.....	7
Πίνακας 2. Περιοχές μελέτης.....	14
Πίνακας 3. Τα φασματικά κανάλια του αισθητήρα MODIS.	16
Πίνακας 4. Φαινολογικά αποτελέσματα Start of Season (SOS) για τις περιοχές μελέτης (SITE 1-15.) SOS: η μέση ημερομηνία έκπτυξης των φύλλων όπως υπολογίστηκε στην παρούσα έρευνα, MODIS: οι ημερομηνίες όπως παρέχονται από την NASA, R: ο συντελεστής συσχέτισης, P: το επίπεδο σημαντικότητας, B: η μεταβολή στο χρόνο (ημέρες ανά έτος).....	29
Πίνακας 5. Φαινολογικά αποτελέσματα End of Season (EOS), παράμετροι όπως στον Πίνακα 4.....	29
Πίνακας 6. Φαινολογικά αποτελέσματα Length of Season (LOS), παράμετροι όπως στον Πίνακα 4.	30
Πίνακας 7. Φαινολογικές συσχετίσεις για την παράμετρο Start of Season (SOS) με τις κλιματικές παραμέτρους για τις περιοχές μελέτης (SITE 1-15.) R: ο συντελεστής συσχέτισης, P: το επίπεδο σημαντικότητας, lag: ο αριθμός των μηνών πριν από τον Μάιο που δεν συμπεριλαμβάνονται στους μήνες που επηρεάζουν περισσότερο, nom: ο αριθμός των μηνών των οποίων οι κλιματικοί παράγοντες έχουν σημαντική επιρροή στο φαινολογικό γεγονός.	32
Πίνακας 8. Φαινολογικές συσχετίσεις για την παράμετρο End of Season (EOS), R: ο συντελεστής συσχέτισης, P: το επίπεδο σημαντικότητας, lag: ο αριθμός των μηνών πριν από τον Νοέμβριο που δεν συμπεριλαμβάνονται στους μήνες που επηρεάζουν περισσότερο, nom: ο αριθμός των μηνών των οποίων οι κλιματικοί παράγοντες έχουν σημαντική επιρροή στο φαινολογικό γεγονός.	33
Πίνακας 9. Φαινολογικές συσχετίσεις για την παράμετρο Length of Season (LOS), παράμετροι όπως στον Πίνακα 8.	34

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1. Φάσματα ανάκλασης ξηρού γυμνού εδάφους, πράσινης βλάστησης και καθαρού νερού (Rustamov et al. 2018).	3
Σχήμα 2. Χρονοσειρά του δείκτη NDVI στο Site 1 για το χρονικό διάστημα 2000-2022.....	18

Σχήμα 3. Χρονοσειρά του δείκτη NDVI του Site 1 για το χρονικό διάστημα 2005-2007.	19
Σχήμα 4. Διάγραμμα συσχέτισης WorldClim- Power για την βροχή στο Site 1. (R=0,868 και P<0,0001)	21
Σχήμα 5. Διάγραμμα συσχέτισης WorldClim- Power για την μέση θερμοκρασία στο Site 1. (R=0,995 και P<0,0001)	21
Σχήμα 6. Ομβροθερμικό διάγραμμα της πιο ξηρής περιοχής (Site 11), με βάση την βροχόπτωση των καλοκαιρινών μηνών (Ιούνιο-Αύγουστο)	22
Σχήμα 7. Ομβροθερμικό διάγραμμα της πιο βροχερής περιοχής (Site 14), με βάση την βροχόπτωση των καλοκαιρινών μηνών (Ιούνιο-Αύγουστο)	22
Σχήμα 8. Φαινολογικά αποτελέσματα της έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου (SOS) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites)	25
Σχήμα 9. Φαινολογικά αποτελέσματα της λήξης της αναπτυξιακής περιόδου (EOS) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites)	26
Σχήμα 10. Φαινολογικά αποτελέσματα της διάρκειας της αναπτυξιακής περιόδου (LOS) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites)	27
Σχήμα 11. Διαγράμματα συσχέτισης της έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου (SOS) με μετεωρολογικές παραμέτρους: Βροχόπτωση, Ελάχιστη, Μέγιστη και Μέση θερμοκρασία (Rain, Tmin, Tmax, Tavg) για την πρώτη ερευνητική περιοχή (Site 1).	35
Σχήμα 12. Χρονοσειρές NDVI για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites 1-15).	45
Σχήμα 13. Διαγράμματα συσχέτισης World Clim - Power για τις παραμέτρους Βροχόπτωση, Ελάχιστη, Μέγιστη και Μέση θερμοκρασία (Rain, Tmin, Tmax, Tavg) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites 1-15)	48
Σχήμα 14. Διαγράμματα συσχέτισης της έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου (SOS) με μετεωρολογικές παραμέτρους: Βροχόπτωση, Ελάχιστη, Μέγιστη και Μέση θερμοκρασία (Rain, Tmin, Tmax, Tavg) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Site 1-15).	51
Σχήμα 15. Διαγράμματα συσχέτισης της λήξης της αναπτυξιακής περιόδου (EOS) με μετεωρολογικές παραμέτρους: Βροχόπτωση, Ελάχιστη, Μέγιστη και Μέση θερμοκρασία (Rain, Tmin, Tmax, Tavg) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Site 1-15).	54
Σχήμα 16. Διαγράμματα συσχέτισης της διάρκειας της αναπτυξιακής περιόδου (LOS) με μετεωρολογικές παραμέτρους: Βροχόπτωση, Ελάχιστη, Μέγιστη και Μέση θερμοκρασία (Rain, Tmin, Tmax, Tavg) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Site 1-15).	57
Σχήμα 17. Ομβροθερμικά διαγράμματα για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites 1-15).	58

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1. <i>Fagus sylvatica</i> : Γεωγραφική κατανομή	2
Εικόνα 2. Οπτική απεικόνιση των τιμών του δείκτη NDVI στα φυτά (NDVI FAQs 2019).	8
Εικόνα 3. Γεωγραφική κατανομή του είδους <i>Fagus sylvatica</i> στην Ευρώπη (<i>Fagus Sylvatica</i> European Beech n.d.).	12

Εικόνα 4. Γεωγραφική κατανομή του είδους <i>Fagus sylvatica</i> στην Ελλάδα.	13
Εικόνα 5. Οι περιοχές μελέτης στο Πήλιο.	14
Εικόνα 6. Περιοχές μελέτης στην Ελλάδα.	15
Εικόνα 7. Περιοχές μελέτης στην Ιταλία.	15

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία έγινε παρακολούθηση των φαινολογικών παραμέτρων στην Ευρωπαϊκή οξιά (*Fagus sylvatica*) με την χρήση τηλεπισκόπησης και συσχέτιση τους με μετεωρολογικά δεδομένα. Χρησιμοποιήθηκαν οι δορυφόροι TERRA και AQUA και συλλέχθηκαν δεδομένα μέσου του αισθητήρα MODIS. Οι περιοχές μελέτης είναι 15 σημεία σε Ελλάδα και Ιταλία και το χρονικό εύρος των δεδομένων είναι από το 2000 έως το 2022. Μέσω του δείκτη βλάστησης NDVI δημιουργήθηκαν χρονοσειρές για κάθε περιοχή μελέτης και προσδιορίστηκαν οι ημερομηνίες για την έκπτυξη των φύλλων (Start Of Season, SOS), την πτώση των φύλλων (End Of Season, EOS) και την διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου (Length Of Season, LOS). Στην συνέχεια, έγινε η συσχέτιση αυτών των φαινολογικών δεδομένων με κλιματικούς παράγοντες (ελάχιστη, μέση, μέγιστη μηνιαία θερμοκρασία και συνολική μηνιαία βροχόπτωση). Βρέθηκε πως η διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου της οξιάς αυξάνεται, καθώς υπάρχει τάση για έκπτυξη των φύλλων νωρίτερα αλλά και πτώση των φύλλων αργότερα με την πάροδο των χρόνων. Οι μετεωρολογικοί παράγοντες που επηρεάζουν περισσότερο αυτή την μετατόπιση των φυσιολογικών διεργασιών του φυτού είναι οι τιμές τις θερμοκρασίας (ελάχιστης, μέσης, μέγιστης), ενώ η βροχόπτωση παρατηρήθηκε πως δεν έχει τόσο σημαντική επιρροή.

Abstract

In this study, phenological parameters of the European beech (*Fagus sylvatica*) were determined by using remote sensing and correlated with meteorological data. Data collected through the MODIS sensor on both TERRA and AQUA satellites were used. The study areas concern 15 sites in Greece and Italy and the time range of the data is from 2000 to 2022. MODIS data were used for the construction of NDVI time series for each study area and the dates for Start Of Season (SOS), End Of Season (EOS) and Length Of Season (LOS) were determined. Accordingly, these phenological data were correlated with climatic factors (minimum, average, maximum monthly temperature and total monthly precipitation). It was found that the duration of the growing period of beech trees increases, as there is a tendency for earlier SOS and later EOS over the years. The meteorological factors that have the most influence on the physiological processes of the plant are the temperature values (minimum, average and maximum), while precipitation is not found to have such a significant influence.

1. Εισαγωγή

1.1 Οξιά

1.1.1 Γενικά χαρακτηριστικά

Η οξιά ανήκει στο γένος *Fagus*, το οποίο περιλαμβάνει 10 είδη με φυλλοβόλα δέντρα. Στην Ελλάδα εντοπίζεται το είδος *Fagus sylvatica* ή αλλιώς Ευρωπαϊκή οξιά. Η Ευρωπαϊκή οξιά ανήκει στα σημαντικότερα είδη πλατύφυλλων δέντρων στην Ευρώπη (Durrant et al. 2016).

Η οξιά μπορεί να φτάσει σε ύψος έως 30 μέτρα. Έχει ευρεία κόμη και λείο φλοιό, όπως όλα τα είδη του γένους *Fagus*. Τα κλαδιά έχουν χρώμα κόκκινο-καφέ. Τα φύλλα είναι πλατιά, μήκους από 3 έως 14 cm, σχήματος ελλειψοειδές ή ωοειδές. Το χρώμα τους ποικίλλει από ανοιχτό πράσινο έως σκούρο πράσινο. Ανθίζει το μήνα Απρίλιο ή Μάιο και ωριμάζει τον Σεπτέμβριο ή Οκτώβριο (Κοράκης 2015).

1.1.2 Γεωγραφική κατανομή

Το είδος *F. sylvatica* συναντάται στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης, κεντρικά και δυτικά σε χώρες όπως Ισπανία, Ιταλία, Γαλλία, Γερμανία και Ελλάδα και φτάνει βόρεια ως την Σκανδιναβία, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1. Στα πιο νότια σημεία της Ευρώπης όπως είναι η Ισπανία και η Σικελία, συνήθως συναντάται σε πιο μεγάλα υψόμετρα.

Η εξάπλωση του επηρεάζεται από τα θερμά καλοκαίρια και τις ξηρασίες. Γι' αυτό έχει περιορισμένη εξάπλωση σε βορειοδυτικές περιοχές (Packham et al. 2012). Σύμφωνα με τους Durrant et al. (2016), η κλιματική κρίση πιθανώς να έχει επιρροές και στην μελλοντική εξάπλωση της οξιάς, ιδιαίτερα στα ακραία τμήματα εξάπλωσης. Όμως, θα μπορούσε να επεκταθεί στην Σκανδιναβία και στα Βαλτικά κράτη.

Στην Ελλάδα εξαπλώνεται βόρεια, στα βόρεια σύνορα της χώρας και κεντρικά, σε μεγάλες οροσειρές, όπως αυτές της Πίνδου και του Κισσάβου. Το νοτιότερο σημείο όπου συναντάται η οξιά στην Ελλάδα βρίσκεται στην Ευρυτανία (Κοράκης 2015).



Εικόνα 1. *Fagus sylvatica*: Γεωγραφική κατανομή.

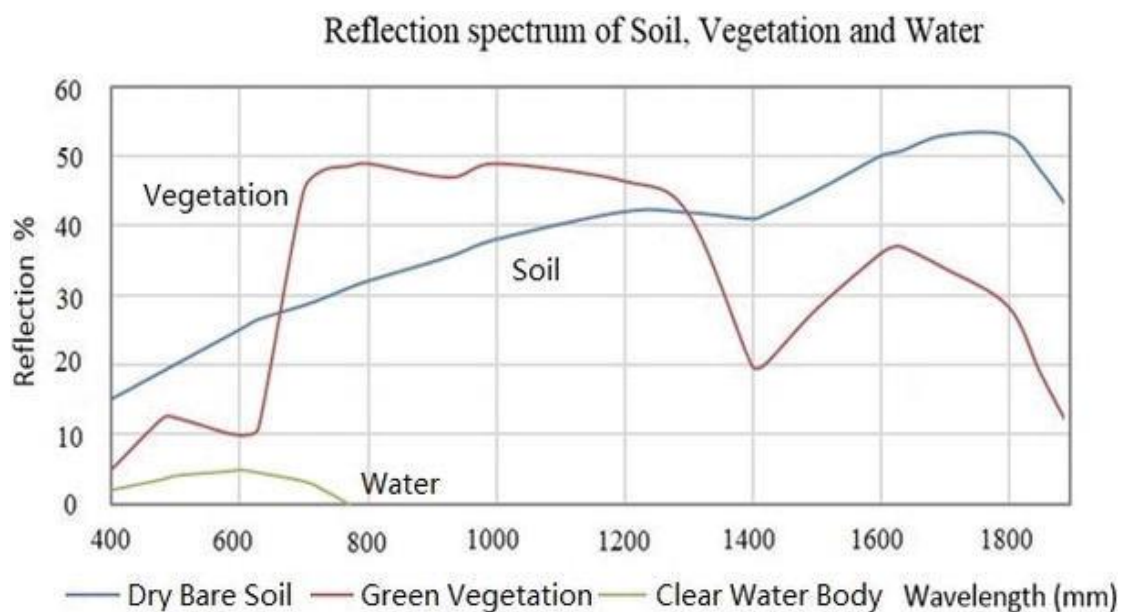
1.2 Τηλεπισκόπηση

Με τον όρο τηλεπισκόπηση οι επιστήμονες αναφέρονται στην συλλογή δεδομένων, σχετικά με το αντικείμενο που μελετάται, από απόσταση και όχι από το πεδίο (Jensen 2007). Με την χρήση της τηλεπισκόπησης αποφεύγονται διάφορα προβλήματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις πεδίου, όπως είναι το ανθρώπινο σφάλμα ή τα σφάλματα μεθόδου και η δυσχέρεια μετρήσεων σε απομακρυσμένα σημεία.

Ένας από τους ορισμούς εξηγεί την τηλεπισκόπηση ως την καταγραφή των δεδομένων από το ορατό, το υπέρυθρο και το μικροκυματικό μέρος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος από απόσταση.

Η τηλεπισκόπηση ανιχνεύει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο ορατό και μη ορατό φάσμα, η οποία αλληλεπιδρά με τα επιφανειακά υλικά και την ατμόσφαιρα. Μέσω της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας διακρίνονται τα διαφορετικά αντικείμενα γιατί το κάθε ένα έχει διαφορετική αλληλεπίδραση με αυτήν. Το φαινόμενο αυτό της διάκρισης ορίζεται ως φασματική υπογραφή του αντικειμένου (Sishodia et al. 2020).

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται παραδείγματα των φασμάτων ανάκλασης του ξηρού γυμνού εδάφους, της πράσινης βλάστησης και του καθαρού νερού. Καθώς το μήκος κύματος αυξάνεται από τα 400 έως τα 1800 nm τότε αυξάνεται και η ανάκλαση του γυμνού εδάφους. Ενώ, η πράσινη βλάστηση έχει υψηλή ανάκλαση στις περιοχές του κόκκινου φωτός και του εγγύς υπέρυθρου. Χάρης, αυτών των χαρακτηριστικών υπάρχει η δυνατότητα διάκρισης της πράσινης βλάστησης από άλλα αντικείμενα (Rustamov et al. 2018).



Σχήμα 1. Φάσματα ανάκλασης ξηρού γυμνού εδάφους, πράσινης βλάστησης και καθαρού νερού (Rustamov et al. 2018).

Η βασική μονάδα μέτρησης στην τηλεπισκόπηση είναι η ανακλαστικότητα, η οποία δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα και γι' αυτό είναι αναγκαίο να εξαχθεί. Επομένως, χρειάζεται να γίνει μετατροπή των μετρήσεων της φασματικής ακτινοβολίας σε τιμές ανακλαστικότητας (Peddle et al. 2001).

Τα δεδομένα συλλέγονται με τα όργανα τηλεπισκόπησης. Αυτά μπορεί να είναι φωτογραφικές μηχανές, σαρωτές, αισθητήρες, λέιζερ συστήματα radar τα οποία βρίσκονται σε δορυφόρους ή αεροσκάφη. Τελικά τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αναλύονται μέσα από επεξεργασία των εικόνων (Jensen 2007).

Τα δεδομένα που συλλέγονται από την τηλεπισκόπηση χρήζουν επεξεργασία για να μπορούν να είναι χρησιμοποιήσιμα από τους ερευνητές.

1.2.1 Αισθητήρες

Τα όργανα τηλεπισκόπησης ονομάζονται αισθητήρες και καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Δεν βρίσκονται σε φυσική επαφή με το αντικείμενο που μελετάται, αντιθέτως, βρίσκονται σε απόσταση που μεταβάλλεται.

Οι αισθητήρες που βρίσκονται στους δορυφόρους διακρίνονται σε δύο γενικές κατηγορίες, τους παθητικούς (passive sensors) και ενεργητικούς αισθητήρες (active sensors).. Ο διαχωρισμός τους γίνεται ανάλογα με την πηγή ακτινοβολίας την οποία καταγράφουν. Οι παθητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν τον ήλιο ως πηγή φωτισμού και οι ενεργητικοί παρέχουν την δική τους πηγή ενέργειας (What Is Remote Sensing? | Earthdata n.d.).

Σε επόμενο επίπεδο διακρίνονται, σύμφωνα με τον τρόπο που ανιχνεύουν την περιοχή ενδιαφέροντος, σε απεικονιστές (imaging) ή ανεικονιστές (non imaging).

Στου απεικονιστές περιλαμβάνονται τρία διαφορετικά συστήματα απεικόνισης.

1. Αισθητήρες οπτικής απεικόνισης. Λειτουργούν στην ορατή και ανακλαστική υπέρυθρη περιοχή. Περιλαμβάνουν παγχρωματικά, πολυφασματικά και υπερφασματικά συστήματα για την παραγωγή εικόνων.
2. Αισθητήρες θερμικής απεικόνισης. Λειτουργούν στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μεταξύ των μεσαίων και μακρινών υπέρυθρων και των μικροκυμάτων.
3. Αισθητήρες απεικόνισης ραντάρ (μικροκυμάτων). Συνήθως είναι ενεργοί αισθητήρες, που λειτουργούν σε ένα ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εύρους 1 mm-1 m.

Στους αισθητήρες μη απεικόνισης περιλαμβάνονται ραδιόμετρα μικροκυμάτων, υψομετρητή μικροκυμάτων, μαγνητικοί αισθητήρες, βαρυμετρόμετρα, αποστασιόμετρα λέιζερ, και υψομετρητές λέιζερ (Rustamov et al. 2018).

Τέλος, μπορούν να χωριστούν σε συστήματα πλαισίου (framing systems) ή σε σαρωτές (scanning systems). Αυτή η διάκριση εξαρτάται από τον τρόπο που γίνεται η καταγραφή της ακτινοβολίας. Τα συστήματα πλαισίου μετρούν ακαριαία την ακτινοβολία που προέρχεται από ολόκληρη την περιοχή ενδιαφέροντος, όπως το ανθρώπινο μάτι και οι φωτογραφικές μηχανές. Αντιθέτως, οι σαρωτές ανιχνεύουν την ενδιαφερόμενη περιοχή σημείο προς σημείο κατά μήκος διαδοχικών γραμμών, σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (Καρτάλης & Φεΐδας 2013).

1.3 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS)

Σύμφωνα με τους Καρτάλης & Φεΐδας, ο όρος Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών αναφέρεται σε «μια οργανωμένη συλλογή εξοπλισμού, λογισμικού, γεωγραφικών δεδομένων και εξειδικευμένου προσωπικού, σχεδιασμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε να συλλέγει και επιβεβαιώνει, να επεξεργάζεται, αποθηκεύει, ενημερώνει και να διαχειρίζεται όλους τους τύπους γεωγραφικών πληροφοριών»

Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών ή αλλιώς Geographical Information Systems (GIS) είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα εφαρμογών, το οποίο έχει αναπτυχθεί τα τελευταία 50 χρόνια. Η χρήση τους ξεκίνησε παγκοσμίως στον τομέα της γεωργίας από την δεκαετία του 1970, ενώ μετά το 1990 η εφαρμογή τους έγινε πιο διαδεδομένη και προσιτή. Αξιοποιείται σε διάφορα πλαίσια όπως την προστασία και την αξιολόγηση καταλληλότητας του εδάφους. Ακόμα, στην παρακολούθηση και τη ποσοτική έρευνα των αγροοικοσυστημάτων και στην έρευνα για την προστασία του περιβάλλοντος.

Ποικίλα ερευνητικά αποτελέσματα έχουν εφαρμοστεί στην γεωργική παραγωγή και είχαν ως αποτέλεσμα μεγάλα οικονομικά οφέλη (Zhang & Cao 2019).

Τα συστήματα αυτά σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες όπως η τηλεπισκόπηση, το GPS, τα υπολογιστικά συστήματα και την ανάλυση των δεδομένων έχουν μεγάλη επίδραση στην παρακολούθηση των καλλιεργειών και βοηθούν σημαντικά στην εφαρμογή βελτίωσης της παραγωγικότητας των καλλιεργειών (Ghosh et al. 2022).

Ο τρόπος ανάλυσης των δεδομένων στα συστήματα GIS παρουσιάζεται σε πολλά επίπεδα. Το κάθε επίπεδο μπορεί να περιέχει πληροφορίες για διαφορετικά χαρακτηριστικά.

1.4 Φασματική συμπεριφορά της βλάστησης

Ένας τομέας με τον οποίο ασχολείται η τηλεπισκόπηση είναι η βλάστηση. Αφορά καλλιεργούμενες εκτάσεις αλλά και φυσική βλάστηση, όπως είναι τα δάση. Πληροφορίες από την τηλεπισκόπηση όπως κλιματικά ή εδαφολογικά δεδομένα της περιοχής συμβάλλουν στην καλύτερη γνώση ή πρόβλεψη των μεταβολών της βλάστησης. Μεταβολές στην βλάστηση μπορεί να σχετίζονται με την ανάπτυξη των φυτών ή με αλλαγές στην φυσιολογία τους.

Κατά την διάρκεια της φωτοσύνθεσης των φυτών χρησιμοποιείται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από συγκεκριμένα μήκη κύματος, καθώς οι χλωροφύλλες απαιτούν ενέργεια. Στο μπλε (400-500 nm) και κόκκινο (600-700 nm) φάσμα του ορατού τμήματος γίνεται η μεγαλύτερη απορρόφηση της ακτινοβολίας. Ενώ η μικρότερη απορρόφηση παρατηρείται στο πράσινο (500-600 nm), όπου εκεί συναντάται και η μεγαλύτερη ανάκλαση. Αυτός είναι και ο λόγος που τα φύλλα έχουν πράσινο χρώμα στο ανθρώπινο μάτι.

Το 60% της ακτινοβολίας σκεδάζεται, ενώ ένα μικρό μέρος από αυτήν απορροφάται. Έτσι εξηγείται η αύξηση της ανακλαστικότητας στην υγιή βλάστηση.

Για αυτούς τους λόγους, μέσω της τηλεπισκόπησης και των κατάλληλων δεικτών βλάστησης είναι πιθανή η πρόβλεψη της ύπαρξης και της υγείας των φύλλων. Ένα χαρακτηριστικό των φύλλων που έχουν κάποια εσωτερική βλάβη είναι πως η ανάκλαση του φωτός αλλάζει στο υπέρυθρο φάσμα. Το ίδιο συμβαίνει ακόμα και αν το φύλλο έχει υποστεί καταπόνηση νερού (Sishodia et al. 2020).

1.5 Τηλεπισκόπηση στη γεωργία

Η τηλεπισκόπηση είναι ένα χρήσιμο εργαλείο της γεωργίας σχεδόν σε κάθε τομέα της καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το στάδιο της προετοιμασίας της γης έως το τελικό στάδιο της συγκομιδής. Είναι πολύ σημαντικό πως η τηλεπισκόπηση είναι ένας μη καταστροφικός τρόπος παρακολούθησης της βλάστησης και προσφέρει την ευχέρεια της παρακολούθησης εξ' αποστάσεως. Ταυτόχρονα, η εξέλιξη της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια καθιστά πιο εύκολη και προσιτή την χρήση της. Υπάρχουν, συνεπώς, περισσότερες πιθανές επιλογές σχετικά με τις πλατφόρμες και τους αισθητήρες ανάλογα με το επιθυμητό πεδίο έρευνας.

Η προσφορά της τηλεπισκόπησης στην γεωργία περιλαμβάνει την παρακολούθηση της χρήσης της γεωργικής γης, την πρόβλεψη της παραγωγής καλλιέργειών και πληροφορίες που αφορούν την φυσιολογία των φυτών ή τα χαρακτηριστικά του εδάφους και των υδάτινων πόρων (Weiss et al. 2020). Όπως για παράδειγμα, συλλέγονται δεδομένα που βοηθούν στην εκτίμηση επιπέδου ωρίμανσης της καλλιέργειας ή στην ανίχνευση ζιζανίων και ασθενειών.

Έπειτα από αυτές τις γνώσεις δίνεται η δυνατότητα να ληφθούν αποφάσεις που μπορούν να αυξήσουν τα κέρδη των γεωργικών εκμεταλλεύσεων και παράλληλα να γίνει

διαχείριση και αποφυγή των προβλημάτων που έχει η κάθε καλλιέργεια ή το περιβάλλον (Khanal et al. 2020).

Μέσω των δορυφορικών αισθητήρων καλύπτεται η απεικόνιση μιας μεγάλης έκτασης γης με στόχο τον καλύτερο έλεγχο των καλλιεργειών. Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες έχουν επιπλέον προτερήματα καθώς παρακάμπτουν τις κλιματικές συνθήκες και καθιστώνται κατάλληλοι για την παρατήρηση φυτών και δέντρων.

1.6 Δείκτες βλάστησης

Οι δείκτες βλάστησης σύμφωνα με τον Jensen (2007) είναι αδιάστατες μετρήσεις όπου χρήση τους είναι η ποσοτικοποίηση των βιοφυσικών παραμέτρων της βλάστησης. Είναι, λοιπόν, μαθηματικοί συνδυασμοί δύο ή περισσότερων φασματικών ζωνών της φασματικής ανάκλασης της βλάστησης που μετρούν οι αισθητήρες. Οι συνδυασμοί αυτοί, ενισχύουν την αντίθεση μεταξύ βλάστησης και γυμνού εδάφους. Επίσης, ποσοτικοποιεί τα χαρακτηριστικά των φυτών, την βιομάζα τους ή την περιεκτικότητα σε χλωροφύλλη κ.λπ. (NDVI FAQs 2019).

Υπάρχουν τέσσερις παράμετροι που πρέπει να τηρεί ένας δείκτης. Αρχικά, είναι αναγκαίο ο δείκτης να είναι όσο περισσότερο ευαίσθητος στην βιοφυσική παράμετρο που μελετάται, ιδανικά επιζητείται μια γραμμική συσχέτιση. Θα πρέπει να μπορεί να κανονικοποιεί εξωγενείς παράγοντες (πχ γωνία ήλιου) και ενδογενείς παράγοντες (πχ φυτική κόμη). Τέλος, είναι απαραίτητη η άμεση σύνδεση του δείκτη με κάποια βιοφυσική παράμετρο.

Υπάρχουν πάνω από 100 τύποι δεικτών που σχετίζονται με την βλάστηση. Είναι σύνηθες η χρήση της αντιστρόφως ανάλογης σχέσης μεταξύ της ανακλαστικότητας και της πράσινης βλάστησης στο ερυθρό και το εγγύς υπέρυθρο (Jensen 2007).

Κάποιοι από τους σημαντικότερους δείκτες είναι:

1. Ο απλός λόγος, SR

ο οποίος περιγράφεται από την εξίσωση $SR = \frac{\rho_{red}}{\rho_{nir}}$ και σχετίζεται με τη βιομάζα της βλάστησης ή το δείκτη φυλλικής επιφάνειας (LAI)

2. Ο Δείκτης Βλάστησης Κανονικοποιημένης Διαφοράς, NDVI
που εκφράζεται με την εξίσωση $NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$

3. Ο Ενισχυμένος Δείκτης Βλάστησης, EVI

$$EVI = G \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue} + L} (1 + L)$$

ρ_{nir} : η ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο.

ρ_{red} : η ανακλαστικότητα στο κόκκινο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

ρ_{blue} : η ανακλαστικότητα στο μπλε τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

L: Παράγοντας προσαρμογής εδάφους.

C_1, C_2 : Συντελεστές που περιγράφουν τη χρήση του μπλε καναλιού για διορθώσεις ατμοσφαιρικής σκέδασης αερολυμάτων του κόκκινου καναλιού.

G: Παράγοντας κέρδους που καθορίζεται ως 2,5 (Jensen, 2007).

1.6.1 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

Ο NDVI εισάχθηκε στην τηλεπισκόπηση την δεκαετία του 1970 και αποτελεί έναν από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους δείκτες στην βλάστηση. Είναι ένας απλός δείκτης διαφοράς ο οποίος σχετίζεται με την φωτοσυνθετικά ενεργό βιομάζα του φυτού. Αυτό το επιτυγχάνει λαμβάνοντας υπόψη τιμές ανάκλασης σε δύο ζώνες: την ορατή κόκκινη ζώνη και την κοντινή υπέρυθρη ζώνη. Ο NDVI περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση

$$NDVI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + \rho_{red}}$$

όπου ρ_{nir} και ρ_{red} η ανακλαστικότητα στο εγγύς υπέρυθρο και στο κόκκινο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος αντίστοιχα.

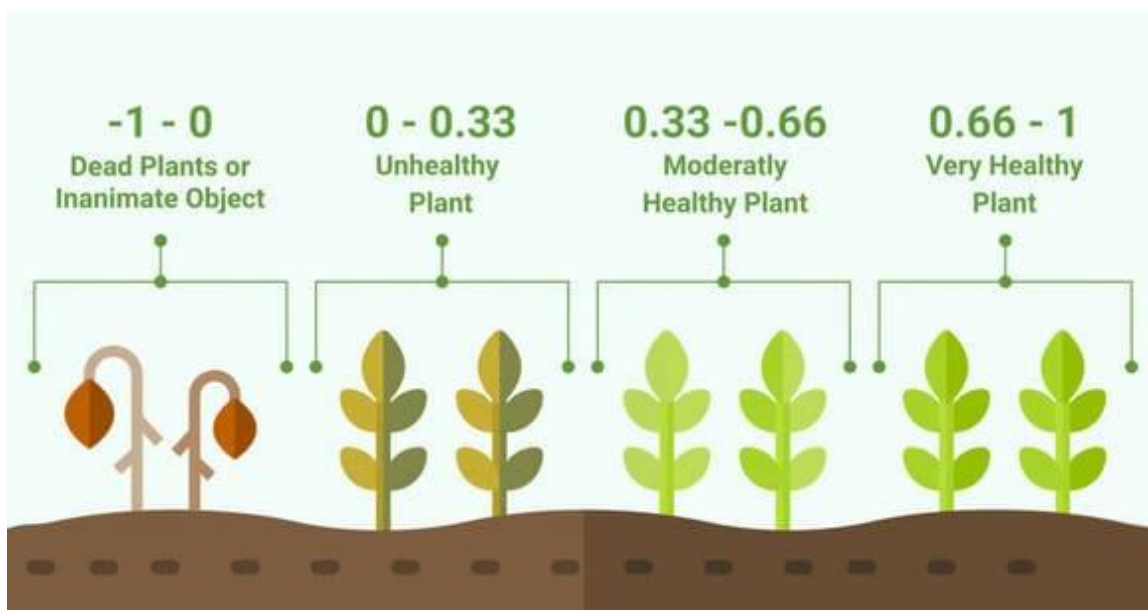
Όταν το φυτό είναι υγιές, τότε η χρωστική χλωροφύλλη απορροφά το μεγαλύτερο μέρος του ορατού κόκκινου φωτός. Συνεπώς, σε συνθήκες υψηλής φωτοσυνθετικής δραστηριότητας που συνάδει σε πυκνή βλάστηση, η ανάκλαση στην κόκκινη ζώνη είναι μικρή και στην εγγύς υπέρυθρη μεγάλη. Έπειτα από σύγκριση των τιμών μπορεί να βγει συμπέρασμα σχετικό με την φυτοκάλυψη όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.

Οι τιμές του δείκτη NDVI κυμαίνονται από -1 ως 1. Όταν οι τιμές που προκύπτουν είναι αρνητικές συμπεραίνεται πως η περιοχή αντιστοιχεί σε υδάτινη επιφάνεια, ανθρωπογενείς κατασκευές όπως κτήρια ή αντιστοιχεί σε σύννεφα ή χιόνι. Το γυμνό έδαφος περιγράφεται από τις τιμές 0,1-0,2. Ενώ η βλάστηση ξεκινά από τιμές 0,2 ως 1, όμως για υγιής και πυκνή βλάστηση οι επιθυμητές τιμές πρέπει να είναι πάνω από 0,5.

Πίνακας 1. Τιμές δείκτη NDVI.

Τιμές NDVI (-1 ως 1)	Τύπος εδάφους
Αρνητικές τιμές	Νερό, Κτήρια, Χιόνι
0,1-0,2	Γυμνό έδαφος
0,2-0,5	Χαμηλή βλάστηση
>0,5	Πυκνή βλάστηση

Αντίστοιχα, γίνεται απεικόνιση στις πιθανές κατάστασης των φυτών ανάλογα με την τιμή του NDVI (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Οπτική απεικόνιση των τιμών του δείκτη NDVI στα φυτά (NDVI FAQs 2019).

1.7 Δορυφόροι

Ένας δορυφόρος μπορεί να είναι φυσικός όπως ένας πλανήτης που περιστρέφεται γύρω από κάποιον άλλον πλανήτη ή τεχνητός. Οι τεχνητά κατασκευασμένοι δορυφόροι εκτοξεύτηκαν από την γη και βρίσκονται σε τροχιά γύρω της. Αυτοί οι δορυφόροι αποτελούν απαραίτητα εργαλεία στην μετεωρολογία, στις επικοινωνίες και στην καλύτερη κατανόηση του ηλιακού συστήματος και του σύμπαντος.

Ο πρώτος δορυφόρος ήταν ο Σπούτνικ 1 και εκτοξεύτηκε από την Σοβιετική Ένωση το 1957. Από την επόμενη χρονιά και έπειτα η NASA έχει εκτοξεύσει εκατοντάδες ακόμα δορυφόρους στο διάστημα. Οι πρώτες δορυφορικές εικόνες της γης προήλθαν από τον δορυφόρο Explorer 6 της NASA το 1959.

Σήμερα, οι επιστήμονες εκμεταλλεύονται τους δορυφόρους της NASA για την μελέτη της γης και του διαστήματος. Καθώς, οι δορυφόροι παρέχουν πληροφορίες για τα σύννεφα, τη γη και τους ωκεανούς. Έχουν την δυνατότητα να μετρήσουν τις ποσότητες των αερίων στην ατμόσφαιρα και την ποσότητα της ενέργειας που απορροφάται και εκπέμπεται από τη γη. Επίσης, μέσω των δορυφόρων γίνεται παρακολούθηση των ηφαιστειών και των πυρκαγιών.

Έτσι, μέσω αυτών των πληροφοριών οι επιστήμονες είναι ικανοί να προβλέψουν τον καιρό, να παρακολουθούν το φυσικό περιβάλλον της γης ή πιθανές επικίνδυνες ακτινοβολίες που προέρχονται από τον ήλιο (May 2015)

Συγκεκριμένα στην γεωργία οι δορυφόροι αποκτούν δεδομένα από ένα μεγάλο χρονικό διάστημα που αφορά την φυτοκάλυψη, τις ιδιότητες του εδάφους ή πληροφορίες για μακροπρόθεσμες αλλαγές. Ως αποτέλεσμα, δίνουν στους επιστήμονες την δυνατό-

τητα να προσαρμοστούν στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και να προφυλαχτούν από τυχόν δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αλλά και στις προκλήσεις που προκύπτουν από την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και επομένως στις αυξανόμενες παγκόσμιες απαιτήσεις σε τρόφιμα (*How Space Data Are Transforming the Global Food System - Earth Online n.d.*).

1.7.1 Αισθητήρες MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*)

Οι αισθητήρες MODIS ή αλλιώς Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer λειτουργούν στους δορυφόρους Terra και Aqua της NASA. Ο Terra ακολουθεί τροχιά που περνάει από το βορρά προς το νότο πάνω από τον ισημερινό το πρωί και εκτοξεύθηκε στις 18 Δεκεμβρίου 1999. Αντίθετα, ο Aqua κάνει διαδρομή που πηγαίνει από νότο προς βορρά και περνάει πάνω από τον ισημερινό το απόγευμα και εκτοξεύθηκε στις 4 Μαΐου 2002. Οι δύο αυτοί δορυφόροι καλύπτουν όλη την επιφάνεια της γης κάθε 1 ως 2 μέρες, καταγράφοντας δεδομένα σε 36 φασματικές ζώνες ή ομάδες μηκών κύματος ή αλλιώς κανάλια και σε τρεις χωρικές αναλύσεις: 250 m, 500 m και 1.000 m (*LP DAAC - MODIS Overview n.d.*).

Ο MODIS προσφέρει διάφορα προϊόντα που αφορούν:

1. Ένα πρώτο επίπεδο που αφορά ακατέργαστες ή βαθμονομημένες ακτινοβολίες και πεδία γεωγραφικού εντοπισμού.
2. Ατμοσφαιρικά προϊόντα: όπως είναι τα ατμοσφαιρικά προφίλ ή προϊόντα σύννεφων.
3. Εδαφικά προϊόντα: περιλαμβάνει πολλούς τύπους προϊόντων που σχετίζονται με την παρακολούθηση της βλάστησης.
 - a. Ανάκλαση επιφάνειας
 - b. Θερμοκρασία επιφάνειας εδάφους
 - c. Προϊόντα κάλυψης γης
 - d. Δείκτες βλάστησης (NDVI & EVI)
 - e. Θερμικές ανωμαλίες/πυρκαγιές
 - f. FPAR / (LAI)
 - g. Εξατμισοδιαπνοή, κ.α.
4. Προϊόντα της κρυόσφαιρας, δηλαδή κάλυψη χιονιού ή θαλάσσιος πάγος & θερμοκρασία επιφάνειας πάγου.
5. Προϊόντα ωκεανού όπως την θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας, ή τη μέση ημερήσια φωτοσυνθετικά διαθέσιμη ακτινοβολία κ.α.

(*MODIS Web n.d.*).

1.8 Κλιματική αλλαγή

Για να προσδιοριστεί ο ορισμός της κλιματικής αλλαγής είναι αναγκαίο να γίνει κατανοητό τι είναι το κλίμα. Με τον όρο κλίμα γίνεται αναφορά στο σύνθετο καιρό που επικρατεί σε έναν τόπο. Το κλίμα διαφέρει σε κάθε εποχή και σε κάθε τόπο. Το κλίμα της γης είναι το κλίμα που προκύπτει με τον συνδυασμό όλων των κλιμάτων του κόσμου.

Η κλιματική αλλαγή αναφέρεται σε αλλαγές των καιρικών συνθηκών που συνήθως επικρατούν σε έναν τόπο. Για παράδειγμα αυτή η αλλαγή θα μπορούσε να είναι μια αλλαγή στην ποσότητα της βροχής που δέχεται συνήθως ένας τόπος μέσα σε ένα χρόνο. Ή θα μπορούσε να είναι μια αλλαγή στη συνήθη θερμοκρασία ενός τόπου.

Ταυτόχρονα όμως η κλιματική αλλαγή είναι μια αλλαγή στο κλίμα της Γης. Οι σύνηθες θερμοκρασίες της γης και οι ποσότητες των βροχοπτώσεων αλλάζουν.

Οι λόγοι που επηρεάζουν την κλιματική αλλαγή είναι πολλοί και διαφορετικοί. Οι επιστήμονες επισημαίνουν πως και ο άνθρωπος μπορεί με τις επιδράσεις του να επηρεάσει το κλίμα της γης.

Σύμφωνα με τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (IPCC), οι αλλαγές αυτές είναι εμφανείς πλέον, και επιβεβαιώνουν τις προβλέψεις των επιστημόνων. Οι επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής περιλαμβάνουν συρρίκνωση των πάγων, μετατόπιση των γεωγραφικών περιοχών εξάπλωσης χλωρίδας και πανίδας και μεγαλύτερους καύσωνες σε ένταση και διάρκεια (*Home – Climate Change: Vital Signs of the Planet* n.d.).

Η τηλεπισκόπηση και τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών είναι αποδεδειγμένα εργαλεία για την αξιολόγηση των αλλαγών στη χρήση γης και την κάλυψη γης (Khanal et al. 2020).

1.8.1 Κλιματική αλλαγή και φαινολογία των φυλλοβόλων

Οι θερμότερες θερμοκρασίες της άνοιξης και οι μεγαλύτερες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, έχουν οδηγήσει σε μεγαλύτερο κίνδυνο ζημιών από ανοιξιότικο παγετό στα φυλλοβόλα ξυλώδη φυτά των εύκρατων περιοχών. Ο όψιμος εαρινός παγετός χαρακτηρίζεται από απότομη και σοβαρή πτώση της θερμοκρασίας σε μία περίοδο όπου επικρατούν ήπιες καιρικές συνθήκες. Εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, στην Ευρώπη υπάρχει σημαντική αύξηση των ακραίων κλιματικών φαινομένων (Augspurger 2013). Αυτό επηρεάζει το φύλλωμα των δέντρων, ιδιαίτερα τα πρόσφατα φύλλα και προκαλεί μείωση της ακτινικής ανάπτυξης. Στα υψηλότερα τα δέντρα φαίνονται πιο επιρρεπή στον όψιμο εαρινό παγετό. Οι παγετοί αυτοί αποτελούν απειλή για τα φυλλοβόλα δέντρα, ιδιαίτερα όταν συνδυάζονται με καλοκαιρινή ξηρασία (Tonelli et al. 2023).

Η Ευρωπαϊκή οξιά παρατηρήθηκε πως παρουσιάζει καθυστερημένη έκπτυξη των οφθαλμών στα χαμηλότερα υψόμετρα (Vitasse et al. 2009). Η αποβολή των φύλλων της οξιάς εξαιτίας του όψιμου εαρινού παγετού εξαρτάται από την εαρινή φαινολογία και την απότομη πτώση της θερμοκρασίας την άνοιξη (Tonelli et al. 2023).

Επιπλέον, την τελευταία δεκαετία υπήρχαν πολλά έτη με έντονη ξηρασία στην Ευρώπη που προκάλεσαν σοβαρές συνέπειες στα δασικά οικοσυστήματα. Τα συμπτώματα στο στρες της υγρασίας ήταν εξαιρετικά χαμηλά δυναμικά νερού, αποχρωματισμός των φύλλων και πρόωρη πτώση των φύλλων. Έπειτα από μια σημαντική ξηρασία τα φυτά ήταν πιο ευάλωτα την επόμενη χρονιά στην καλοκαιρινή ξηρασία (Schuldt et al. 2020).

1.9 Σκοπός της εργασίας

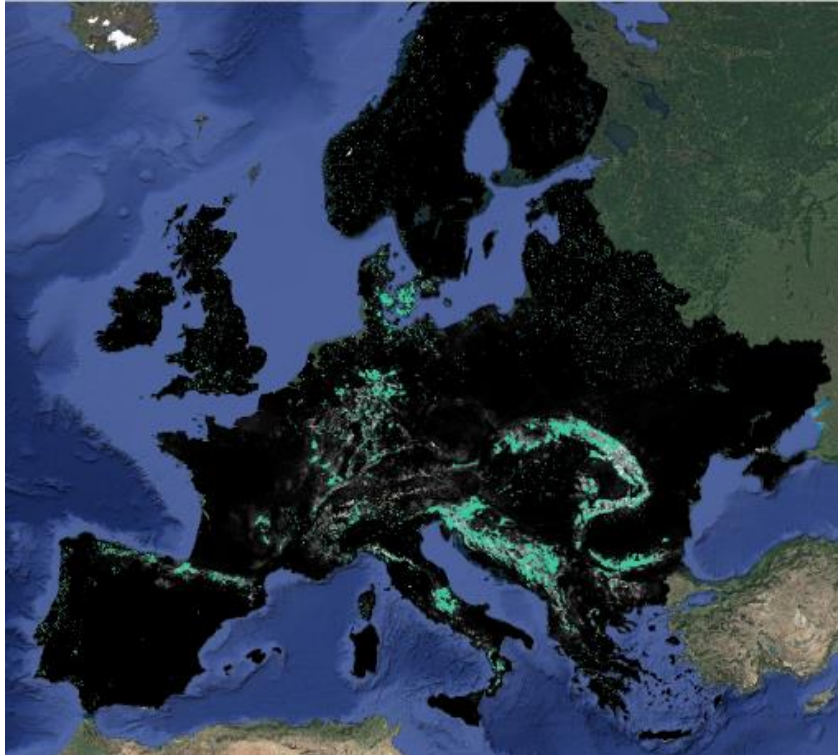
Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η κλιματική αλλαγή επηρεάζει διάφορες πτυχές του περιβάλλοντος, συμπεριλαμβανομένης της χλωρίδας και της πανίδας. Η αλλαγή του κλίματος έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των βιοτικών προτύπων, τις αλλαγές στη φαινολογία των φυτών και τα πρότυπα κατανομής. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στη φαινολογία της ευρωπαϊκής οξιάς (*Fagus sylvatica*) με τη χρήση Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS).

2. Υλικά & Μέθοδοι

2.1 Περιοχή μελέτης

Αρχικά μετά από έρευνα των ειδών της οξιάς που επικρατούν στην Ευρώπη παρατηρήθηκε πως το κυριότερο είδος που συναντάται είναι το *Fagus sylvatica*. Για την επιλογή των περιοχών μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα δασικών γενετικών πόρων (*Fagus Sylvatica European Beech* n.d.) και Ελληνικοί δασικοί χάρτες. Μέσω του λογισμικού QGIS προσδιορίστηκαν οι συντεταγμένες των περιοχών μελέτης.

Στις επόμενες εικόνες απεικονίζονται οι χάρτες με την Ευρωπαϊκή οξιά. Στην Εικόνα 3 τα δάση οξιάς απεικονίζονται με πράσινο χρώμα και υπάρχει και διαβάθμιση στην πυκνότητα του δάσους με τα χρώματα μαύρο και λευκό, όπου όσο πιο λευκό τόσο μεγαλύτερη πυκνότητα. Στην Εικόνα 4 οι περιοχές όπου συναντάται η οξιά χαρακτηρίζονται με κόκκινο.

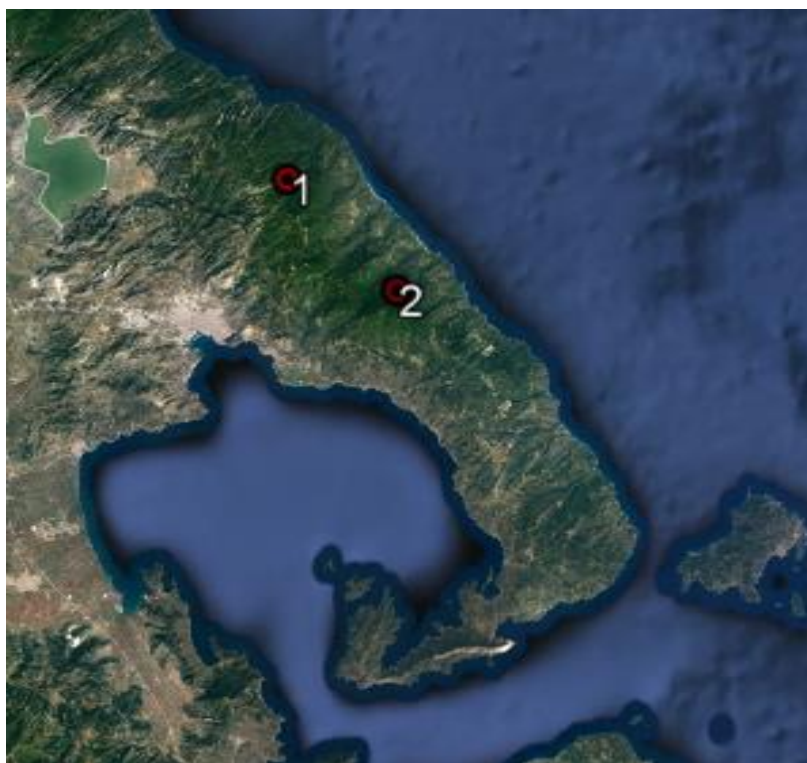


Εικόνα 3. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Fagus sylvatica* στην Ευρώπη (*Fagus Sylvatica European Beech* n.d.).



*Εικόνα 4. Γεωγραφική κατανομή του είδους *Fagus sylvatica* στην Ελλάδα.*

Κριτήρια για την επιλογή των περιοχών μελέτης ήταν η παραλλακτικότητα σε διάφορα χαρακτηριστικά της περιοχής, όπως το διαφορετικό υψόμετρο και το κλίμα κάθε περιοχής. Έτσι, η μελέτη επικεντρώθηκε σε 15 περιοχές από τις οποίες οι 10 ανήκουν στην Ελλάδα και οι 5 στην Ιταλία. Για παράδειγμα, τα πρώτα δύο σημεία αφορούν την περιοχή του Πηλίου. Το πρώτο είναι στο βορειότερο σημείο του δάσους ενώ το δεύτερο στο νοτιότερο (Εικόνα 5).

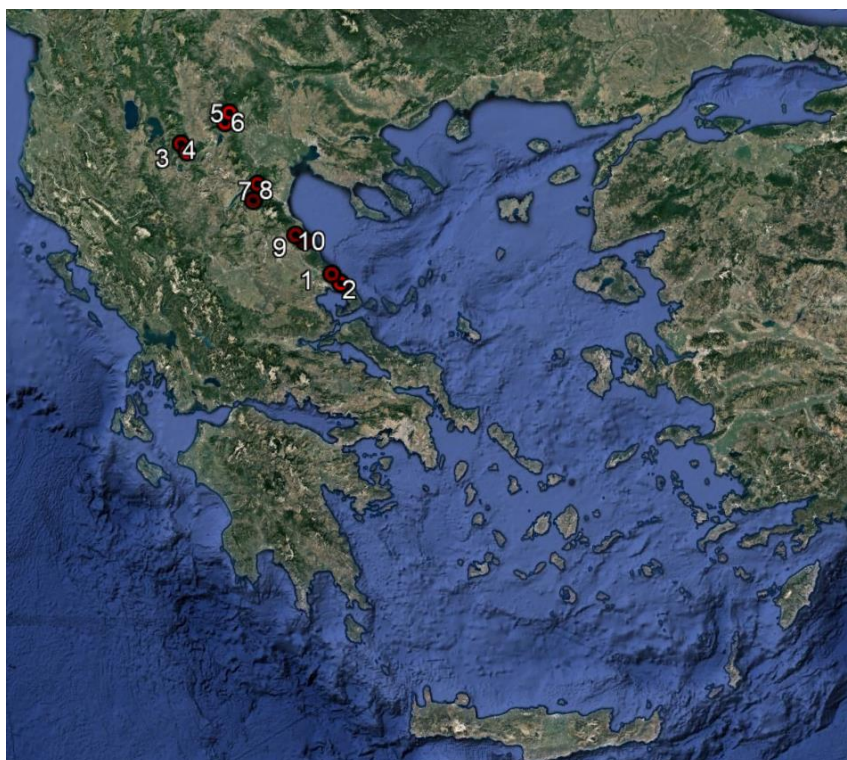


Εικόνα 5. Οι περιοχές μελέτης στο Πήλιο.

Στον Πίνακα 2 και τις Εικόνες 6 και 7 παρουσιάζονται οι 15 περιοχές μελέτης.

Πίνακας 2. Περιοχές μελέτης.

Περιοχή Μελέτης (Sites)	Γεωγραφικό μήκος (Longitude)	Γεωγραφικό πλάτος (Latitude)	Υψόμετρο (Elevation)
1	23.04109	39.47017	916
2	23.139037	39.381215	953
3	21.398845	40.667905	1364
4	21.328413	40.74913	1317
5	21.875887	40.913975	1286
6	21.93419	41.00201	882
7	22.16739	40.18515	1270
8	22.229497	40.333622	1156
9	22.74724	39.78333	1271
10	22.64405	39.8473	869
11	14.864404	37.917229	1355
12	15.836235	38.133378	1369
13	16.672893	39.079034	1526
14	10.09657	44.37609	1285
15	13.41478	42.4909	1270



Εικόνα 6. Περιοχές μελέτης στην Ελλάδα.



Εικόνα 7. Περιοχές μελέτης στην Ιταλία.

2.2 Δορυφορικά δεδομένα

Για την εκπόνηση της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα του αισθητήρα MODIS. Χρησιμοποιήθηκε η ιστοσελίδα της NASA: ORNL DAAC MODIS Land Products Subsetting and Visualization Tools (ORNL DAAC 2018), η οποία δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να εξάγουν υποσύνολα συγκεκριμένων προϊόντων του MODIS σε μορφή ascii και παρέχει τη δυνατότητα οπτικοποίησης των δεδομένων σε χρονική ανάλυση με γραφήματα και στατιστικά αποτελέσματα. (MODIS Web n.d.).

Επιλέχθηκαν προϊόντα σχετικά με την ανάκλαση της επιφάνειας (Surface Reflectance), διότι προσφέρουν μια εκτίμηση της φασματικής ανάκλασης της επιφάνειας όπως θα μετρίοταν αν ήταν στο έδαφος δίχως ατμοσφαιρική σκέδαση ή απορρόφηση. Τα δεδομένα αυτά είναι γεωμετρικά, ραδιομετρικά και ατμοσφαιρικά διορθωμένα και καταγράφουν την ανακλαστικότητα σε επτά φασματικές περιοχές (κανάλια, bands), όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Τα φασματικά κανάλια του αισθητήρα MODIS.

(MODIS Land Team Home Page n.d.)

Κανάλι	Μήκος κύματος, nm
1	620 - 670
2	841 - 876
3	459 - 479
4	545 - 565
5	1230 - 1250
6	1628 - 1652
7	2105 - 2155

Για κάθε περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα για τις χρονιές 2000-2022 από τα ακόλουθα προϊόντα:

1. MOD09A1 Surface Reflectance (Terra), 8-Day, 500m
2. MYD09A1 Surface Reflectance (Aqua), 8-Day, 500m

Τα δεδομένα αυτά αποτελούν προϊόν οκταήμερης σύνθεσης (επιλέγεται η καλύτερη εικόνα ανά 8 ημέρες) και έχουν χωρική ανάλυση 500 m. Επιπροσθέτως των φασματικών δεδομένων, περιλαμβάνουν τρία κανάλια επιπλέον (LP DAAC - MODIS Overview n.d.):

1. sur_refl_day_of_year (Day of the year for the pixel), η ημερομηνία της εικόνας που έχει επιλεγεί για κάθε pixel σε μορφή Day of the year (DOY) δηλαδή ημέρα του έτους. Η μέρα του έτους παρουσιάζεται με τον αύξων αριθμό της ημέρας που αρχίζει με την ημέρα 1 την 1η Ιανουαρίου. Υπάρχουν δύο ημερολόγια - ένα για τα κανονικά έτη με 365 ημέρες και ένα για τα δίσεκτα έτη με 366 ημέρες.
2. sur_refl_qc_500 m (Surface reflectance 500 m band quality control flags), δείκτες ποιότητας για κάθε pixel, που αφορούν την παρουσία σύννεφων, χιονιού κ.α.

3. sur_refl_raz (MODIS relative azimuth angle)

Επιπλέον, παρέχεται από τον MODIS το προϊόν phenology το οποίο παρουσιάζει δεδομένα για την φαινολογία των φυτών για όλες τις χρονιές. Δίνεται η ημερομηνία σε Day of the year για τις παραμέτρους:

- Greenup, η ημερομηνία έναρξης της έκπτυξης των φύλλων την άνοιξη
- Maturity, η ημερομηνία λήξης της έκπτυξης των φύλλων την άνοιξη
- MidGreenup, η ημερομηνία στο μέσο της έκπτυξης των φύλλων την άνοιξη
- Peak, η ημερομηνία στο μέγιστο σημείο φυλλώματος
- Senescence, η ημερομηνία έναρξης της πτώσης των φύλλων το φθινόπωρο
- Dormancy, η ημερομηνία λήξης της πτώσης των φύλλων το φθινόπωρο
- MidGreendown, η ημερομηνία στο μέσο της πτώσης των φύλλων το φθινόπωρο

Στην εργασία, χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι Dormancy και Green up, οι οποίες παρουσιάζονται στους Πίνακες 4-6.

2.2.1 Επεξεργασία δορυφορικών δεδομένων

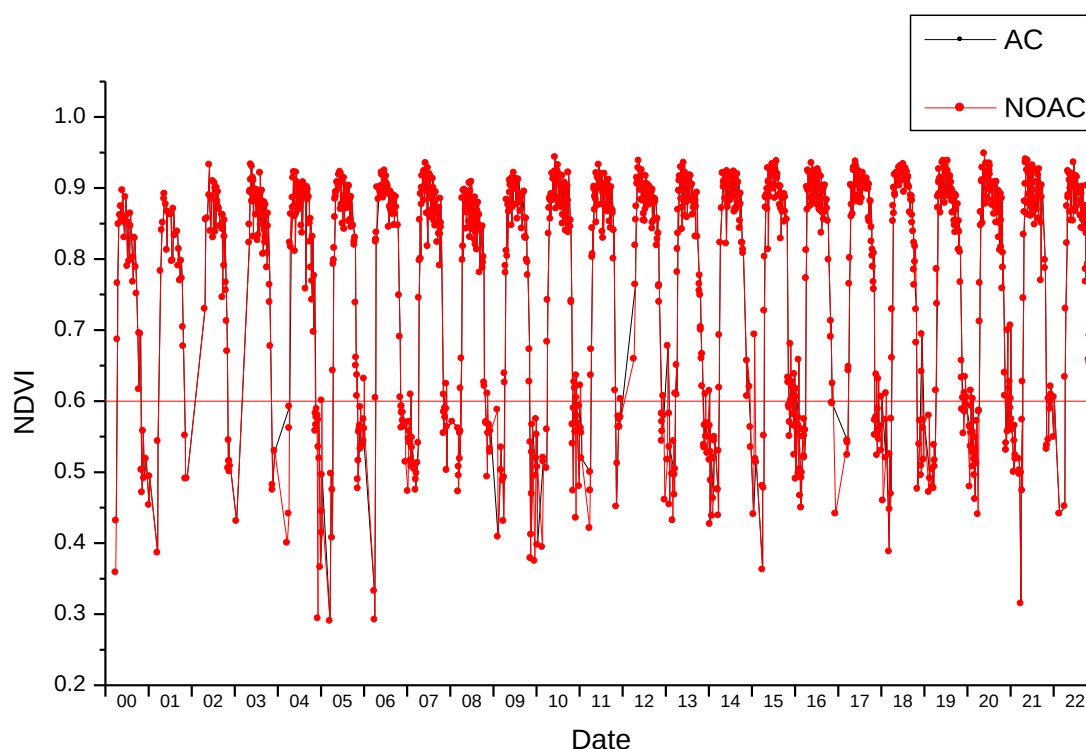
Το πρώτο στάδιο ήταν η δημιουργία υπολογιστικών φύλλων που περιείχαν τα δεδομένα του δορυφόρου και η επεξεργασία τους με στόχο την συλλογή των τιμών του δείκτη NDVI για κάθε ημερομηνία σε όλες τις περιοχές. Αρχικά, τα δεδομένα διακρίθηκαν σε δύο κατηγορίες με κριτήριο το cloud adjacent, δηλαδή το αν υπάρχει παρουσία συννέφων κοντά στο pixel και αν υπάρχει πιθανότητα να το σκιάζει. Έτσι, προέκυψαν αυτά τα οποία λάμβαναν υπ' όψη το cloud adjacent (AC) και σε αυτά που δεν το λάμβαναν (NOAC: no adjacent clouds). Έπειτα, έγινε ο υπολογισμός του δείκτη NDVI. Αυτή η διαδικασία έγινε αντίστοιχα για τα δεδομένα από τον Terra και τον Aqua. Έπειτα δημιουργήθηκε ένα κοινό αρχείο που περιλάμβανε τις τιμές του NDVI από τον Terra και τον Aqua σε AC και NOAC για κάθε ημερομηνία μιας περιοχής. Αφού δημιουργήθηκαν όλα τα δεδομένα για όλες τις περιοχές μπόρεσε να γίνει απεικόνιση των χρονοσειρών του δείκτη NDVI.

2.3 Χρονοσειρές NDVI

Δημιουργήθηκαν χρονοσειρές του δείκτη NDVI για την διάρκεια της περιόδου μελέτης (2000-2022) σε όλες τις περιοχές. Έτσι, μπορούσαν να απεικονιστούν οι φαινολογικές διαδικασίες του φυτού κατά την διάρκεια του έτους. Ανάλογα με την τιμή του δείκτη ήταν εφικτό να προσδιοριστεί η ημερομηνία έκπτυξης και πτώσης των φύλλων και ακολούθως η διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου για κάθε χρονιά. Η κρίσιμη τιμή του NDVI που επιλέχθηκε ήταν το 0,6 για τον εντοπισμό του φυλλώματος ή όχι στα φυτά.

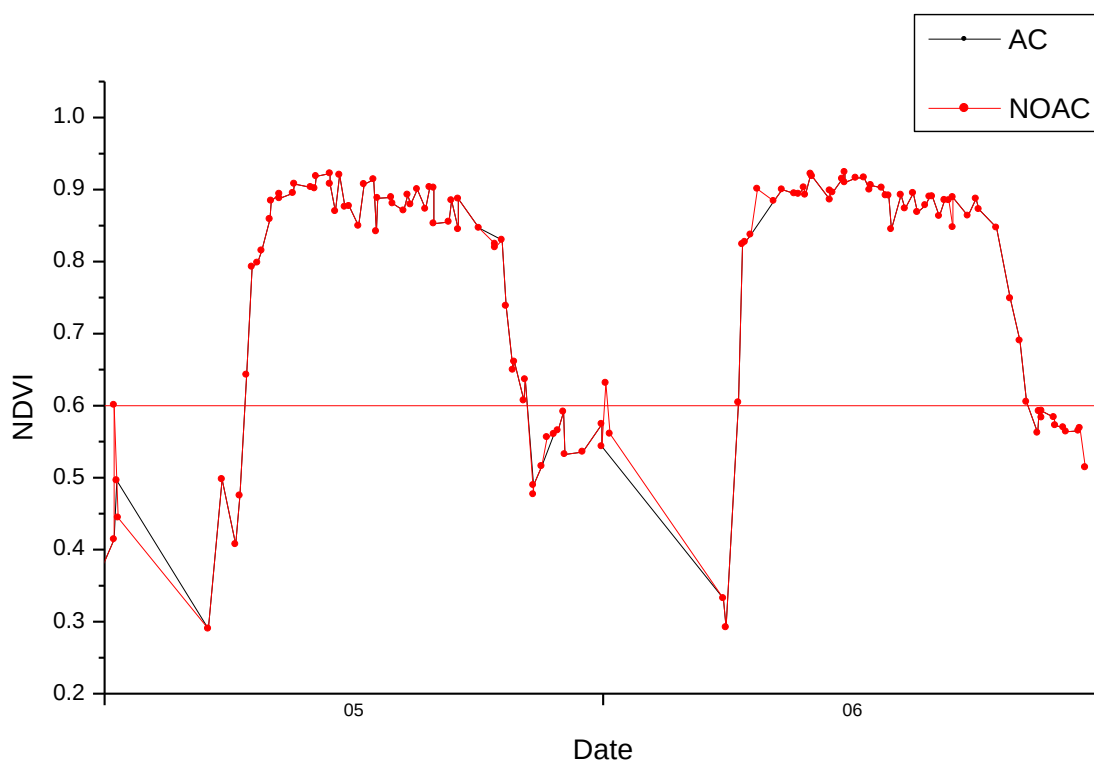
Στο σχήμα 2 απεικονίζεται η χρονοσειρά του site 1 από το 2000 ως το 2022. Έχει τοποθετηθεί μια γραμμή αναφοράς στην τιμή του δείκτη 0,6, και με βάση αυτή προσδιορίζεται η σχετική ημερομηνία έκπτυξης και πτώσης των φύλλων. Με μαύρο χρώμα αντιπροσωπεύονται τα δεδομένα που έλαβαν υπ' όψη την ρύθμιση των συννέφων

(AC), όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Αντίστοιχα, με κόκκινα είναι τα δεδομένα χωρίς την ρύθμιση των συννέφων (NOAC).



Σχήμα 2. Χρονοσειρά του δείκτη NDVI στο Site 1 για το χρονικό διάστημα 2000-2022.

Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται δύο χρονιές της ίδιας περιοχής μελέτης και διακρίνεται η πρώτη ημερομηνία στην οποία ο δείκτης NDVI ξεπερνά την τιμή 0,6. Η ημερομηνία αυτή αντιστοιχεί στην έναρξη της αναπτυξιακής περιόδου (Start Of Season, SOS) και η πρώτη ημερομηνία στην οποία η τιμή του NDVI γίνεται μικρότερη από 0,6 ορίζεται ως λήξη της αναπτυξιακής περιόδου (End Of Season, EOS). Ο αριθμός των ημερών μεταξύ των δυο ημερομηνιών (EOS-SOS) αντιστοιχεί στη διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου (Length Of Season, LOS). Οι ημερομηνίες αυτές υπολογίζονται με βάση την χρονοσειρά χωρίς την ρύθμιση των συννέφων (NOAC).



Σχήμα 3. Χρονοσειρά του δείκτη NDVI του Site 1 για το χρονικό διάστημα 2005-2007.

Τα υπόλοιπα διαγράμματα χρονοσειρών του NDVI για τις περιοχές μελέτης 1-15 παρουσιάζονται στο Παράρτημα.

2.4 Αυτόματος υπολογισμός SOS-EOS

Η τακτική που επεξηγήθηκε προηγουμένως δεν μπορούσε να είναι απόλυτα ακριβής και απαιτούσε πολύ χρόνο. Για αυτό, προτιμήθηκε η χρήση ενός πιο αυτοματοποιημένου τρόπου μέσω των υπολογιστικών φύλλων. Μέσω της μεθόδου interpolation, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των ενδιάμεσων τιμών μέσω παρεμβολής, δημιουργήθηκαν υπολογιστικά φύλλα με καθημερινές τιμές NDVI. Έτσι, με τα κατάλληλα φίλτρα έγινε αυτόματα ο εντοπισμός της ημερομηνίας εκείνης στην οποία ο δείκτης NDVI ξεπερνούσε το όριο του 0,6.

Ακόμη και μετά την μέθοδο interpolation υπήρξε έλεγχος των αποτελεσμάτων και σύγκριση με τις χρονοσειρές.

2.5 Μετεωρολογικά δεδομένα

Ως τελικό στάδιο συλλέχθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα για τα σημεία μελέτης με στόχο τον εντοπισμό αλλαγών σε αυτά και τυχόν επιρροές που μπορούν να έχουν στην φαινολογία των φυτών.

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το WorldClim που είναι μια βάση δεδομένων με παγκόσμια δεδομένα καιρού και κλίματος υψηλής χωρικής ανάλυσης από 30 δευτερόλεπτα (~1 km²) έως 10 λεπτά (~340 km²). Προορίζονται για χρήση χαρτογράφησης και χωρικής μοντελοποίησης. Και γι' αυτό παρέχονται για ερευνητικές χρήσεις (*Global Climate and Weather Data — WorldClim 1 Documentation n.d.*)

Από το WorldClim συλλέχθηκαν δεδομένα για τη θερμοκρασία (ελάχιστη και μέγιστη) και για την βροχόπτωση. Τα δεδομένα είναι μηνιαία και αφορούν τις χρονιές 1980 ως 2018. Χρειάστηκε η κατάλληλη επεξεργασία ώστε να επιλεχθούν οι παράμετροι αυτοί για τα συγκεκριμένα σημεία μελέτης. Αυτό έγινε μέσω του προγράμματος SNAP όπου έγινε εξαγωγή των δεδομένων για τις συντεταγμένες της κάθε περιοχής μελέτης σε μορφή excel. Στην πορεία υπολογίστηκε η μέση θερμοκρασία με την βοήθεια των ελάχιστων και μέγιστων τιμών της.

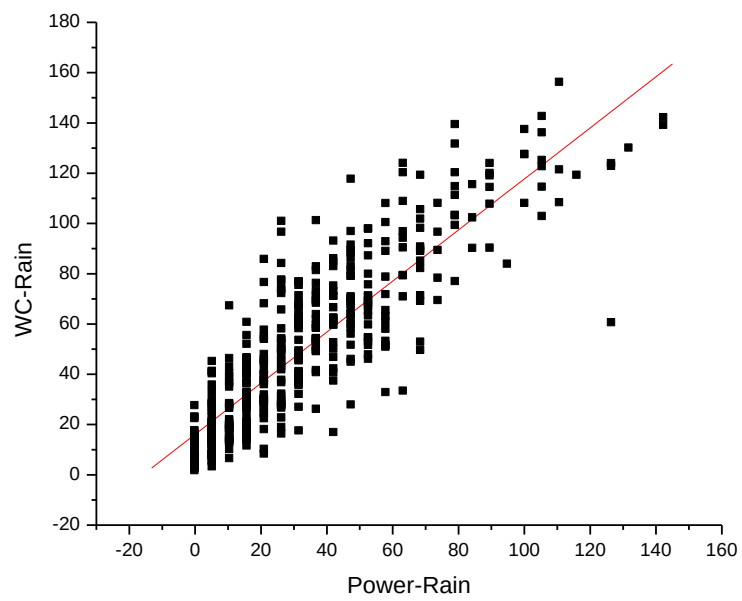
Το SNAP είναι μια ελεύθερη πλατφόρμα εφαρμογών της Ευρωπαϊκής Υπηρεσίας Διαστήματος (ESA) που αποτελεί μια συλλογή εκτελέσιμων εργαλείων και διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (API) που έχουν αναπτυχθεί για να διευκολύνουν τη χρήση, την προβολή και την επεξεργασία μιας ποικιλίας τηλεπισκοπικών δεδομένων (*NASA SeaDAS n.d.*).

Δεδομένου ότι τα δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσα το διάστημα 2000-2021, ήταν αναγκαίο να βρεθούν μετεωρολογικά δεδομένα μετά το 2018, στο οποίο το WorldClim σταματούσε. Γι' αυτό τον σκοπό χρησιμοποιήθηκε η παγκόσμια βάση δεδομένων POWER της NASA (*POWER | Data Access Viewer n.d.*), η οποία όμως έχει χωρική ανάλυση γεωγραφικού πλάτους/μήκους $\frac{1}{2}^{\circ} \times \frac{5}{8}^{\circ}$ που είναι χαμηλότερη σε σχέση με το WorldClim. Συνεπώς, συλλέχθηκαν δεδομένα για μετεωρολογικές παράμετρους για τις χρονιές 1981 ως 2021, καθώς το 2021 ήταν η τελευταία χρονιά για την οποία παρέχονταν δεδομένα.

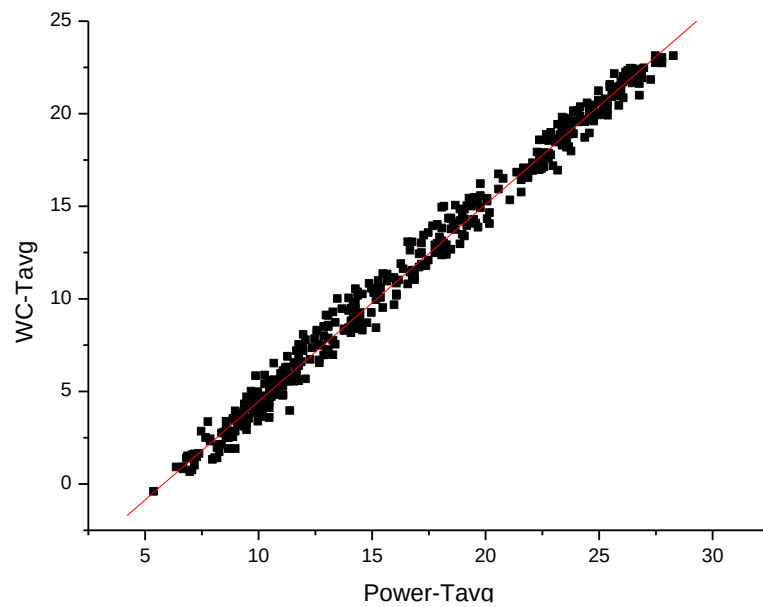
Έγινε σύγκριση των δεδομένων των δύο διαφορετικών πηγών ώστε να παρατηρηθεί αν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους. Εφόσον υπήρχε μεγάλη συσχέτιση, έγινε πρόβλεψη των τιμών που θα έδινε το WorldClim για τις χρονιές που δεν είχε δεδομένα, δηλαδή για το χρονικό διάστημα 2019-2021. Επιλέχθηκε το WorldClim γιατί αυτό έχει την καλύτερη χωρική ανάλυση.

Στα σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα συσχέτισης του WorldClim και του Power για την βροχή και την μέση θερμοκρασία στο Site 1. Οι τιμές συσχέτισης στο διάγραμμα WorldClim – Power για την βροχή είναι $R=0,868$ και $P<0,0001$, ενώ για την μέση θερμοκρασία είναι $R=0,995$ και $P<0,0001$.

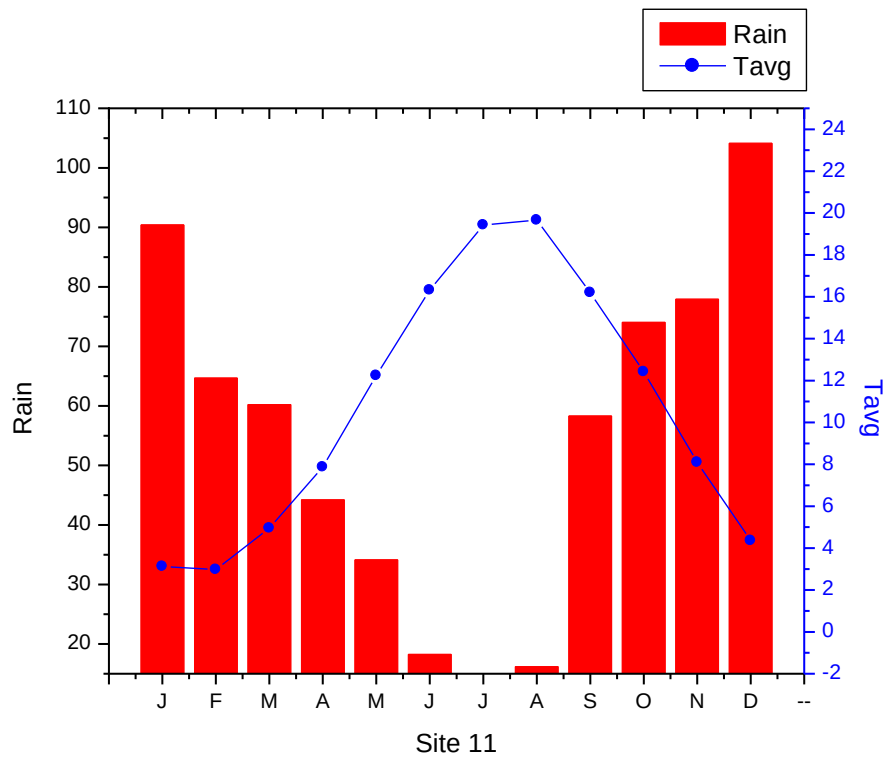
Στα σχήματα 6 και 7 παρουσιάζονται τα ομβροθερμικά διαγράμματα της πιο ξηρής (Site 8) και της πιο βροχερής (Site 14) περιοχής. Στο Παράρτημα παραθέτονται όλα τα διαγράμματα αναλυτικά για κάθε παράμετρο της κάθε περιοχής



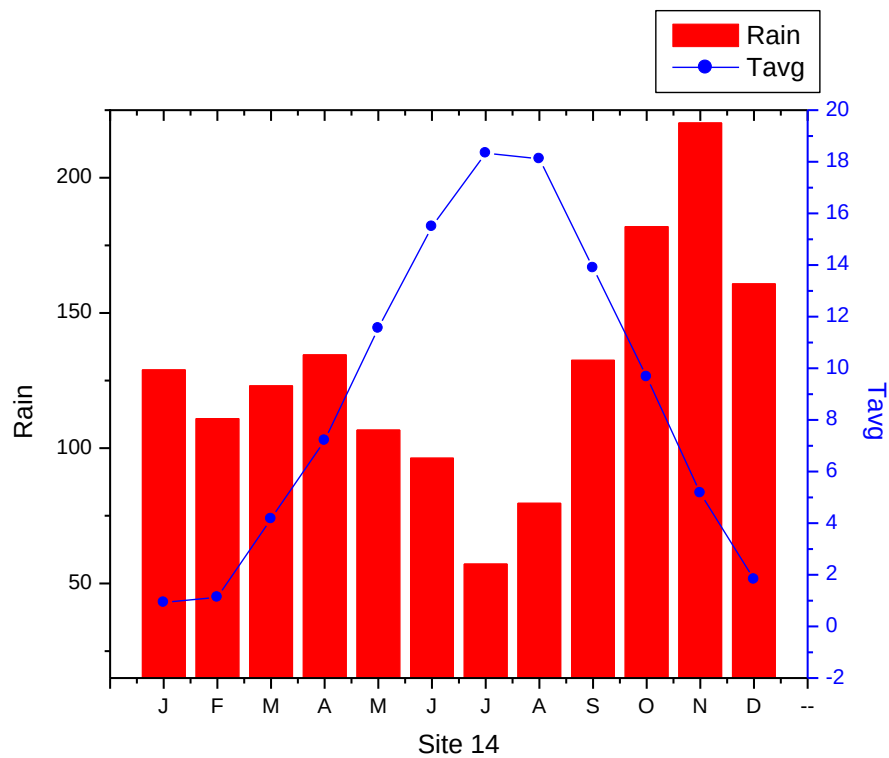
Σχήμα 4. Διάγραμμα συσχέτισης WorldClim- Power για την βροχή στο Site 1. ($R=0,868$ και $P<0,0001$)



Σχήμα 5. Διάγραμμα συσχέτισης WorldClim- Power για την μέση θερμοκρασία στο Site 1. ($R=0,995$ και $P<0,0001$)



Σχήμα 6. Ομβροθερμικό διάγραμμα της πιο ξηρής περιοχής (Site 11), με βάση την βροχόπτωση των καλοκαιρινών μηνών (Ιούνιο-Αύγουστο).



Σχήμα 7. Ομβροθερμικό διάγραμμα της πιο βροχερής περιοχής (Site 14), με βάση την βροχόπτωση των καλοκαιρινών μηνών (Ιούνιο-Αύγουστο).

2.6 Στατιστική

Ο συντελεστής συσχέτισης R ποσοτικοποιεί την ισχύ της γραμμικής σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών σε μια ανάλυση συσχέτισης και μετρά την κατεύθυνση σε ένα διάγραμμα διασποράς (*Correlation Coefficient* n.d.). Οι τιμές που παίρνει το R είναι από -1 ως +1. Αν $R=-1$ τότε, τα δεδομένα βρίσκονται σε μια απόλυτη ευθεία με αρνητική κλίση, άρα η συσχέτιση είναι αρνητική. Αν το $R=1$, τότε υπάρχει τέλεια ευθεία γραμμή με θετική κλίση και θετική συσχέτιση. Όμως αν το $R=0$, τότε δεν υπάρχει καμία γραμμική συσχέτιση. Ενδεικτικά, μικρή συσχέτιση θεωρούνται τιμές $R=0,1-0,3$, μεσαία συσχέτιση $R=0,3-0,5$ και μεγάλη συσχέτιση $R=0,5-1$ (*The Correlation Coefficient (r)* n.d.).

Η τιμή σημαντικότητας P, δείχνει αν το R είναι στατιστικώς σημαντικό ή όχι. Μια αποδεκτή τιμή P είναι $P<0,05$ (*'P-Value'* 2023, *P-Value* n.d.).

Τέλος, η τιμή B (slope) είναι η κλίση μιας γραμμής και η τομή της ονομάζεται Intercept σε μια απλή γραμμική παλινδρόμηση (Simple Linear Regression). Οι δύο αυτές τιμές ορίζουν την γραμμική σχέση δύο μεταβλητών και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση ενός μέσου ρυθμού μεταβολής. Όσο πιο μεγάλη είναι η κλίση τόσο μεγαλύτερος είναι και ο ρυθμός μεταβολής (*'Slope'* 2023, *Slope and Intercept of the Regression Line* n.d.).

Η απλή γραμμική παλινδρόμηση είναι μια προσέγγιση μοντελοποίησης της σχέσης μιας απλής εξαρτημένης μεταβλητής με μια ανεξάρτητη μεταβλητή μέσα από ένα σύνολο τιμών. Το απλό μαθηματικό μοντέλο είναι μια ευθεία γραμμή με την μορφή:

$$y = a + bx$$

Όπου, y = η προβλεπόμενη τιμή

a = η τομή (intercept)

b = η κλίση της ευθείας

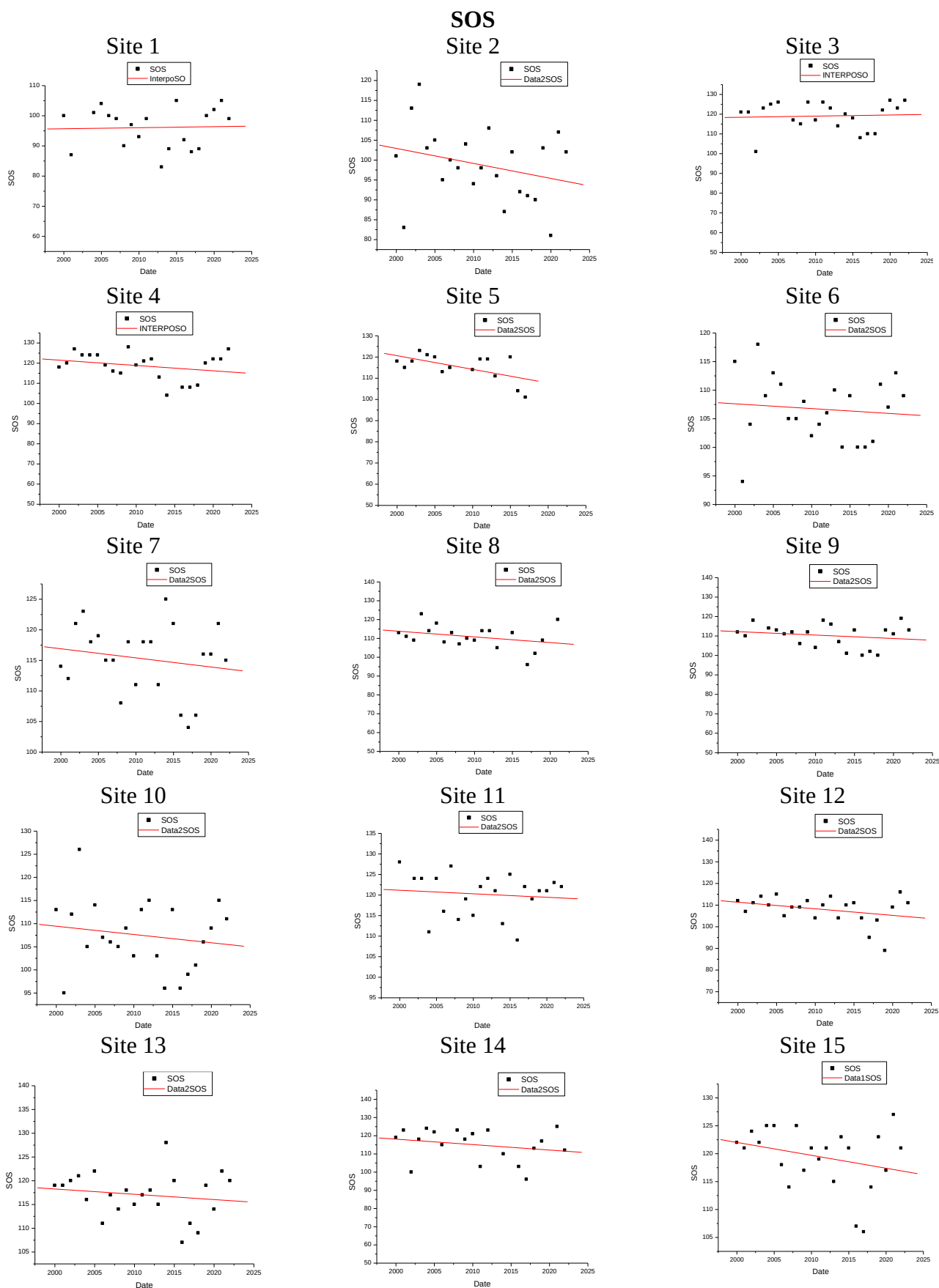
x = η τιμή για τη μεταβλητή πρόβλεψης

(*'Simple Linear Regression'* 2023, Zach 2021).

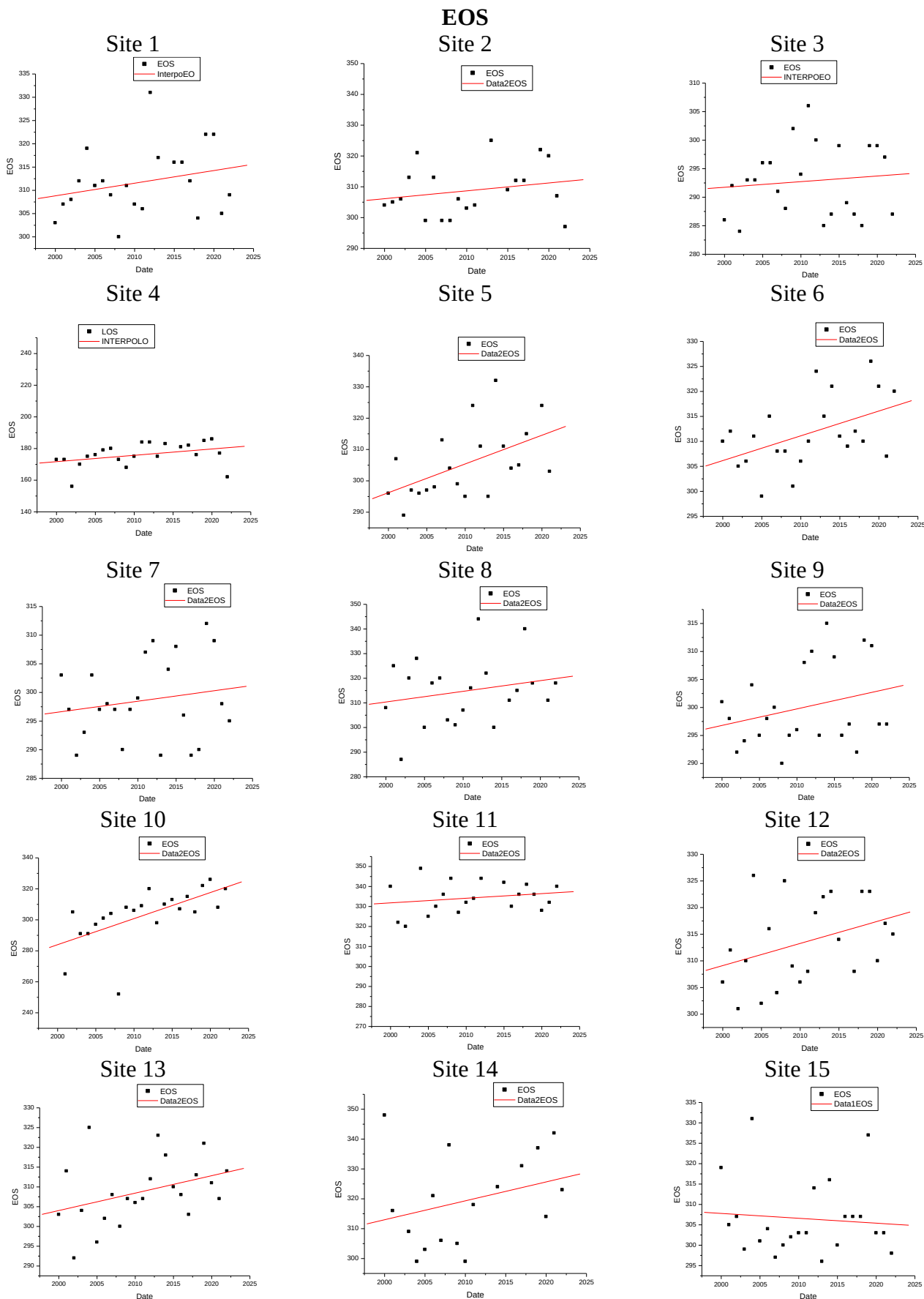
3. Αποτελέσματα

3.1 SOS-EOS-LOS

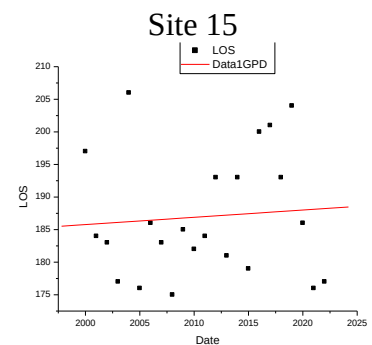
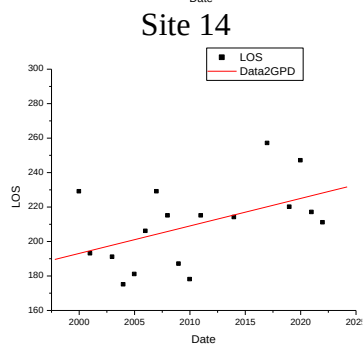
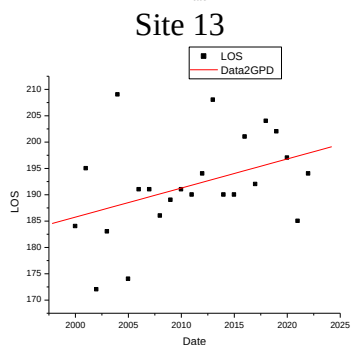
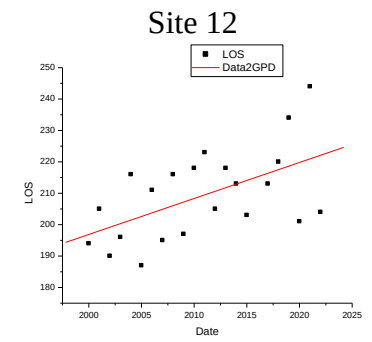
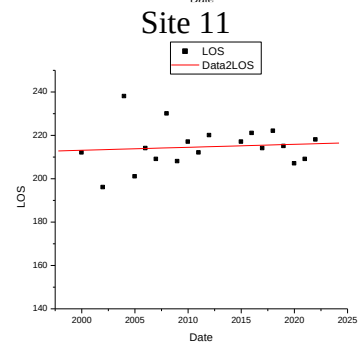
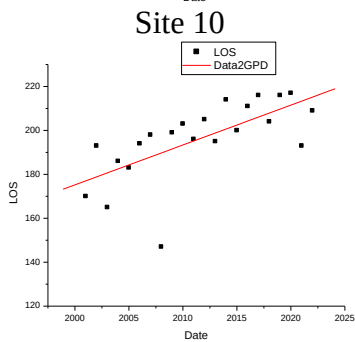
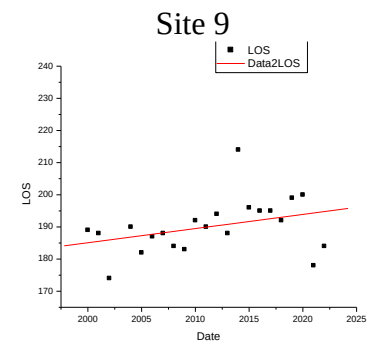
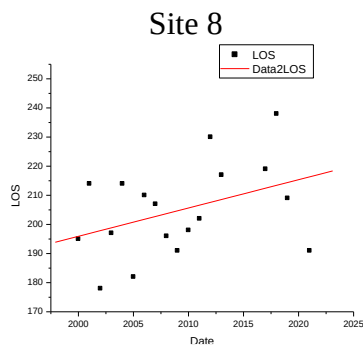
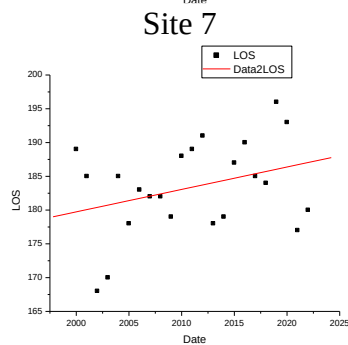
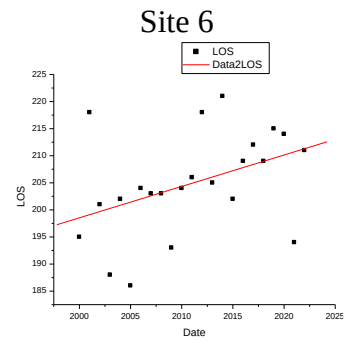
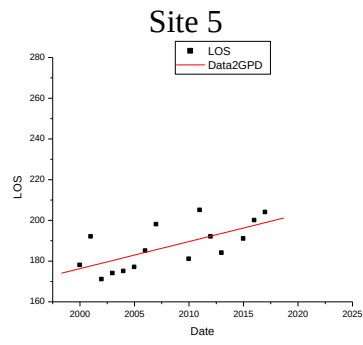
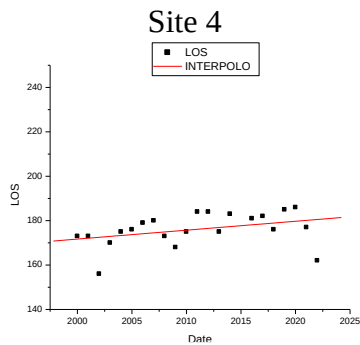
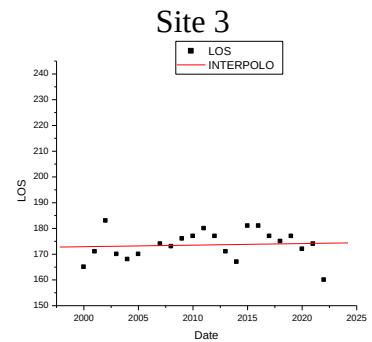
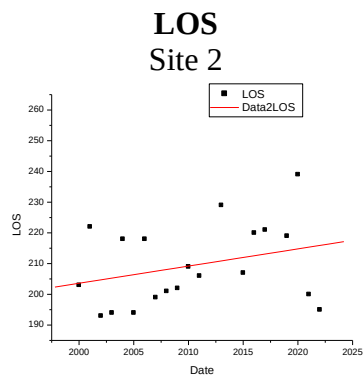
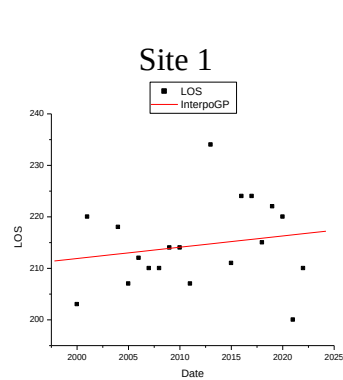
Στις επόμενες σελίδες (25-27) παρουσιάζονται τα διαγράμματα των παραμέτρων SOS, EOS και LOS για όλες τις περιοχές μελέτης.



Σχήμα 8. Φαινολογικά αποτελέσματα της έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου (SOS) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites).



Σχήμα 9. Φαινολογικά αποτελέσματα της λήξης της αναπτυξιακής περιόδου (EOS) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites).



Σχήμα 10. Φαινολογικά αποτελέσματα της διάρκειας της αναπτυξιακής περιόδου (LOS) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites).

3.2 Φαινολογία

Στους πίνακες 4-6 παρουσιάζονται τα φαινολογικά αποτελέσματα για τις 15 περιοχές μελέτης κατά αύξουσα σειρά γεωγραφικού πλάτους. Στους πίνακες αναγράφεται η κάθε περιοχή με το γεωγραφικό της πλάτος και το υψόμετρο. Στις επόμενες δύο στήλες επιγράφεται η ημερομηνία σε Date Of the Year, με ένα σφάλμα συν-πλην κάποιων ημερών για την κάθε φαινολογική παράμετρο. Στην επόμενη στήλη είναι οι ημερομηνίες της κάθε παραμέτρου (SOS, EOS, LOS) που υπολογίστηκαν προηγουμένως, ενώ στην στήλη MODIS είναι οι ημερομηνίες για τα φαινολογικά γεγονότα όπως παρέχονται από τη NASA. Οι τελευταίες τρεις στήλες αφορούν τις στατιστικές παραμέτρους.

Όσον αφορά την ημερομηνία έκπτυξης των φύλλων (Πίνακας 4) φαίνεται πως έχει αρνητική συσχέτιση με τον χρόνο. Δηλαδή, η έκπτυξη των φύλλων μετατοπίζεται νωρίτερα. Αυτό παρατηρείται σε όλες τις περιοχές εκτός των περιοχών 1 και 3 πως φαίνεται πως έχουν θετική συσχέτιση με τον χρόνο. Όμως, στατιστικά σημαντική συσχέτιση έχει μόνο η περιοχή 5.

Σχετικά με την πτώση των φύλλων, ισχύει το αντίθετο. Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5, υπάρχει θετική συσχέτιση με τον χρόνο και η πτώση των φύλλων μετατοπίζεται αργότερα στο έτος. Μόνο στην περιοχή 15 παρατηρείται αρνητική συσχέτιση. Και οι περιοχές 5,6 και 10 έχουν στατιστικά σημαντικές συσχετίσεις.

Τέλος, στον Πίνακα 6 παρουσιάζεται θετική συσχέτιση στην διάρκεια της περιόδου ανάπτυξης για όλες τις περιοχές μελέτης. Αν σε όλες τις περιοχές επιμηκύνεται η διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου, μόνο για τις περιοχές 5,6,10 και 12 η συσχέτιση είναι στατιστικά σημαντική.

Πίνακας 4. Φαινολογικά αποτελέσματα *Start of Season (SOS)* για τις περιοχές μελέτης (*SITE 1-15.*) *SOS:* η μέση ημερομηνία έκπτυξης των φύλλων όπως υπολογίστηκε στην παρούσα έρευνα, *MODIS:* οι ημερομηνίες όπως παρέχονται από την *NASA*, *R:* ο συντελεστής συσχέτισης, *P:* το επίπεδο σημαντικότητας, *B:* η μεταβολή στο χρόνο (ημέρες ανά έτος).

SITE	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο	SOS	MODIS	R	P	B
11	37,917229	1355	120±5	96±8	-0,110	0,627	-0,140
12	38,133378	1369	108±6	91±4	-0,328	0,125	-0,353
13	39,079034	1526	117±5	98±5	-0,160	0,464	-0,230
2	39,381215	953	99±9	79±10	-0,281	0,193	-0,209
1	39,47017	916	96±7	81±8	0,035	0,884	0,035
9	39,78333	1271	110±6	90±6	-0,204	0,361	-0,234
10	39,8473	869	107±7	86±8	-0,163	0,457	-0,149
7	40,18515	1270	115±6	90±6	-0,180	0,411	-0,216
8	40,333622	1156	111±6	96±7	-0,310	0,194	-0,320
3	40,667905	1364	119±7	99±6	0,056	0,804	0,055
4	40,74913	1317	119±7	97±7	-0,272	0,220	-0,279
5	40,913975	1286	115±6	90±9	-0,591	0,018	-0,543
6	41,00201	882	107±6	88±6	-0,100	0,649	-0,119
15	42,4909	1270	119±5	101±7	-0,289	0,181	-0,360
14	44,37609	1285	115±9	89±8	-0,238	0,325	-0,189

Πίνακας 5. Φαινολογικά αποτελέσματα *End of Season (EOS)*, παράμετροι όπως στον Πίνακα 4.

SITE	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο	EOS	MODIS	R	P	B
11	37,917229	1355	334±8	208±14	0,208	0,378	0,186
12	38,133378	1369	314±8	228±10	0,365	0,094	0,320
13	39,079034	1526	309±8	222±10	0,366	0,084	0,305
2	39,381215	953	309±8	212±4	0,217	0,356	0,185
1	39,47017	916	312±7	208±7	0,256	0,248	0,242
9	39,78333	1271	300±7	220±7	0,275	0,203	0,256
10	39,8473	869	303±17	200±7	0,632	0,001	0,237
7	40,18515	1270	299±7	211±11	0,175	0,425	0,167
8	40,333622	1156	315±13	219±9	0,218	0,341	0,110
3	40,667905	1364	293±6	220±8	0,108	0,625	0,117
4	40,74913	1317	295±7	217±7	0,148	0,499	0,142
5	40,913975	1286	305±11	213±9	0,519	0,015	0,294
6	41,00201	882	312±7	214±10	0,482	0,019	0,469
15	42,4909	1270	306±9	219±8	-0,089	0,688	-0,066

Πίνακας 6. Φαινολογικά αποτελέσματα Length of Season (LOS), παράμετροι όπως στον Πίνακα 4.

SITE	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο	LOS	MODIS	R	P	B
11	37,917229	1355	215±10	341±6	0,097	0,691	0,069
12	38,133378	1369	209±14	324±8	0,556	0,007	0,269
13	39,079034	1526	192±9	319±8	0,404	0,055	0,296
2	39,381215	953	209±13	316±5	0,303	0,193	0,164
1	39,47017	916	214±8	320±4	0,182	0,454	0,152
9	39,78333	1271	190±8	316±7	0,353	0,106	0,282
10	39,8473	869	196±18	314±7	0,670	0,001	0,247
7	40,18515	1270	183±7	311±5	0,330	0,123	0,327
8	40,333622	1156	205±16	316±7	0,397	0,101	0,162
3	40,667905	1364	174±6	308±6	0,074	0,743	0,090
4	40,74913	1317	176±7	309±6	0,370	0,089	0,341
5	40,913975	1286	187±11	307±7	0,672	0,005	0,340
6	41,00201	882	205±9	322±5	0,418	0,046	0,301
15	42,4909	1270	187±10	313±6	0,080	0,718	0,057

3.3 Συσχετίσεις

Για να εντοπιστεί τι επηρεάζει την αλλαγή στην φαινολογία της οξιάς, έγινε συσχέτιση των φαινολογικών παραμέτρων με τα μετεωρολογικά δεδομένα. Στους παρακάτω πίνακες (7-9) παρουσιάζεται για κάθε φαινολογική παράμετρο, η συσχέτιση με τις μετεωρολογικές παραμέτρους της βροχής, της ελάχιστης, μέγιστης και μέσης θερμοκρασίας. Σε κάθε μετεωρολογική παράμετρο αναφέρεται η τιμή της συσχέτισης (R) και της στατιστικής σημαντικότητας (P). Ακόμα, με ο όρος lag αναφέρεται στον αριθμό των μηνών που δεν συμπεριλαμβάνονται στους μήνες που οι κλιματικοί παράμετροι έχουν την μεγαλύτερη επίδραση. Ενώ με τον όρο nom προσδιορίζεται ο αριθμός των μηνών που λαμβάνονται υπόψη γιατί αυτοί οι μήνες έχουν κάποια σημαντική επιρροή. Θεωρείται ως μήνας αναφοράς για το SOS ο μήνας Μάιος, ενώ για το EOS και το LOS είναι ο μήνας Νοέμβριος. Για παράδειγμα, στον πίνακα 7 στην πρώτη περιοχή μελέτης όπου το lag είναι 0 και το nom 4 αφορά τους μήνες Μάιο και Ιανουάριο αντίστοιχα.

Συγκεκριμένα, σχετικά με την έκπτυξη των φύλλων (Πίνακας 7) η ελάχιστη θερμοκρασία έχει αρνητική συσχέτιση, δηλαδή με την ελάττωση της θερμοκρασίας η έκπτυξη των φύλλων γίνεται νωρίτερα. Εξαιρέση αποτελούν οι περιοχές 3 και 11. Όλες οι τιμές είναι στατιστικά σημαντικές. Το ίδιο συμβαίνει και με την μέγιστη θερμοκρασία αλλά και τη μέση θερμοκρασία. Με εξαιρέση τη περιοχή 13 στην μέγιστη θερμοκρασία και τη περιοχή 11 στη μέση. Οι μόνες τιμές που δεν είναι στατιστικά σημαντικές είναι στις περιοχές 7 και 12 στην μέση θερμοκρασία. Η βροχή παρουσιάζει θετική

συσχέτιση σε 7 περιοχές και αρνητική στις υπόλοιπες 8, με τιμές στατιστικά σημαντικές σε όλες τις περιοχές εκτός της περιοχή 3 στην οποία υπάρχει θετική συσχέτιση.

Στον πίνακα 8, που αφορά τις συσχετίσεις σχετικά με την πτώση των φύλλων, παρατηρείται θετική συσχέτιση με ελάχιστη και με μέγιστη θερμοκρασία με εξαίρεση πέντε περιοχές. Η μέση θερμοκρασία έχει αρνητική συσχέτιση με εξαίρεση τις περιοχές 3,4,7,8 και 14. Ενώ, η βροχή έχει στις μισές περιοχές θετική συσχέτιση και στις υπόλοιπες αρνητική, όπως και στην έκπτυξη των φύλλων. Όλες οι τιμές είναι στατιστικά σημαντικές.

Τέλος, στον πίνακα 9 παρουσιάζονται οι συσχετίσεις που αφορούν την διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου και παρατηρείται θετική συσχέτιση των θερμοκρασιών με λίγες εξαιρέσεις. Η βροχή έχει θετική συσχέτιση εκτός των περιοχών 4,6,13,14 και 15. Όλες οι τιμές είναι στατιστικά σημαντικές.

Συμπερασματικά, οι περισσότερες τιμές του $|R|$ είναι πάνω από 0,5 που σημαίνει πως η συσχέτιση είναι μεγάλη και οι τιμές του P είναι μικρότερες του 0,05 άρα η υπόθεση είναι πιθανή. Οι μετεωρολογικοί παράμετροι οι οποίοι έχουν την μεγαλύτερη επίδραση είναι η ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία που θα επικρατεί είτε τον προηγούμενο μήνα είτε περίπου 10 μήνες πριν. Παρατηρείται πως η βροχή δεν έχει τόσο σημαντική επιρροή.

Πίνακας 7. Φαινολογικές συσχετίσεις για την παράμετρο *Start of Season (SOS)* με τις κλιματικές παραμέτρους για τις περιοχές μελέτης (SITE 1-15.) R: ο συντελεστής συσχέτισης, P: το επίπεδο σημαντικότητας, lag: ο αριθμός των μηνών πριν από τον Μάιο που δεν συμπεριλαμβάνονται στους μήνες που επηρεάζουν περισσότερο, nom: ο αριθμός των μηνών των οποίων οι κλιματικοί παράγοντες έχουν σημαντική επιρροή στο φαινολογικό γεγονός.

			Tmin					Tmax			
SITE	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο	R	P	lag	nom	R	P	lag	nom	
1	39,47017	916	-0,725	0,000	0	4	-0,846	0,000	10	1	
2	39,381215	953	-0,725	0,000	2	2	-0,753	0,000	0	7	
3	40,667905	1364	0,626	0,002	5	2	-0,565	0,007	10	1	
4	40,74913	1317	-0,667	0,001	20	1	-0,604	0,003	1	2	
5	40,913975	1286	-0,694	0,003	3	1	-0,793	0,000	0	4	
6	41,00201	882	-0,637	0,001	0	5	-0,634	0,001	2	2	
7	40,18515	1270	-0,552	0,007	0	3	-0,715	0,000	1	2	
8	40,333622	1156	-0,715	0,000	1	3	-0,741	0,000	1	2	
9	39,78333	1271	-0,703	0,000	0	4	-0,668	0,001	1	2	
10	39,8473	869	-0,844	0,000	1	3	-0,802	0,000	1	3	
11	37,917229	1355	0,641	0,002	29	1	-0,616	0,003	10	1	
12	38,133378	1369	-0,733	0,000	7	7	-0,579	0,004	13	1	
13	39,079034	1526	-0,590	0,004	10	1	0,588	0,004	21	3	
14	44,37609	1285	-0,618	0,006	0	4	-0,511	0,029	10	1	
15	42,4909	1270	-0,589	0,004	10	1	-0,657	0,001	28	2	
			Tavg					Rain			
SITE	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο	R	P	lag	nom	R	P	lag	nom	
1	39,47017	916	-0,821	0,000	1	2	0,569	0,010	10	9	
2	39,381215	953	-0,693	0,000	1	6	-0,594	0,003	26	2	
3	40,667905	1364	-0,598	0,004	3	1	0,393	0,077	4	4	
4	40,74913	1317	-0,485	0,025	3	1	-0,568	0,007	14	2	
5	40,913975	1286	-0,750	0,001	0	4	0,681	0,004	5	1	
6	41,00201	882	-0,557	0,007	3	1	-0,670	0,001	26	1	
7	40,18515	1270	-0,363	0,095	27	1	-0,741	0,000	26	1	
8	40,333622	1156	-0,461	0,045	13	1	-0,652	0,002	26	1	
9	39,78333	1271	-0,491	0,023	3	1	-0,572	0,006	25	3	
10	39,8473	869	-0,436	0,041	3	1	0,684	0,000	5	1	
11	37,917229	1355	0,628	0,002	29	1	-0,445	0,042	6	12	
12	38,133378	1369	-0,377	0,083	27	1	0,536	0,010	5	2	
13	39,079034	1526	-0,535	0,010	27	1	-0,650	0,001	26	1	
14	44,37609	1285	-0,484	0,040	3	1	0,511	0,029	5	1	
15	42,4909	1270	-0,609	0,002	28	2	0,721	0,000	1	1	

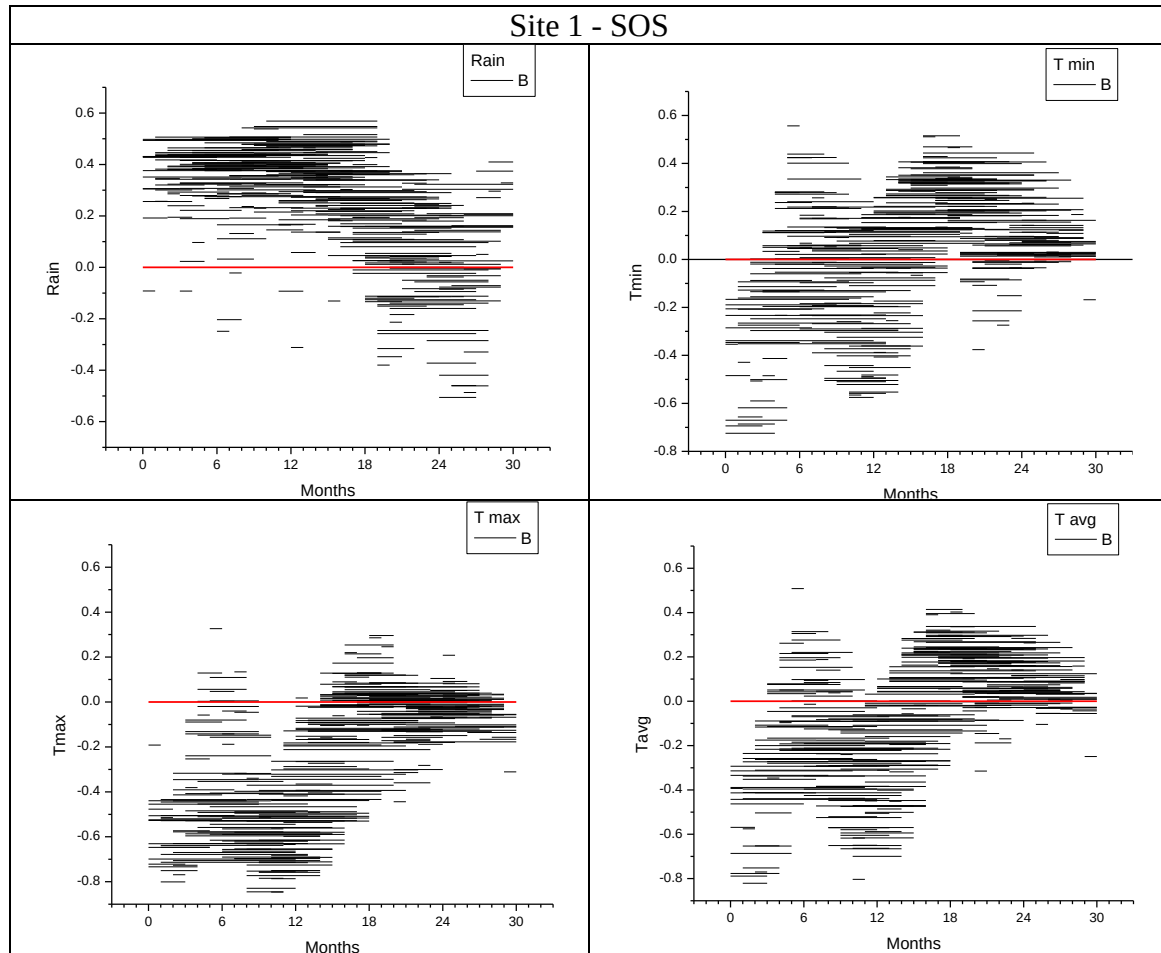
Πίνακας 8. Φαινολογικές συσχετίσεις για την παράμετρο End of Season (EOS), *R*: ο συντελεστής συσχέτισης, *P*: το επίπεδο σημαντικότητας, *lag*: ο αριθμός των μηνών πριν από τον Νοέμβριο που δεν συμπεριλαμβάνονται στους μήνες που επηρεάζουν περισσότερο, *nom*: ο αριθμός των μηνών των οποίων οι κλιματικοί παράγοντες έχουν σημαντική επιρροή στο φαινολογικό γεγονός.

			Tmin					Tmax			
SITE	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο	R	P	lag	nom	R	P	lag	nom	
1	39,47017	916	0,682	0,001	1	2	0,600	0,004	1	1	
2	39,381215	953	0,630	0,003	12	7	0,540	0,016	26	1	
3	40,667905	1364	-0,562	0,006	5	4	-0,675	0,000	5	5	
4	40,74913	1317	-0,565	0,006	5	2	-0,705	0,000	5	6	
5	40,913975	1286	0,627	0,002	25	4	0,496	0,021	10	2	
6	41,00201	882	0,676	0,000	1	3	0,664	0,001	1	2	
7	40,18515	1270	-0,592	0,003	5	2	-0,605	0,003	16	1	
8	40,333622	1156	0,654	0,002	1	6	0,819	0,000	1	3	
9	39,78333	1271	-0,601	0,003	4	3	0,563	0,006	22	7	
10	39,8473	869	0,667	0,001	14	1	-0,494	0,022	16	2	
11	37,917229	1355	0,462	0,045	16	2	-0,613	0,005	26	2	
12	38,133378	1369	0,605	0,003	1	2	0,678	0,001	1	1	
13	39,079034	1526	0,671	0,001	12	7	0,729	0,000	11	9	
14	44,37609	1285	0,602	0,012	1	9	0,580	0,017	9	1	
15	42,4909	1270	-0,626	0,002	6	1	0,602	0,003	14	2	
			Tavg					Rain			
SITE	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο	R	P	lag	nom	R	P	lag	nom	
1	39,47017	916	0,679	0,001	1	2	0,532	0,012	6	5	
2	39,381215	953	0,610	0,005	1	2	0,679	0,001	10	1	
3	40,667905	1364	-0,516	0,013	9	1	-0,432	0,043	4	1	
4	40,74913	1317	-0,657	0,001	9	1	-0,447	0,036	4	2	
5	40,913975	1286	0,530	0,013	2	1	0,608	0,003	21	1	
6	41,00201	882	0,658	0,001	14	1	0,652	0,001	21	1	
7	40,18515	1270	-0,609	0,002	16	1	0,664	0,001	21	4	
8	40,333622	1156	-0,465	0,037	20	3	-0,608	0,004	1	4	
9	39,78333	1271	0,621	0,002	22	7	0,666	0,001	21	1	
10	39,8473	869	0,524	0,014	14	1	0,599	0,004	0	2	
11	37,917229	1355	0,622	0,004	17	1	-0,614	0,005	3	1	
12	38,133378	1369	0,606	0,003	14	4	-0,558	0,008	1	7	
13	39,079034	1526	0,763	0,000	11	9	-0,655	0,001	16	4	
14	44,37609	1285	-0,505	0,044	12	1	-0,808	0,000	11	1	
15	42,4909	1270	0,581	0,004	14	2	0,453	0,033	7	1	

Πίνακας 9. Φαινολογικές συσχετίσεις για την παράμετρο *Length of Season (LOS)*, παράμετροι όπως στον Πίνακα 8.

			Tmin					Tmax			
SITE	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο	R	P	lag	nom	R	P	lag	nom	
1	39,47017	916	0,631	0,004	8	2	0,676	0,002	26	1	
2	39,381215	953	0,631	0,003	8	12	0,737	0,000	1	3	
3	40,667905	1364	0,652	0,001	20	4	0,631	0,002	20	4	
4	40,74913	1317	0,559	0,008	26	3	-0,539	0,011	20	1	
5	40,913975	1286	0,622	0,012	2	3	0,700	0,003	2	3	
6	41,00201	882	0,693	0,000	7	2	0,763	0,000	8	1	
7	40,18515	1270	0,568	0,005	1	3	0,581	0,004	11	1	
8	40,333622	1156	0,688	0,001	1	8	0,825	0,000	1	3	
9	39,78333	1271	0,558	0,008	26	4	0,632	0,002	25	3	
10	39,8473	869	0,661	0,001	14	1	0,521	0,015	14	1	
11	37,917229	1355	0,658	0,003	16	2	0,761	0,000	16	2	
12	38,133378	1369	0,714	0,000	2	1	-0,647	0,001	5	2	
13	39,079034	1526	0,801	0,000	14	4	0,739	0,000	14	6	
14	44,37609	1285	0,821	0,000	4	6	0,794	0,000	5	5	
15	42,4909	1270	0,707	0,000	14	5	0,701	0,000	14	3	
			Tavg					Rain			
SITE	Γεωγραφικό πλάτος	Υψόμετρο	R	P	lag	nom	R	P	lag	nom	
1	39,47017	916	0,713	0,001	26	1	0,546	0,018	15	1	
2	39,381215	953	0,617	0,004	1	3	0,583	0,008	21	1	
3	40,667905	1364	0,702	0,000	20	4	0,650	0,001	29	1	
4	40,74913	1317	0,530	0,013	14	1	-0,738	0,000	19	1	
5	40,913975	1286	0,711	0,002	2	3	0,694	0,003	20	2	
6	41,00201	882	0,717	0,000	23	4	-0,641	0,001	19	1	
7	40,18515	1270	-0,468	0,027	6	1	0,741	0,000	20	6	
8	40,333622	1156	0,510	0,029	14	1	0,630	0,005	5	2	
9	39,78333	1271	0,660	0,001	25	3	0,659	0,001	20	2	
10	39,8473	869	0,605	0,003	14	1	0,627	0,002	20	3	
11	37,917229	1355	0,760	0,000	16	2	0,574	0,012	27	2	
12	38,133378	1369	0,659	0,001	14	6	0,581	0,005	21	1	
13	39,079034	1526	0,780	0,000	14	4	-0,672	0,001	16	4	
14	44,37609	1285	0,541	0,028	28	1	-0,681	0,003	19	1	
15	42,4909	1270	0,706	0,000	14	3	-0,604	0,003	18	2	

Αυτά τα δεδομένα τοποθετήθηκαν σε διαγράμματα για την καλύτερη ανάλυση τους. Στα επόμενα διαγράμματα απεικονίζονται τα δεδομένα για το SOS της 1^{ης} περιοχής μελέτης σε συσχέτιση με τις μετεωρολογικές παραμέτρους. Όλα τα υπόλοιπα διαγράμματα παρουσιάζονται στο παράρτημα.



Σχήμα 11. Διαγράμματα συσχέτισης της έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου (SOS) με μετεωρολογικές παραμέτρους: Βροχόπτωση, Ελάχιστη, Μέγιστη και Μέση θερμοκρασία (Rain, Tmin, Tmax, Tavg) για την πρώτη ερευνητική περιοχή (Site 1).

4. Συζήτηση

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν τα συστήματα τηλεπισκόπησης και τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (GIS) για την μελέτη των φαινολογικών διεργασιών της οξιάς (*Fagus sylvatica*) και αν αυτά έχουν επηρεαστεί από την κλιματική αλλαγή. Τα αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν συμφωνούν με άλλες ερευνητικές μελέτες, όπως αυτή των Urhus (2021) όπου βρήκαν αρνητική συσχέτιση με την έναρξη της περιόδου (SOS). Επιπλέον, επισήμαναν πως η σύγχρονη κλιματική αλλαγή οδηγεί σε πρώιμα ανοιξιάτικα φαινολογικά γεγονότα στην Ευρώπη (Urhus et al. 2021, Lukasová et al. 2019).

Υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για την παρακολούθηση της φαινολογίας των δέντρων, γιατί αποτελεί ένα χαρακτηριστικό που συνδέεται άμεσα με τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής (Proietti et al. 2020).

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας ταυτίζονται με τα αποτελέσματα των Varlamova & Solovyev (2020) όπου μελέτησαν τις φαινολογικές μεταβολές φυλλοβόλων δασών με βελονοειδή φύλλα στην Σιβηρία με ανάλυση χρονοσειρών NDVI από δεδομένα χρονικής διάρκειας 1982-2015. Απέδειξαν την αύξηση της διάρκειας της αναπτυξιακής περιόδου και πως αυτή οφείλεται στην προγενέστερη έναρξη και το μεταγενέστερο τέλος της περιόδου. Ταυτόχρονα, για το ίδιο χρονικό διάστημα, υπάρχει σημαντική αύξηση ($\sim 1,7^{\circ}\text{C}/\pm 0,8$) της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας του αέρα στην υπαρκτική ζώνη, αλλά η τάση της θερμοκρασίας στην εύκρατη ζώνη είναι αμελητέα (Varlamova & Solovyev 2020).

Σε μια αντίστοιχη μελέτη των Wu & Liu (2013) στην Κίνα για την περίοδο 1928-2006 έδωσαν πάλι αρνητικές συσχετίσεις της έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου με τον χρόνο. Επίσης, απέδειξαν πως οι μεταβολές της θερμοκρασίας της άνοιξης (Φεβρουάριος-Απρίλιος) είναι ο κυρίαρχος παράγοντας που διέπει το πρότυπο της φαινολογίας της ανοιξιάτικης βλάστησης στα εύκρατα οικοσυστήματα της Κίνας.

Στην Τουρκία επίσης σε έρευνα για το φυτό *Fagus orientalis* (2002-2020) τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι πιο σημαντικές συσχετίσεις βρέθηκαν μεταξύ της μέσης τάσης SOS και των θερμοκρασιών της άνοιξης (Φεβρουάριος-Μάρτιος) (Şenel et al. 2023).

Πέρα από αυτές τις αναφορές στην ανοιξιάτικη θερμοκρασία και πως αυτή επηρεάζει τους φυσιολογικούς μηχανισμούς, η εξέλιξη της ανοιξιάτικης φυσιολογίας δεν είναι ακόμα απόλυτα κατανοητή. Στην έρευνα των Gu et al. (2022) διερευνήθηκε η επίδραση της θερμοκρασίας κατά την προηγούμενη αναπτυξιακή περίοδο στην ανοιξιάτικη φαινολογία του τρέχοντος έτους με βάση την έναρξη της περιόδου με δεδομένα της χρονολογικής περιόδου 1951-2018. Τα αποτελέσματα υπέδειξαν πως οι θερμότερες θερμοκρασίες της προηγούμενης αναπτυξιακής περιόδου συνδέονται με την πρωιμότερη εαρινή φαινολογία του τρέχοντος έτους στα εύκρατα και βόρεια δάση (Gu et al. 2022).

Αλλά και οι βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια του Νοεμβρίου-Ιανουαρίου μπορούν να εξηγήσουν το 16,1% ($P < 0,05$) των διακυμάνσεων στα εύκρατα φυλλοβόλα δάση

(TDF) αναδεικνύοντας τον σημαντικό ρόλο των χειμερινών βροχοπτώσεων στη ρύθμιση των μεταβολών της εαρινής φαινολογίας της βλάστησης των βιοτόπων με περιορισμένο νερό (Wu & Liu 2013).

Γενικότερα, δεν υπάρχει μεγάλη βιβλιογραφία που αφορά αυτό το κομμάτι και είναι η τελευταία δεκαετία αυτή στην οποία βρέθηκαν στο επίκεντρο της έρευνας προσεγγίσεις που σχετίζονται με την τηλεπισκόπηση.

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι ενθαρρυντικά και αποτελούν σημαντικά δεδομένα για την κλιματική αλλαγή και δίνουν κίνητρο για μελλοντικές έρευνες. Οι Ciglič & Oštir (2014) παρουσίασαν μια σημαντική συσχέτιση της έναρξης της αύξησης του πράσινου (SOS) με το υψόμετρο της περιοχής. Αυτό δίνει την ελπίδα ότι σε μελλοντικές έρευνες θα μπορούν να συνδυαστούν διάφοροι παράμετροι που έχουν δώσει σημαντικά στατιστικά αποτελέσματα για μια πιο εξειδικευμένη μελέτη σχετικά με την κλιματική αλλαγή. Αλλά και με την ανακάλυψη των χρήσεων της τηλεπισκόπησης και πως αυτές μπορούν να αξιοποιηθούν.

5. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, συμπεραίνεται πως υπάρχει αλλαγή στα φαινολογικά χαρακτηριστικά της οξιάς με την πάροδο του χρόνου και οι κλιματικές παράμετροι φαίνεται πως έχουν επιρροή σε αυτές τις αλλαγές.

- Η έναρξη της έκπτυξης των φύλλων μετατοπίζεται όλο και πιο νωρίτερα.
- Η πτώση των φύλλων και η λήξη της αναπτυξιακής περιόδου του φυτού μετατοπίζεται αργότερα μέσα στο έτος.
- Επομένως η διάρκεια της αναπτυξιακής περιόδου της Ευρωπαϊκής οξιάς παρατείνεται.

Η μετατόπιση αυτών των φαινομένων επηρεάζεται από τις μετεωρολογικές συνθήκες.

- Οι θερμοκρασίες της άνοιξης και του φθινοπώρου έχουν μεγάλη επίδραση στην φαινολογία.
- Η βροχόπτωση επηρεάζει λιγότερο και δεν φαίνεται να ακολουθεί κάποιο μοτίβο συσχέτισης.

Βιβλιογραφία

- Augspurger, C. K. (2013). Reconstructing patterns of temperature, phenology, and frost damage over 124 years: Spring damage risk is increasing. *Ecology*, 94(1), 41–50. <https://doi.org/10.1890/12-0200.1>
- Correlation Coefficient*. (n.d.). Retrieved 13 May 2023, from https://www.jmp.com/en_hk/statistics-knowledge-portal/what-is-correlation/correlation-coefficient.html
- Durrant, T., de Rigo, D., & Caudullo, G. (2016). *Fagus sylvatica in Europe: Distribution, habitat, usage and threats*.
- Fagus sylvatica European beech*. (n.d.). <https://www.euforgen.org/species/fagus-sylvatica/>
- Ghosh, P., Kumpatla, S. P., Ghosh, P., & Kumpatla, S. P. (2022). GIS Applications in Agriculture. In *Geographic Information Systems and Applications in Coastal Studies*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.104786>
- Global climate and weather data—WorldClim 1 documentation*. (n.d.). Retrieved 12 May 2023, from <https://www.worldclim.org/data/index.html#>
- Gu, H., Qiao, Y., Xi, Z., Rossi, S., Smith, N. G., Liu, J., & Chen, L. (2022). Warming-induced increase in carbon uptake is linked to earlier spring phenology in temperate and boreal forests. *Nature Communications*, 13(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31496-w>
- Home – Climate Change: Vital Signs of the Planet*. (n.d.). Retrieved 12 May 2023, from <https://climate.nasa.gov/>
- How space data are transforming the global food system—Earth Online*. (n.d.). Retrieved 12 May 2023, from <https://earth.esa.int/eogateway/news/how-space-data-are-transforming-the-global-food-system>

- Jensen, J. R. (2007). *ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Μια προοπτική για τα φυσικά διαθέσιμα*. Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- Khanal, S., Kc, K., Fulton, J. P., Shearer, S., & Ozkan, E. (2020). Remote Sensing in Agriculture—Accomplishments, Limitations, and Opportunities. *Remote Sensing*, 12(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/rs12223783>
- LP DAAC - MODIS Overview. (n.d.). Retrieved 12 May 2023, from <https://lpdaac.usgs.gov/data/get-started-data/collection-overview/mis-sions/modis-overview/>
- Lukasová, V., Bucha, T., Škvareninová, J., & Škvarenina, J. (2019). Validation and application of European beech phenological metrics derived from MODIS data along an altitudinal gradient. *Forests*, 10(1). Scopus. <https://doi.org/10.3390/f10010060>
- May, S. (2015, June 16). *What Is a Satellite?* NASA; Brian Dunbar. <http://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-satellite-58.html>
- MODIS Land Team Home Page. (n.d.). Retrieved 12 May 2023, from <https://modis-land.gsfc.nasa.gov/index.html>
- MODIS Web. (n.d.). Retrieved 12 May 2023, from <https://modis.gsfc.nasa.gov/>
- NASA SeaDAS. (n.d.). Retrieved 12 May 2023, from <https://seadas.gsfc.nasa.gov/installers/snap-seadas-toolbox/>
- NDVI FAQs: Frequently Asked Questions About The Index. (2019, August 30). <https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/>
- ORNL DAAC. (2018). *MODIS and VIIRS Land Products Global Subsetting and Visualization Tool*. 0.000116 MB. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1379>

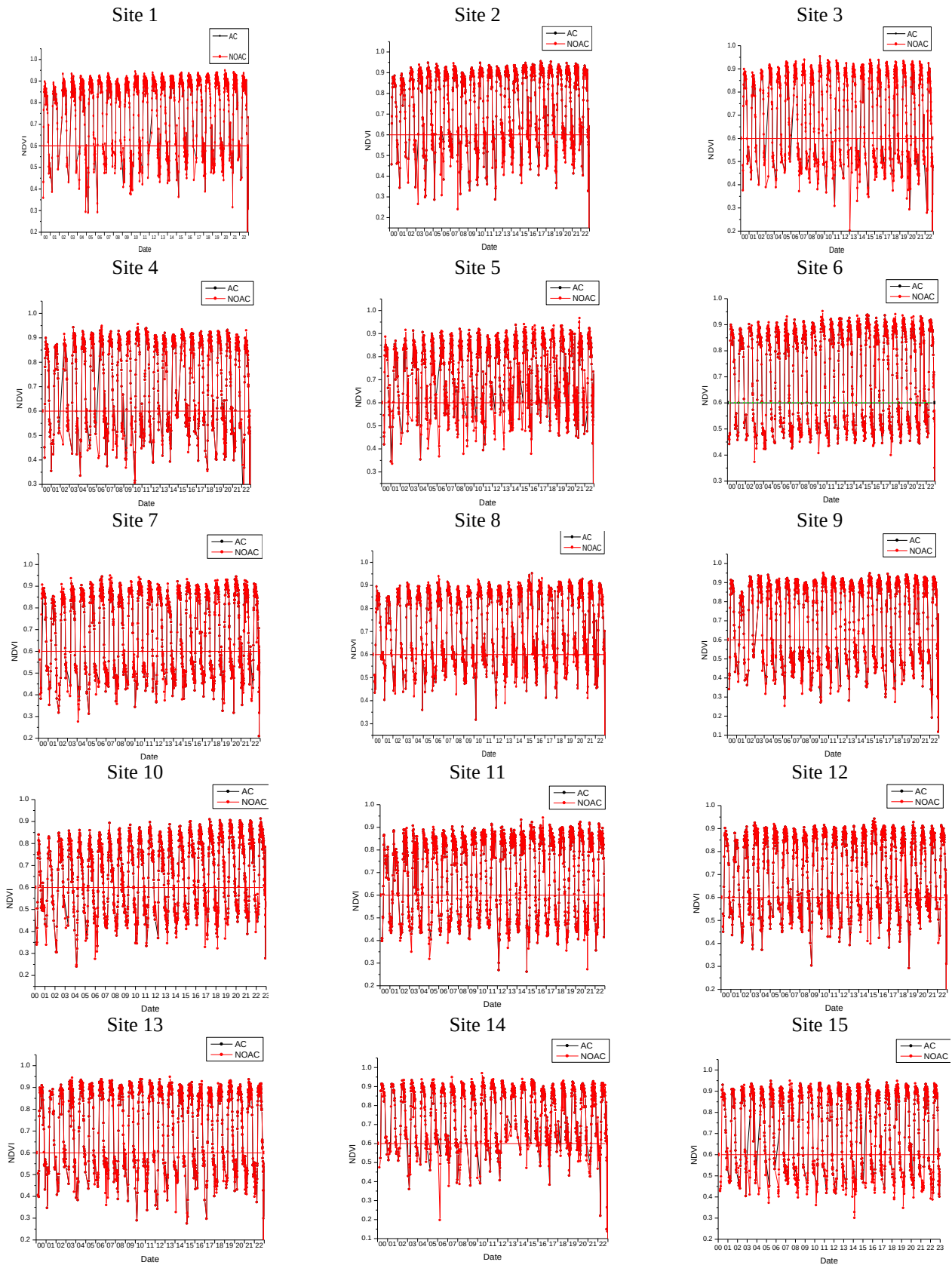
- Packham, J. R., Thomas, P. A., Atkinson, M. D., & Degen, T. (2012). Biological Flora of the British Isles: *Fagus sylvatica*. *Journal of Ecology*, 100(6), 1557–1608. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2012.02017.x>
- Peddle, D., White, H. P., Soffer, R., Miller, J., & LeDrew, E. (2001). Reflectance processing of remote sensing spectroradiometer data. *Computers & Geosciences*, 27, 203–213. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00096-0](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00096-0)
- POWER | Data Access Viewer. (n.d.). Retrieved 12 May 2023, from <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Proietti, R., Antonucci, S., Monteverdi, M. C., Garfi, V., Marchetti, M., Plutino, M., Di Carlo, M., Germani, A., Santopuoli, G., Castaldi, C., & Chiavetta, U. (2020). Monitoring spring phenology in Mediterranean beech populations through in situ observation and Synthetic Aperture Radar methods. *Remote Sensing of Environment*, 248. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111978>
- P-value. (2023). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=P-value&oldid=1154281265>
- P-Value: What It Is, How to Calculate It, and Why It Matters. (n.d.). Investopedia. Retrieved 13 May 2023, from <https://www.investopedia.com/terms/p/p-value.asp>
- Rustamov, R. B., Hasanova, S., Zeynalova, M. H., Zhu, L., Suomalainen, J., Liu, J., Hyypä, J., Kaartinen, H., & Haggren, H. (2018). Multi-purposeful Application of Geospatial Data. In *Multi-purposeful Application of Geospatial Data*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69713>
- Schuldt, B., Buras, A., Arend, M., Vitasse, Y., Beierkuhnlein, C., Damm, A., Gharun, M., Grams, T. E. E., Hauck, M., Hajek, P., Hartmann, H., Hiltbrunner, E., Hoch, G., Holloway-Phillips, M., Körner, C., Larysch, E., Lübke, T., Nelson, D. B., Rammig, A., ... Kahmen, A. (2020). A first assessment of the impact of the

- extreme 2018 summer drought on Central European forests. *Basic and Applied Ecology*, 45, 86–103. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2020.04.003>
- Şenel, T., Kanmaz, O., Bektas Balcik, F., Avcı, M., & Dalfes, H. N. (2023). Assessing Phenological Shifts of Deciduous Forests in Turkey under Climate Change: An Assessment for *Fagus orientalis* with Daily MODIS Data for 19 Years. *Forests*, 14(2). Scopus. <https://doi.org/10.3390/f14020413>
- Simple linear regression. (2023). In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Simple_linear_regression&oldid=1132540404
- Sishodia, R., Ray, R., & Singh, S. (2020). Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture: A Review. *Remote Sensing*, 12, 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Slope. (2023). In *Wikipedia*. <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Slope&oldid=1154354050>
- Slope and intercept of the regression line*. (n.d.). [Mtbconcept]. Retrieved 13 May 2023, from <https://support.minitab.com/en-us/minitab/21/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/supporting-topics/basics/slope-and-intercept-of-the-regression-line/>
- The Correlation Coefficient (r)*. (n.d.). Retrieved 13 May 2023, from <https://sphweb.bumc.bu.edu/otlt/MPH-Modules/PH717-QuantCore/PH717-Module9-Correlation-Regression/PH717-Module9-Correlation-Regression4.html>
- Tonelli, E., Vitali, A., Malandra, F., Camarero, J. J., Colangelo, M., Nolè, A., Ripullone, F., Carrer, M., & Urbinati, C. (2023). Tree-ring and remote sensing analyses uncover the role played by elevation on European beech sensitivity to

- late spring frost. *Science of The Total Environment*, 857, 159239.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159239>
- Upfus, L., Lüpke, M., Yuan, Y., Benjamin, C., Englmeier, J., Fricke, U., Ganuza, C., Schwindl, M., Uhler, J., & Menzel, A. (2021). Climate effects on vertical forest phenology of *fagus sylvatica* l., sensed by sentinel-2, time lapse camera, and visual ground observations. *Remote Sensing*, 13(19). Scopus.
<https://doi.org/10.3390/rs13193982>
- Varlamova, E. V., & Solovyev, V. S. (2020). *Study of the long-term phenology changes of boreal forests in Siberia on satellite data*. 11560. Scopus.
<https://doi.org/10.1117/12.2575563>
- Vitasse, Y., Porté, A. J., Kremer, A., Michalet, R., & Delzon, S. (2009). Responses of canopy duration to temperature changes in four temperate tree species: Relative contributions of spring and autumn leaf phenology. *Oecologia*, 161(1), 187–198. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1363-4>
- Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020). *Remote sensing for agricultural applications: A meta-review—ScienceDirect*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425719304213>
- What is Remote Sensing? | Earthdata*. (n.d.). Retrieved 12 May 2023, from <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing#sensors>
- Wu, X., & Liu, H. (2013). Consistent shifts in spring vegetation green-up date across temperate biomes in China, 1982-2006. *Global Change Biology*, 19(3), 870–880. Scopus. <https://doi.org/10.1111/gcb.12086>
- Zach. (2021, June 22). How to Interpret the Intercept in a Regression Model (With Examples). *Statology*. <https://www.statology.org/intercept-in-regression/>

- Zhang, F., & Cao, N. (2019). *Application and Research Progress of Geographic Information System (GIS) in Agriculture*. 1–5. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics.2019.8820476>
- Καρτάλης, Κ., & Φείδας, Χ. (2013). *ΑΡΧΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗΣ ΤΗ-ΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ*. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
- Κοράκης, Γ. (2015). *Δασική βοτανική: Αυτοφυή δένδρα και θάμνοι της Ελλάδας*. Κάλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://www.openbook.gr/dasiki-votaniki/>

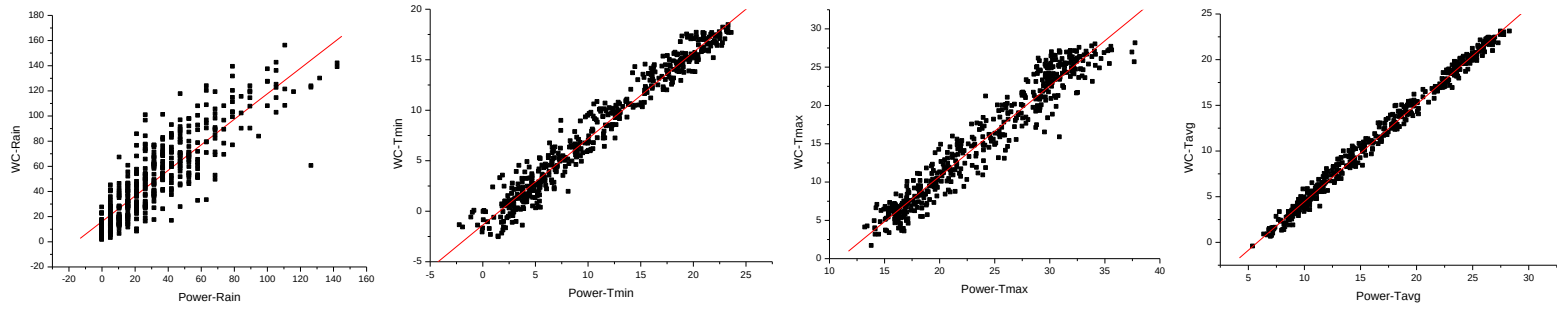
Παράρτημα Χρονοσειρές NDVI



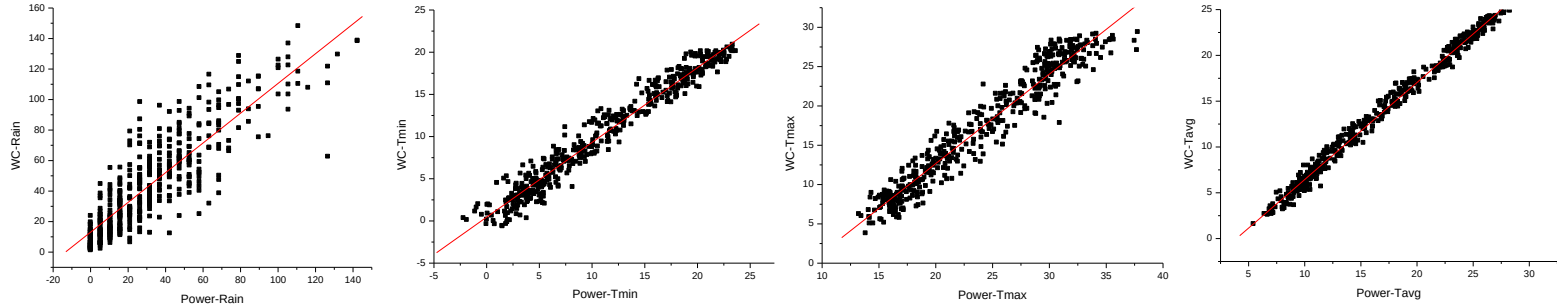
Σχήμα 12. Χρονοσειρές NDVI για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites 1-15).

Διαγράμματα συσχέτισης WorldClim – Power

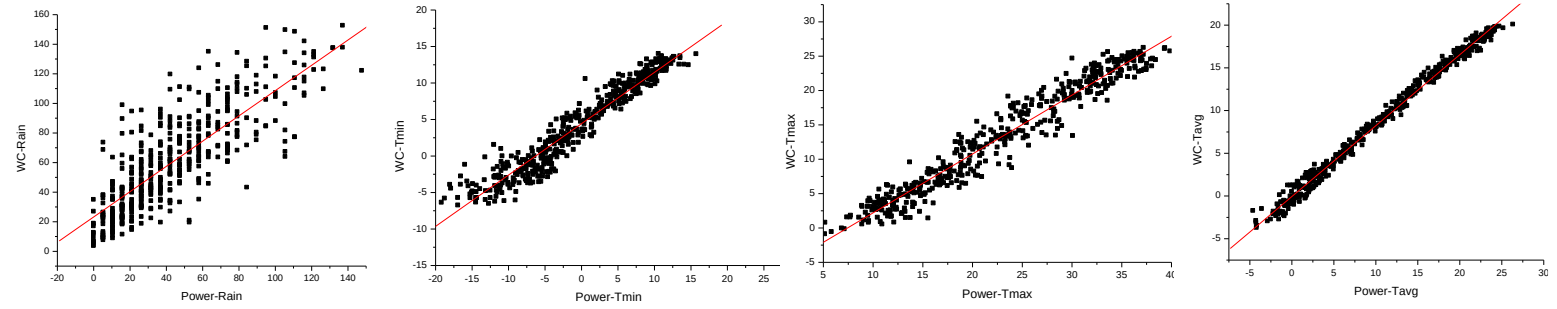
Site 1



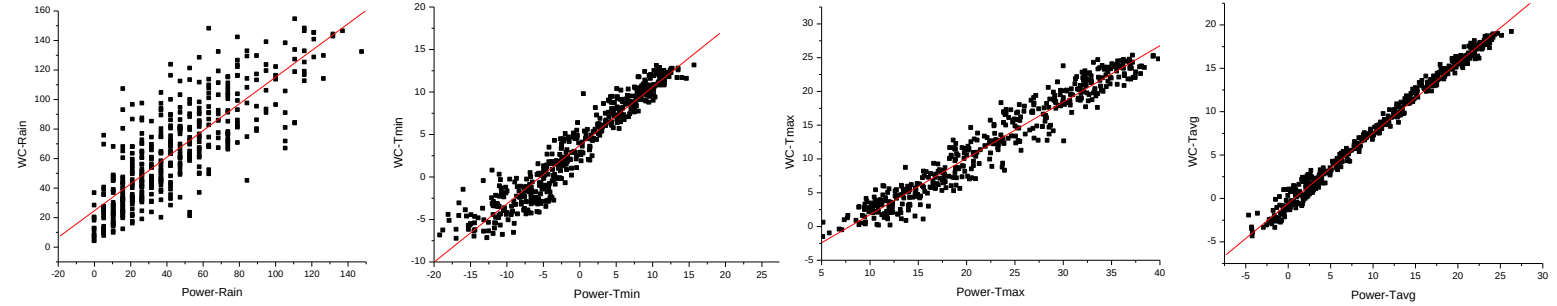
Site 2



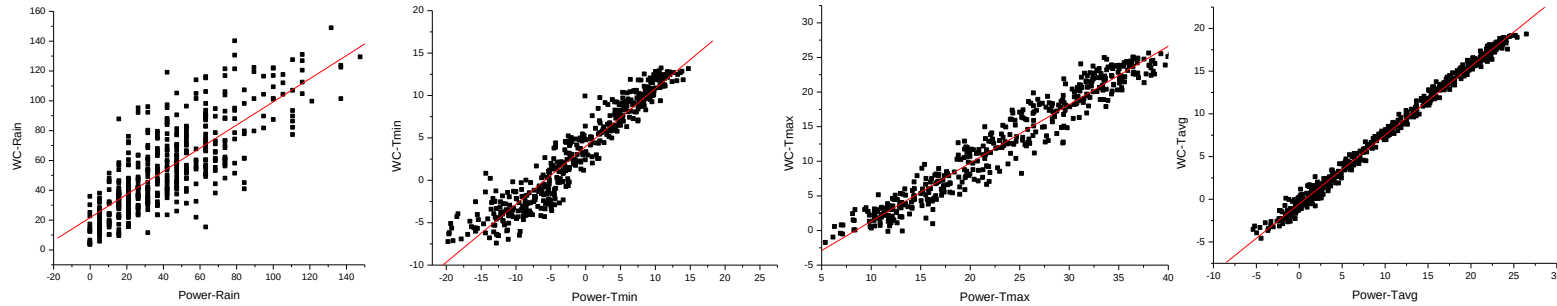
Site 3



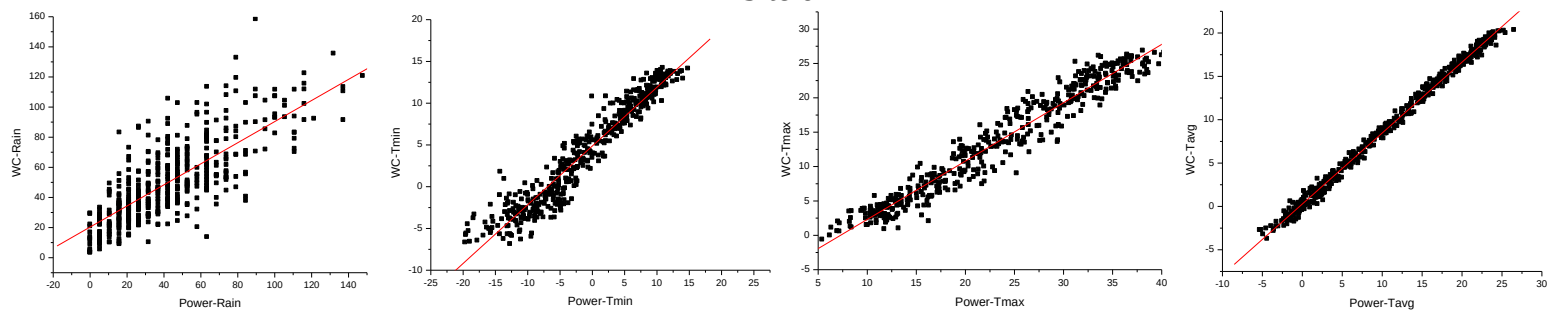
Site 4



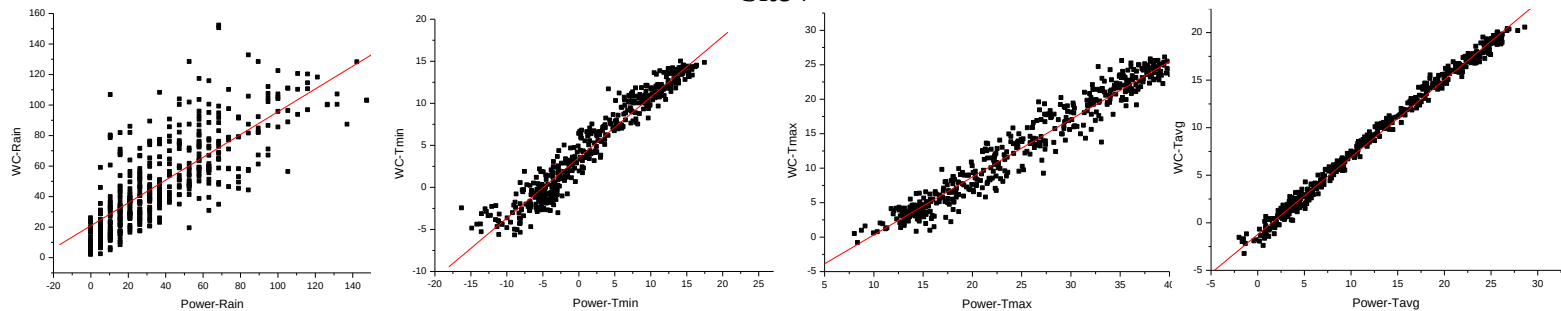
Site 5



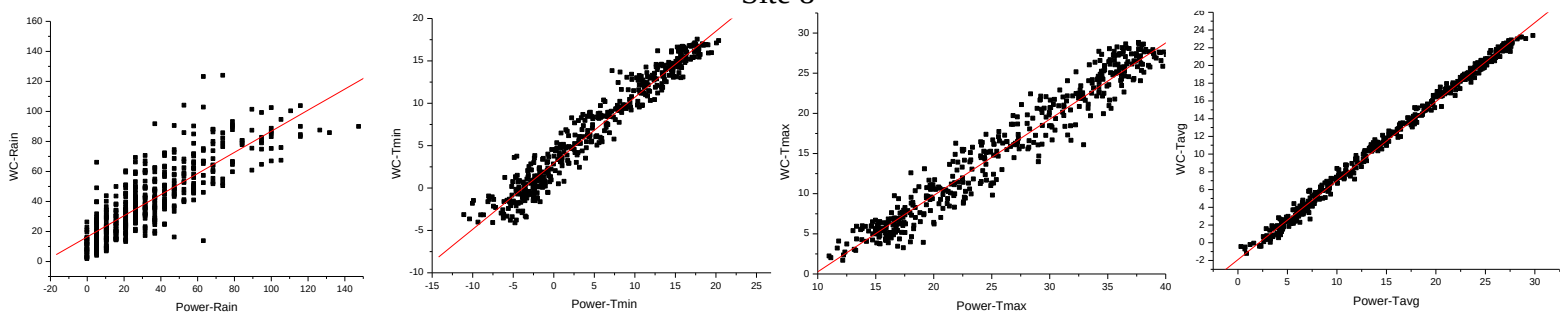
Site 6



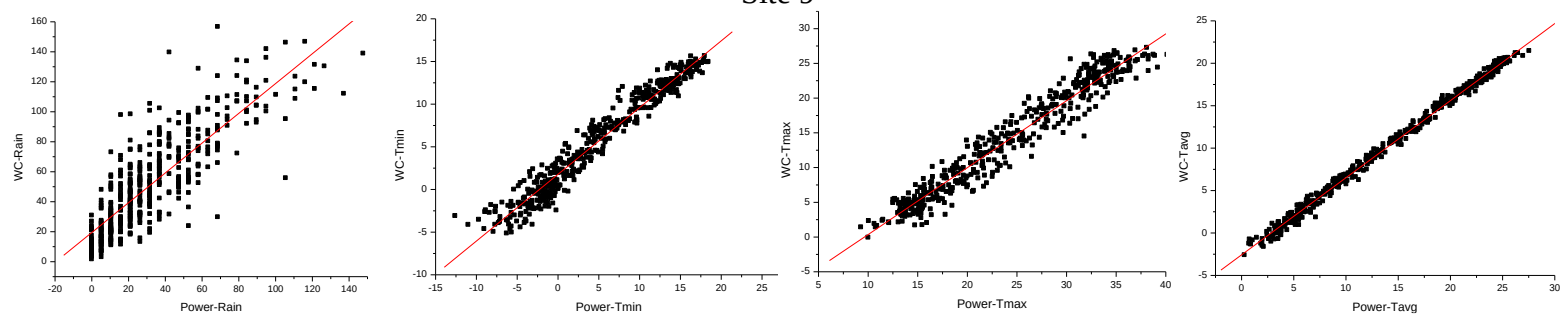
Site 7



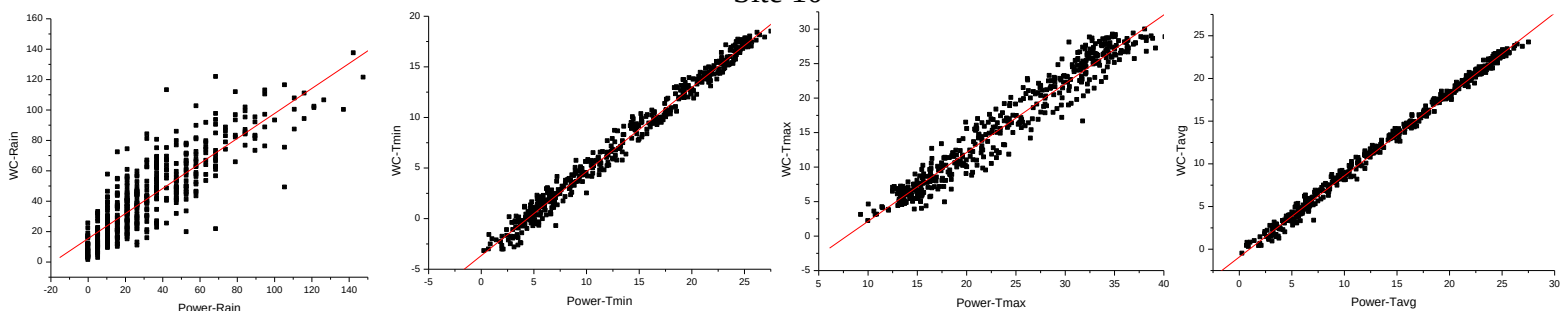
Site 8

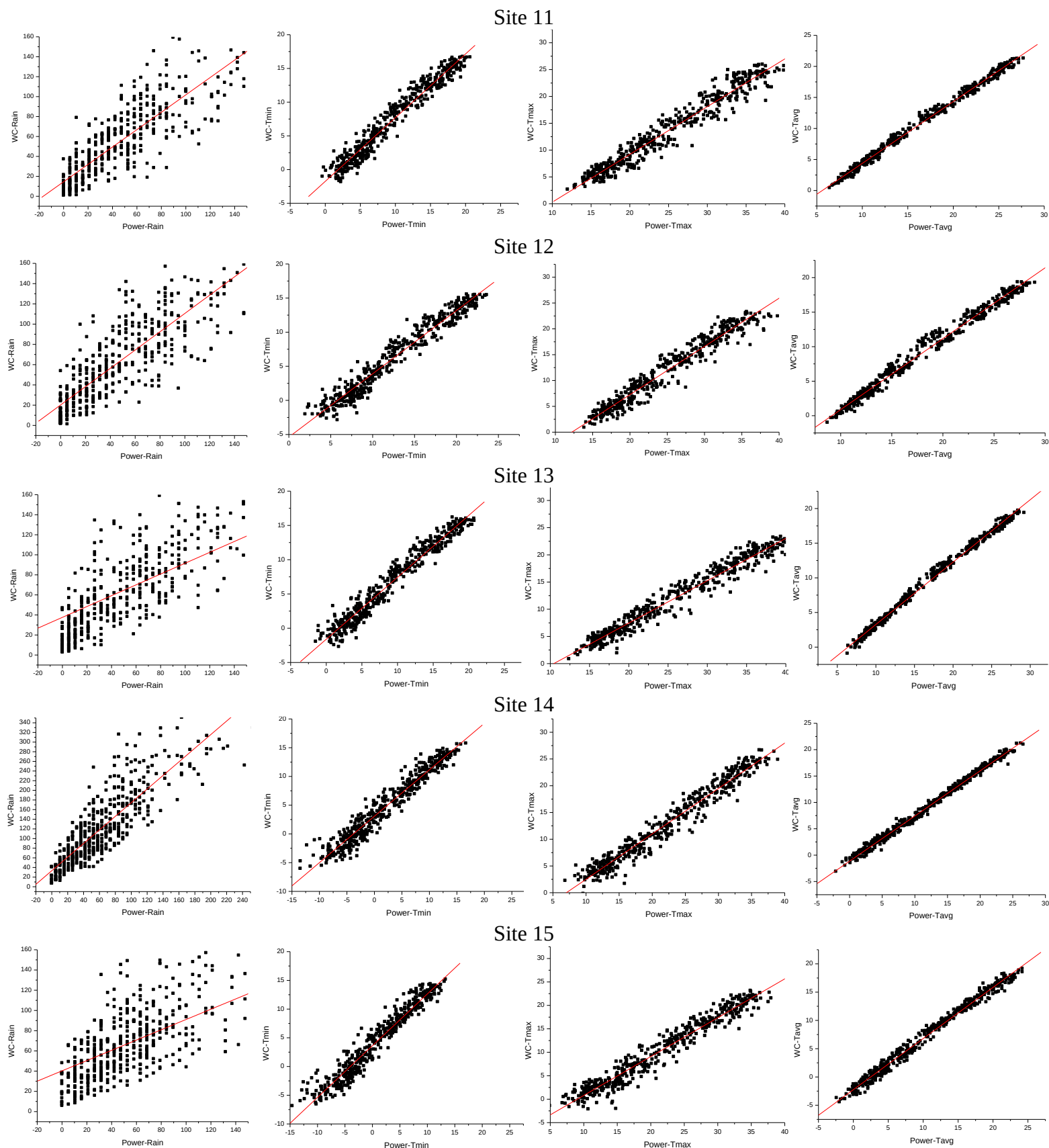


Site 9



Site 10

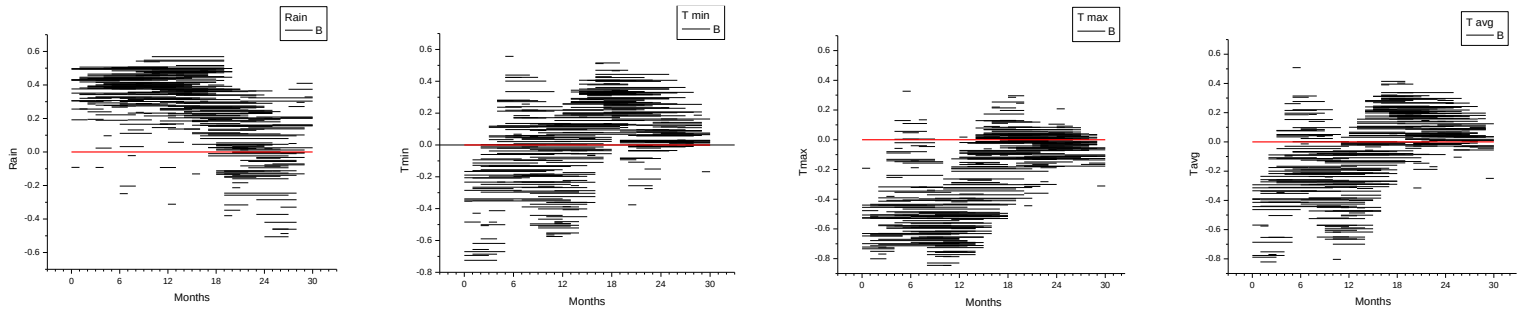




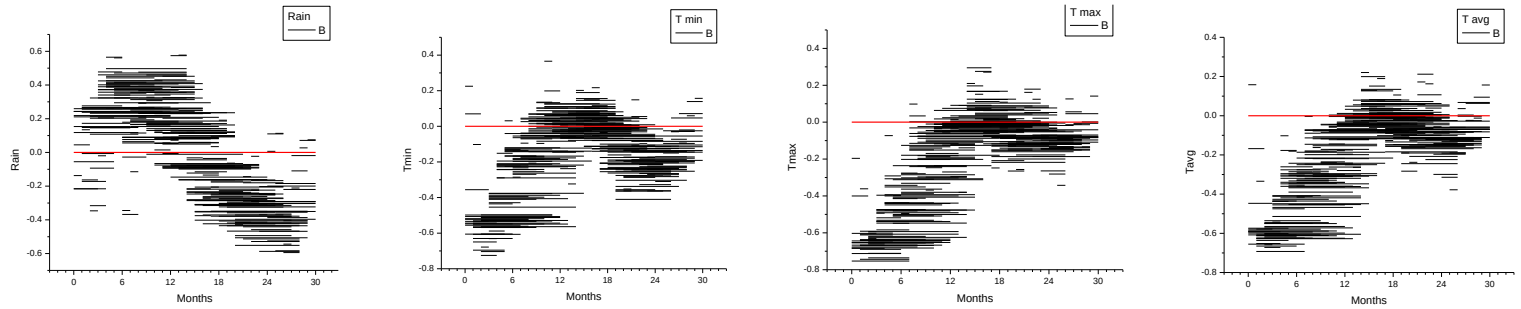
***Σχήμα 13.** Διαγράμματα συσχέτισης World Clim - Power για τις παραμέτρους Βροχόπτωση, Ελάχιστη, Μέγιστη και Μέση θερμοκρασία (Rain, Tmin, Tmax, Tavg) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites 1-15).*

Διαγράμματα συσχέτισης Φαινολογικές – Μετεωρολογικές παράμετροι SOS

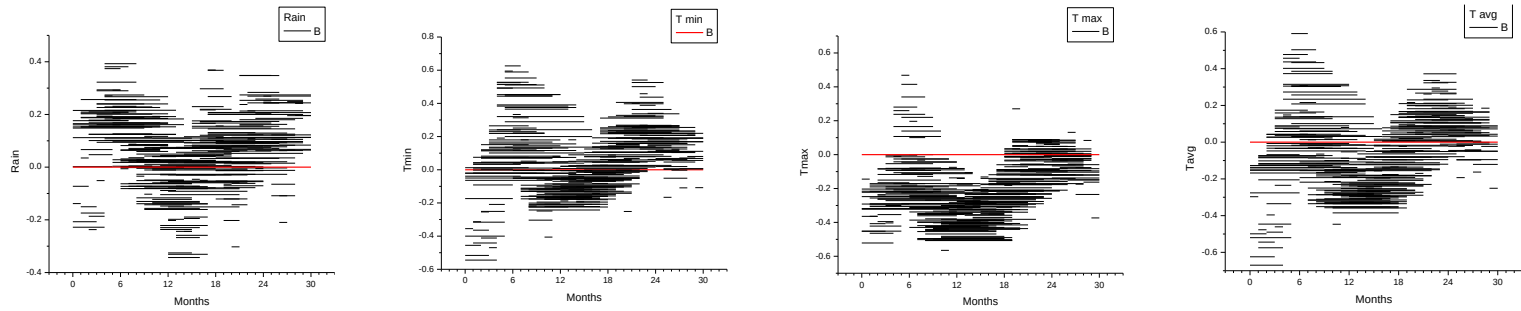
Site 1



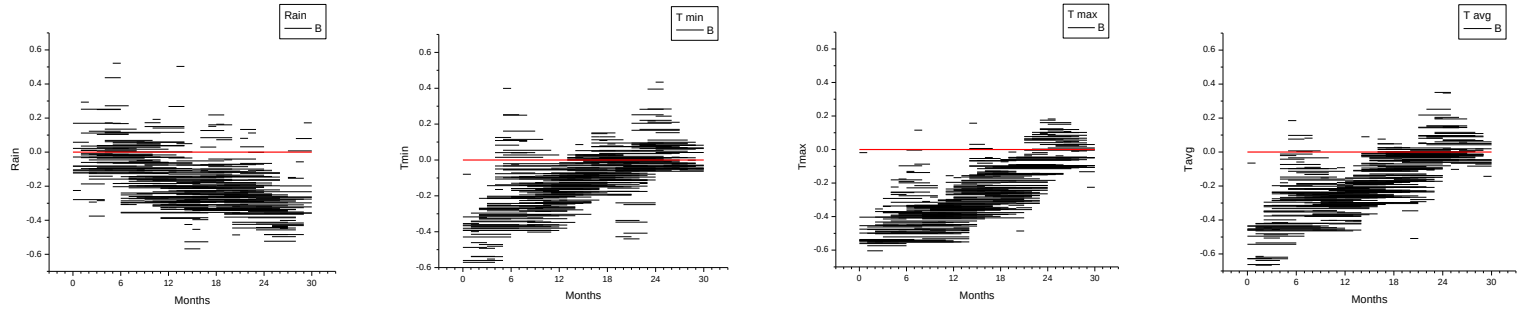
Site 2



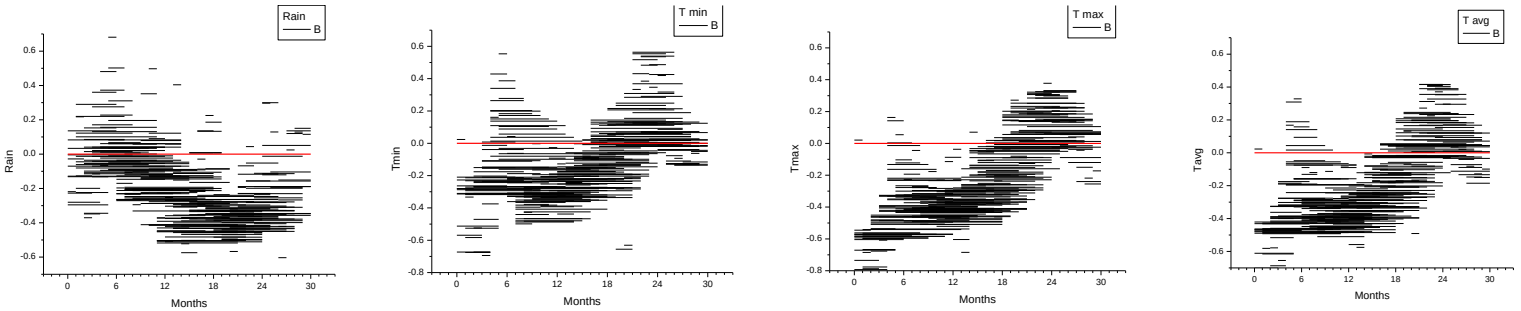
Site 3



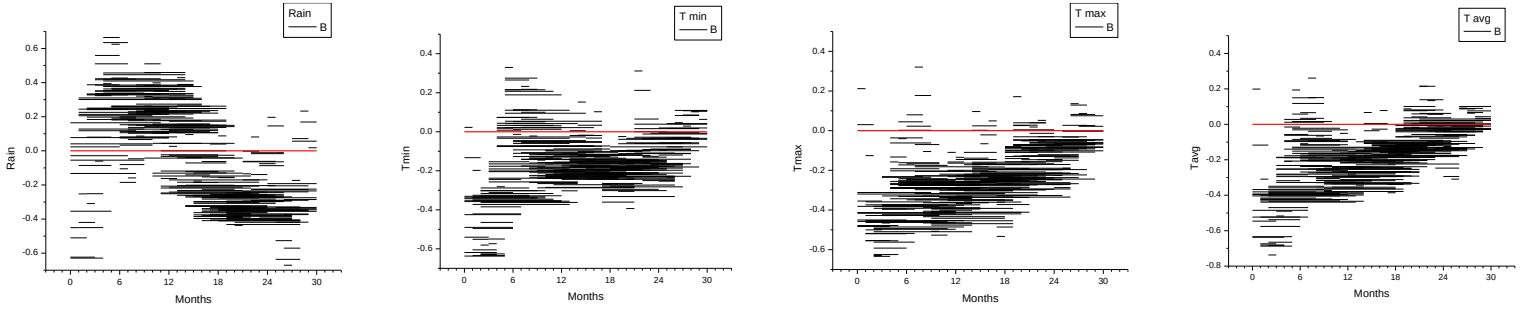
Site 4



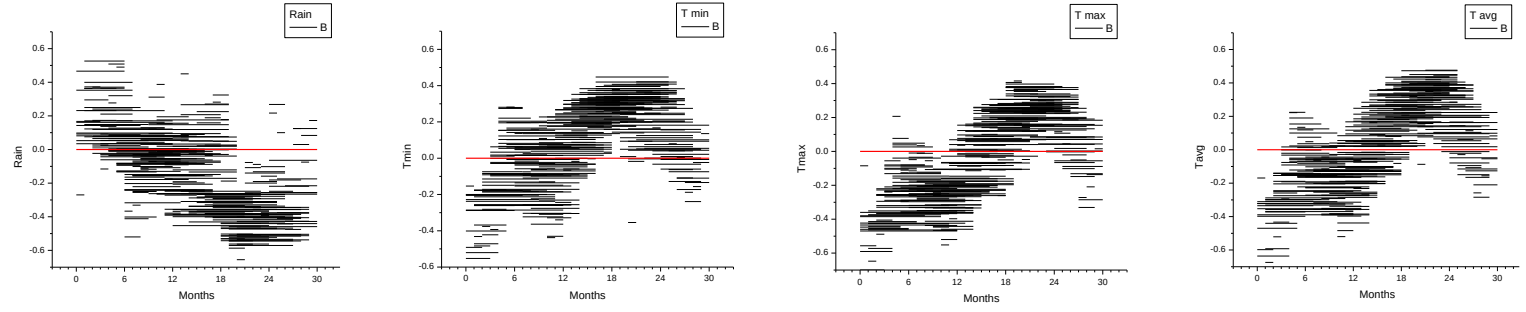
Site 5



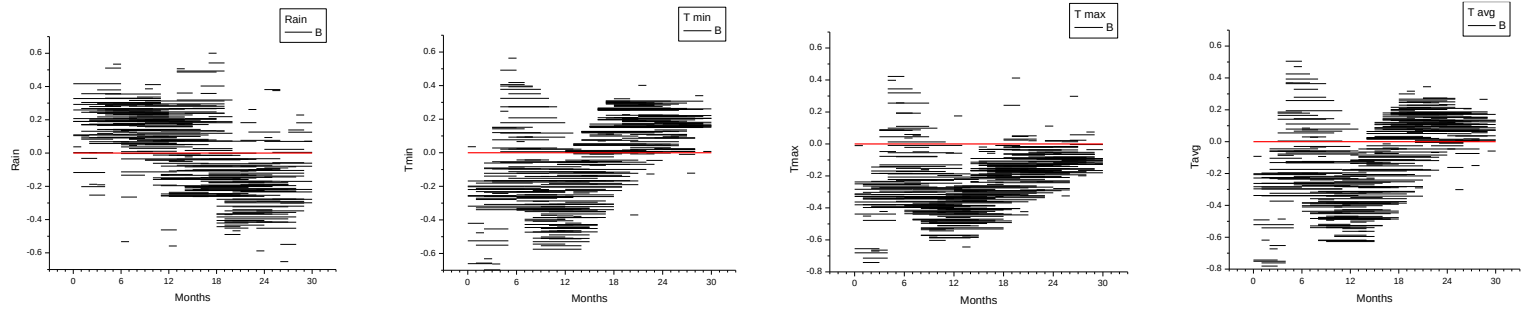
Site 6



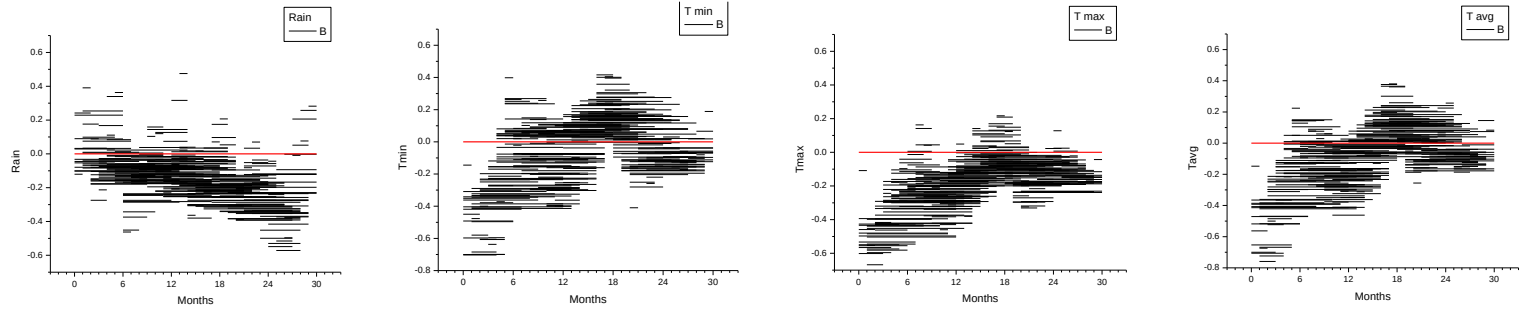
Site 7



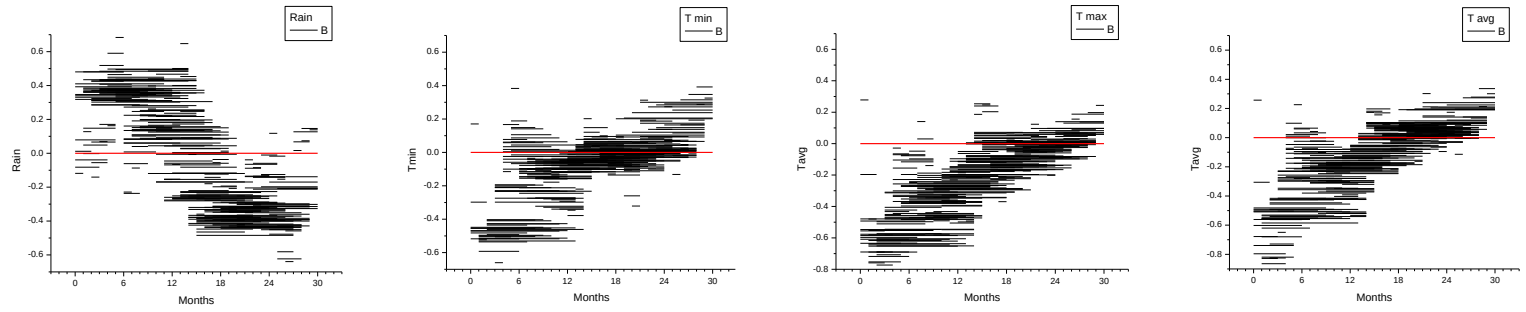
Site 8



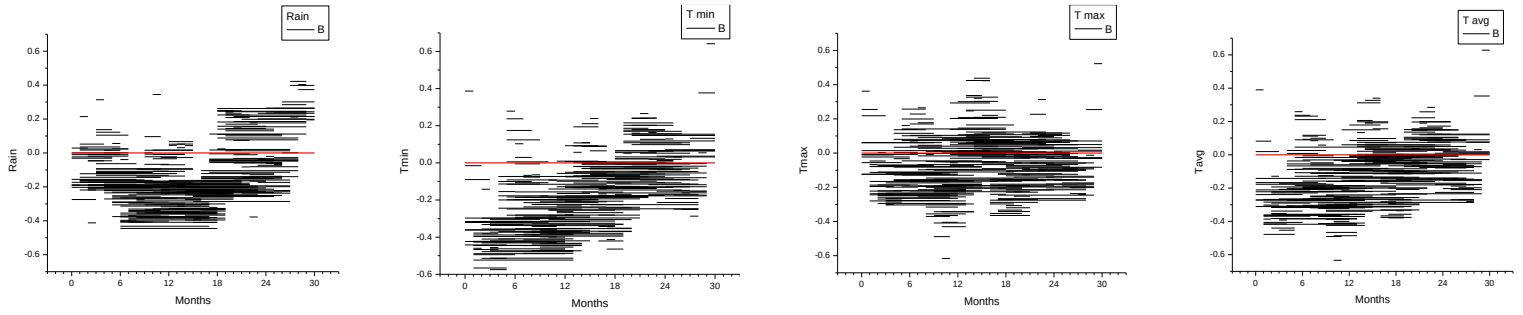
Site 9



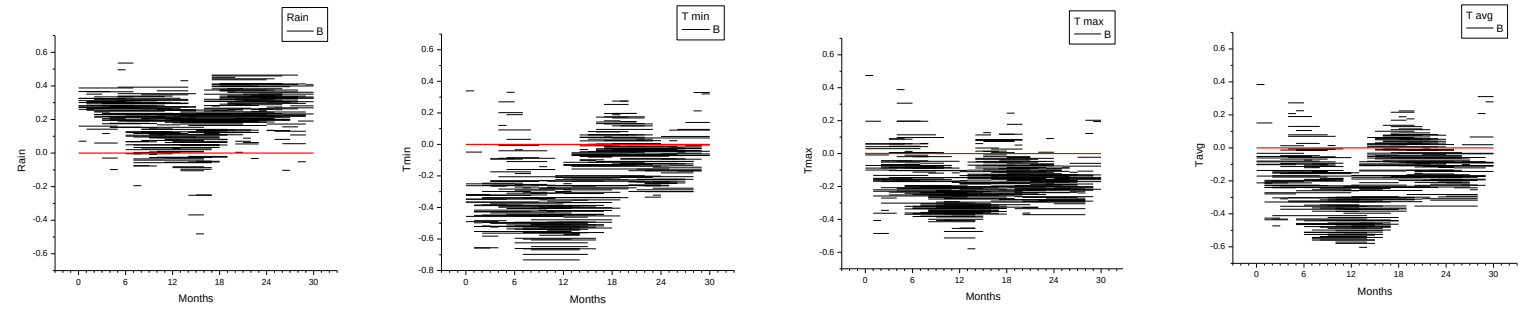
Site 10



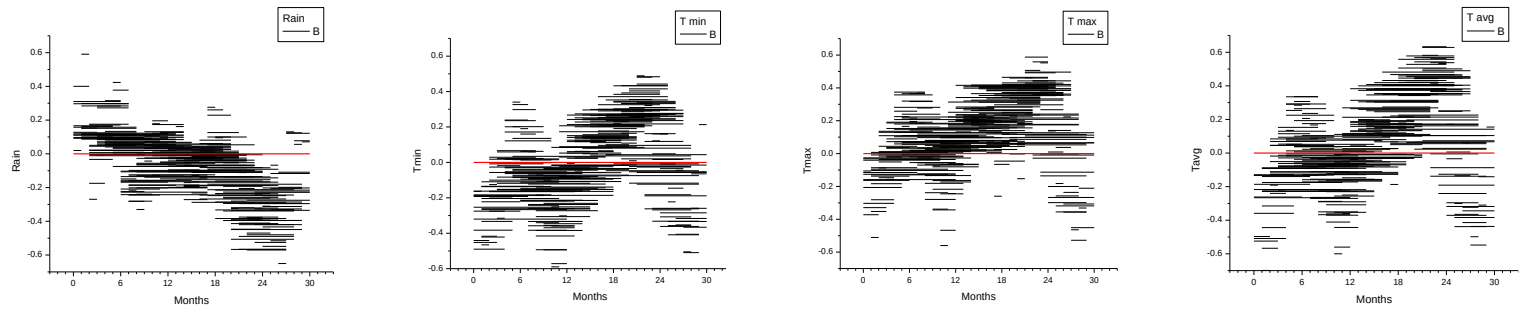
Site 11



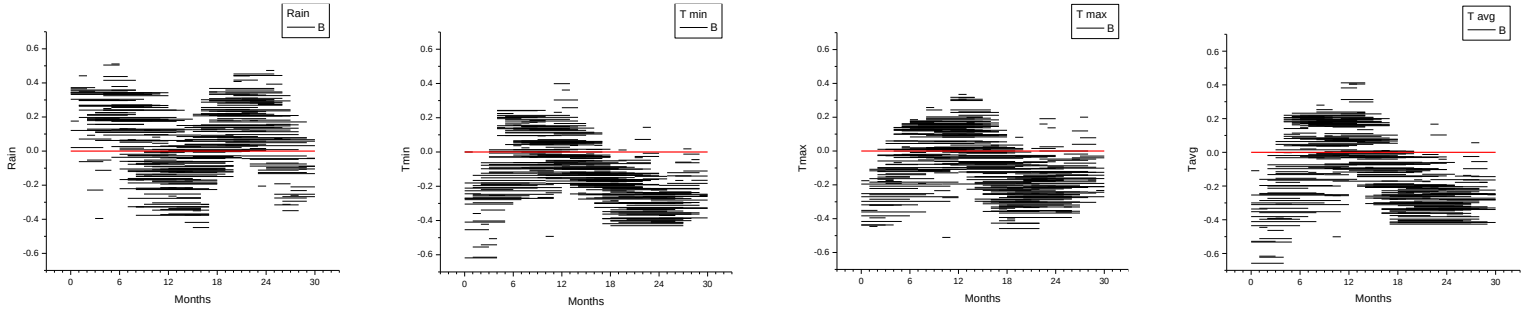
Site 12



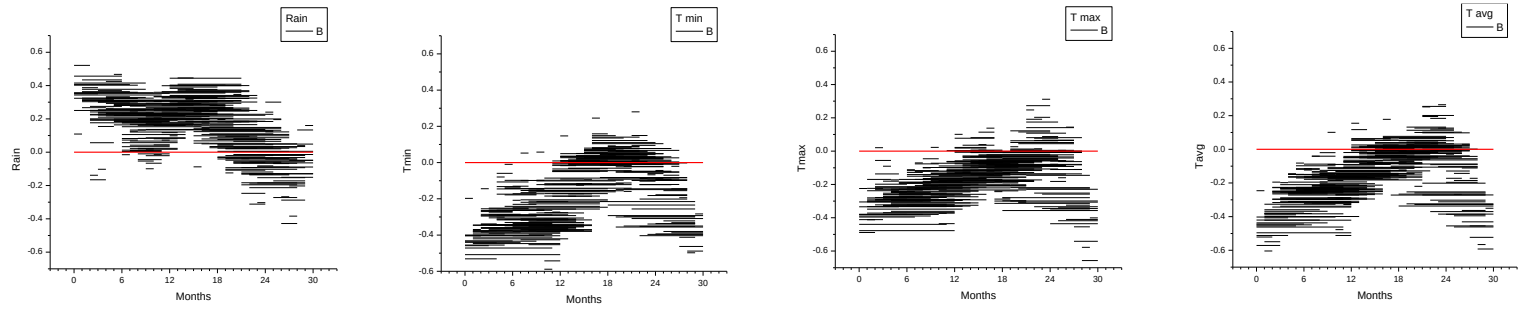
Site 13



Site 14



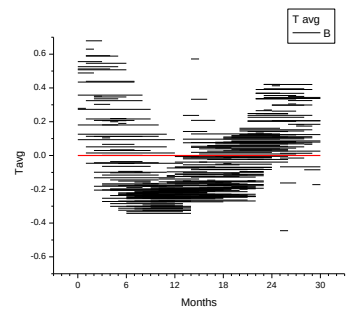
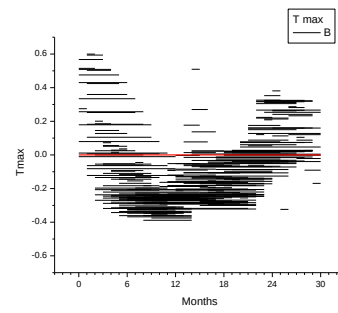
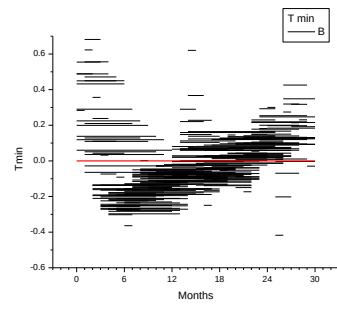
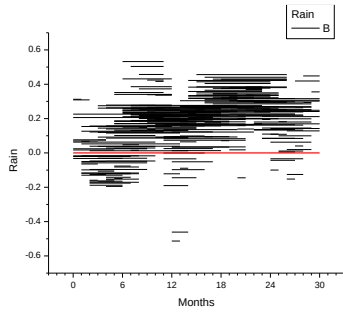
Site 15



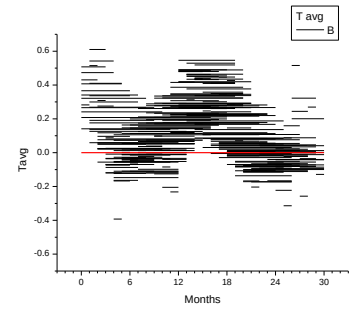
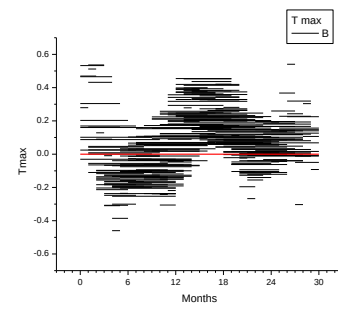
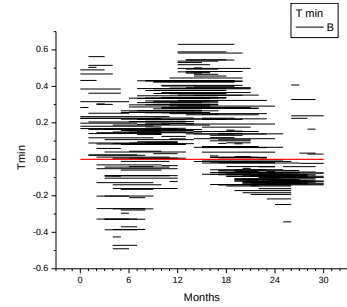
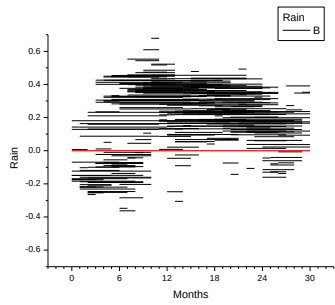
EOS

Σχήμα 14. Διαγράμματα συσχέτισης της έναρξης της αναπτυξιακής περιόδου (SOS) με μετεωρολογικές παραμέτρους: Βροχόπτωση, Ελάχιστη, Μέγιστη και Μέση θερμοκρασία (Rain, T min, T max, T avg) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Site 1-15).

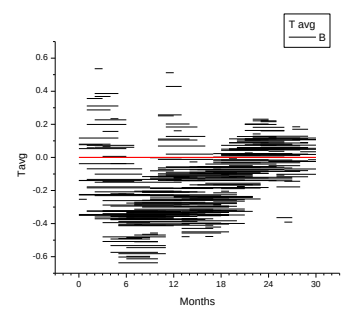
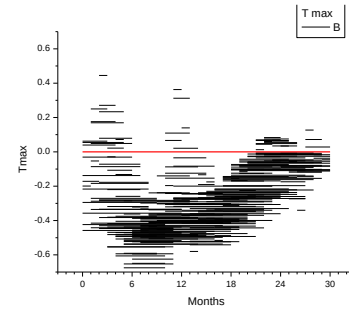
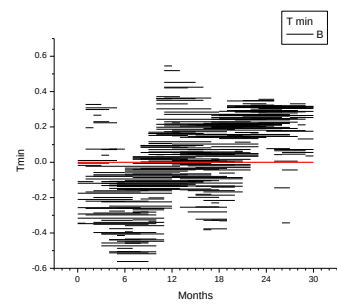
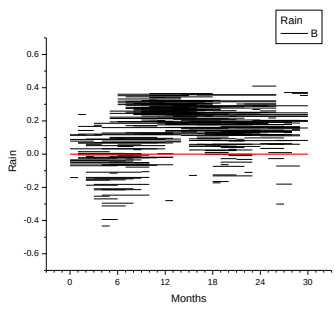
Site 1



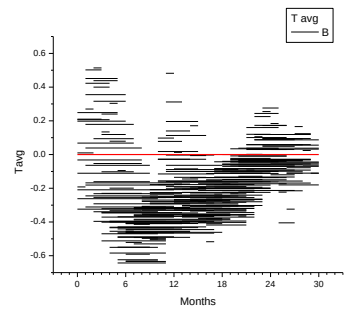
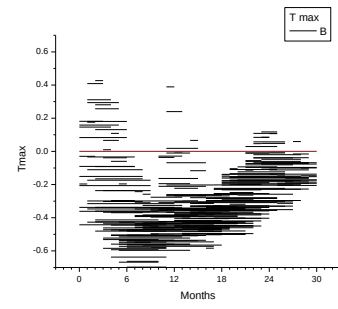
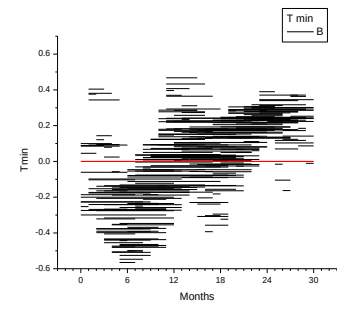
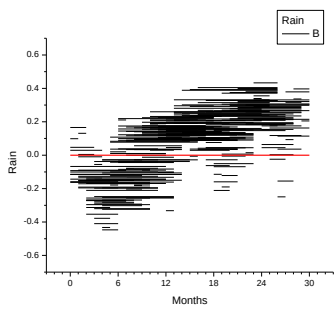
Site 2



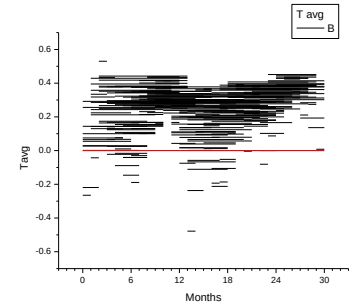
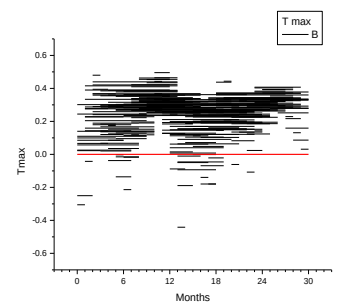
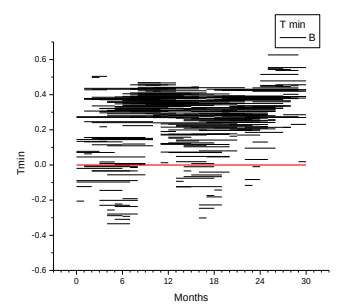
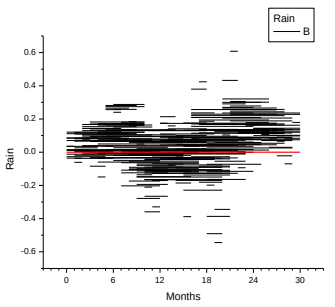
Site 3



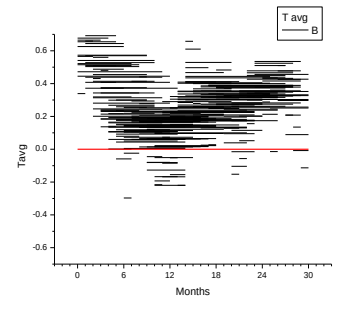
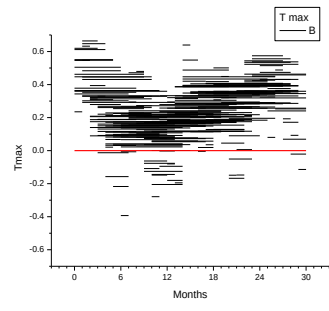
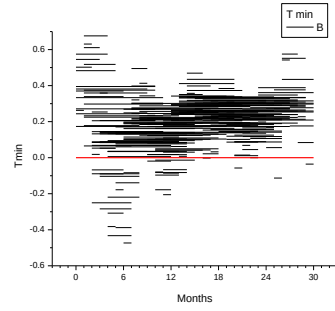
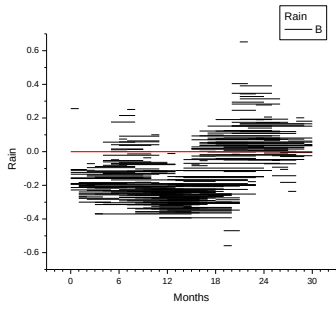
Site 4



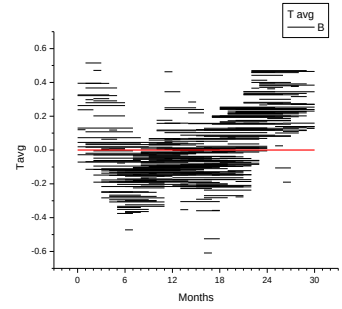
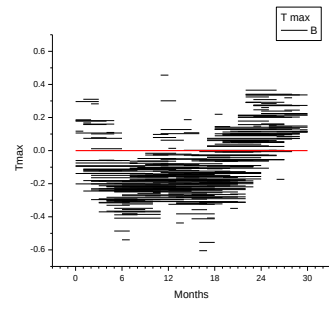
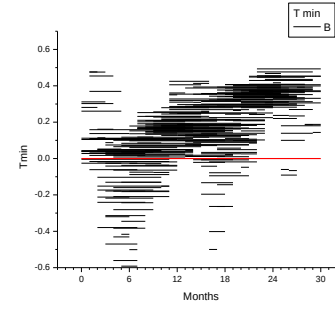
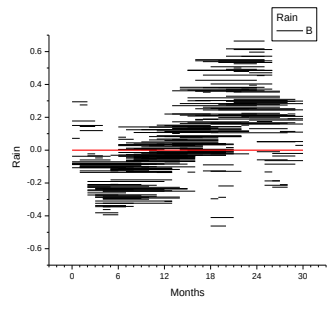
Site 5



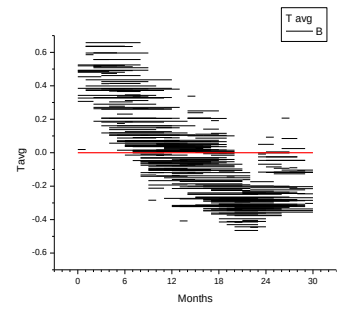
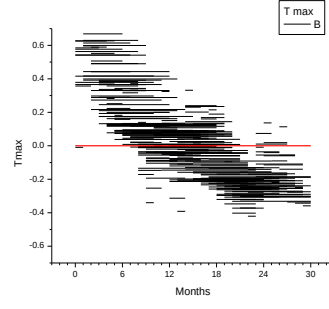
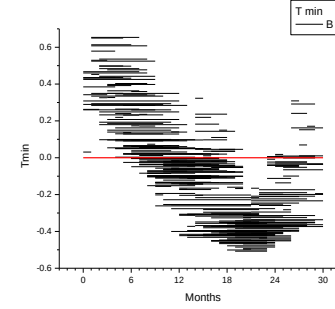
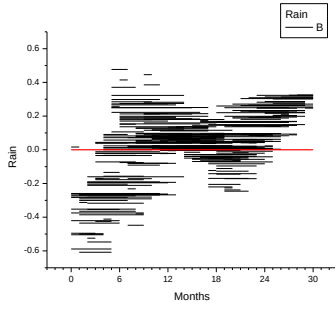
Site 6



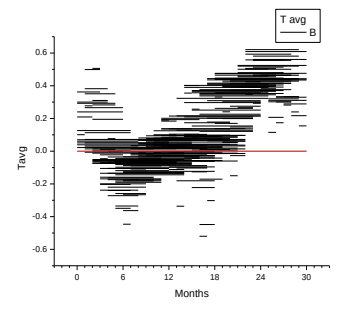
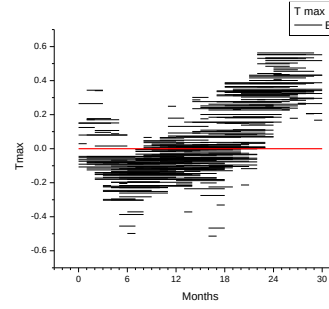
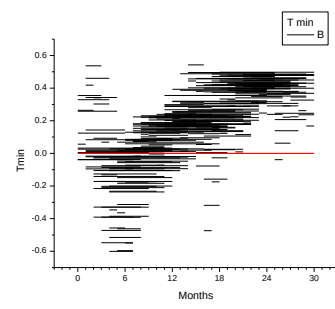
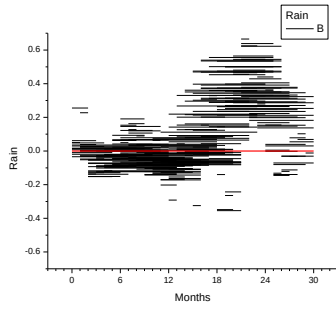
Site 7



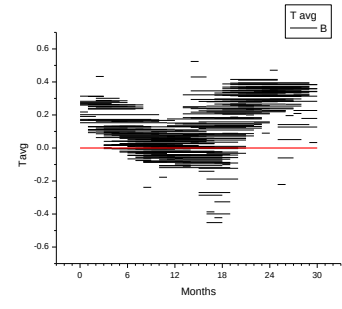
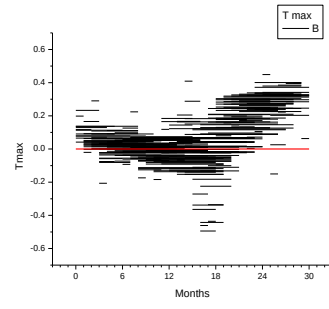
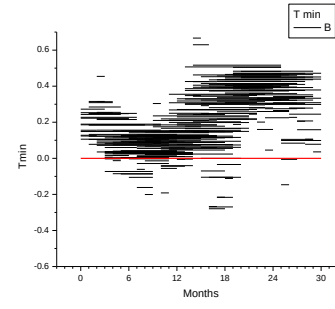
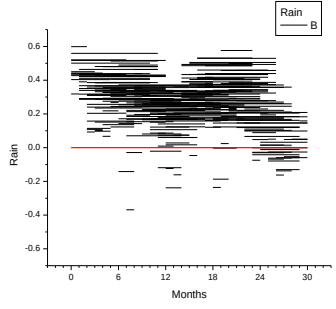
Site 8



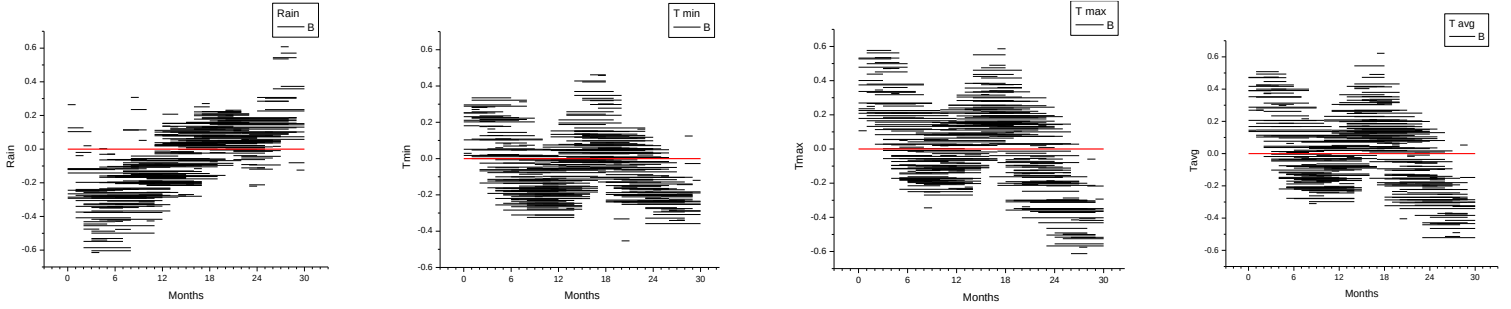
Site 9



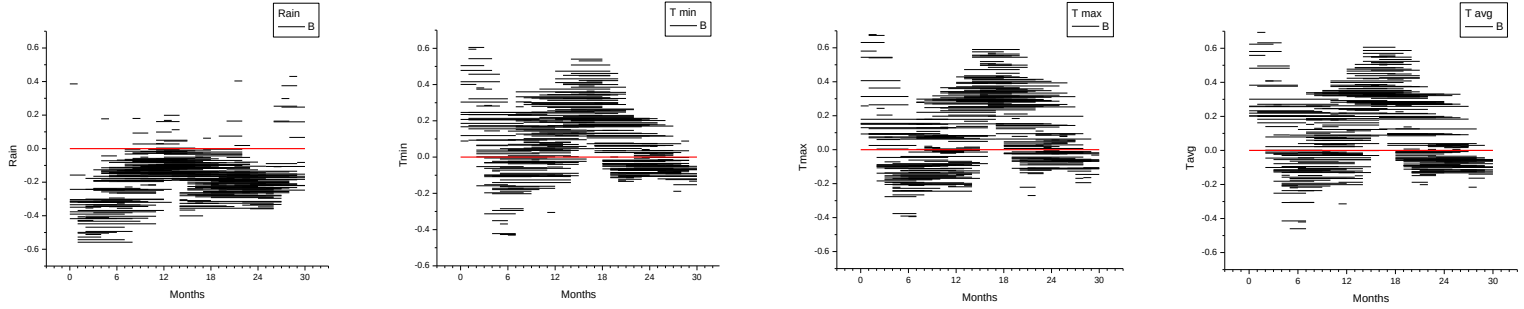
Site 10



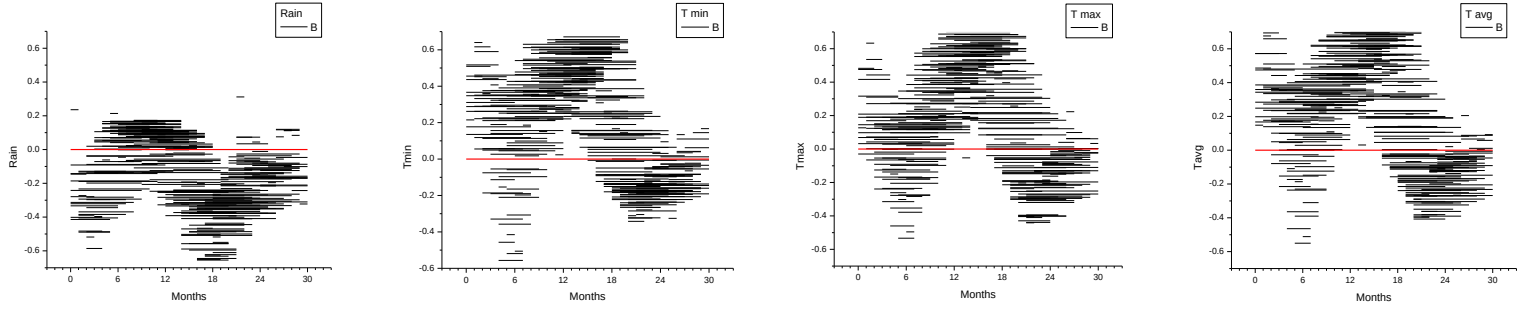
Site 11



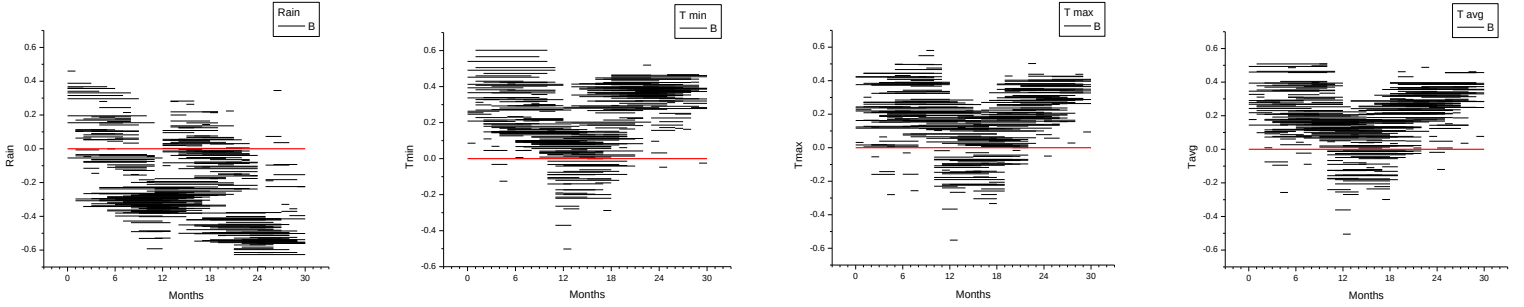
Site 12



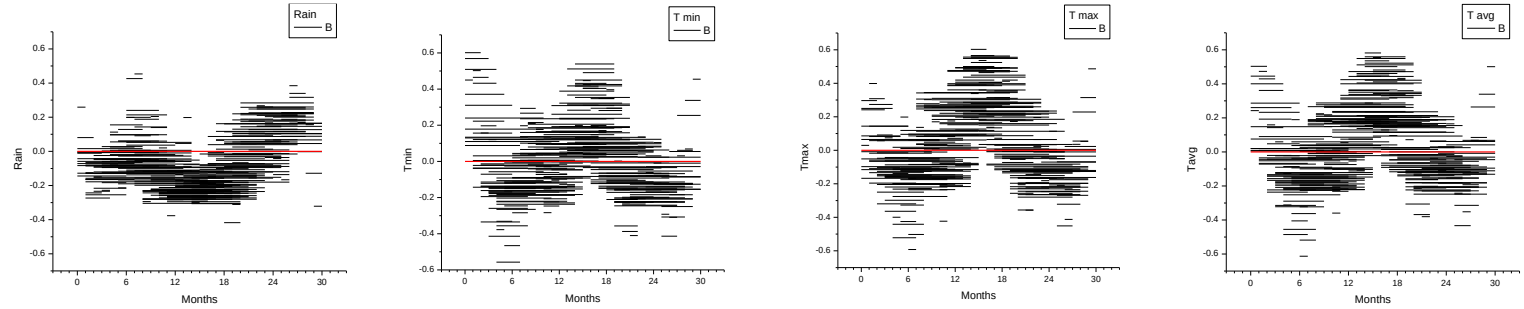
Site 13



Site 14



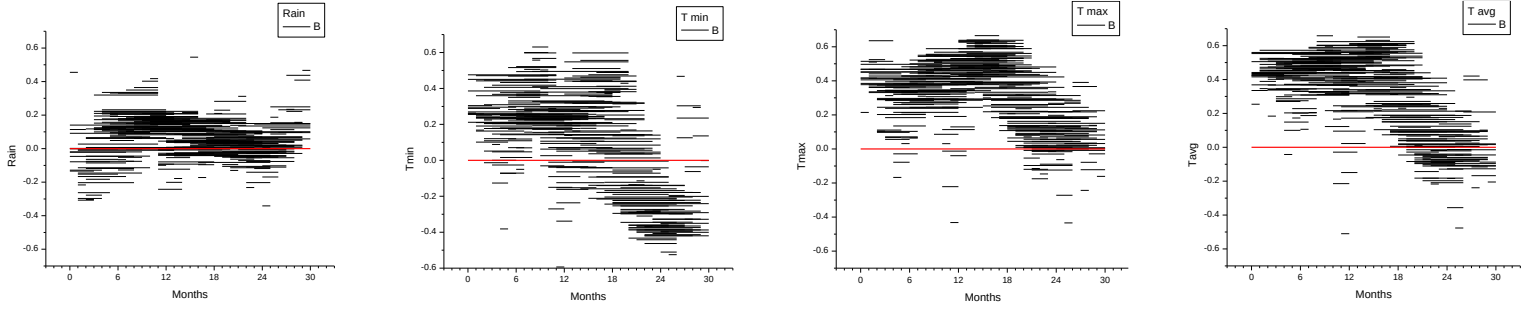
Site 15



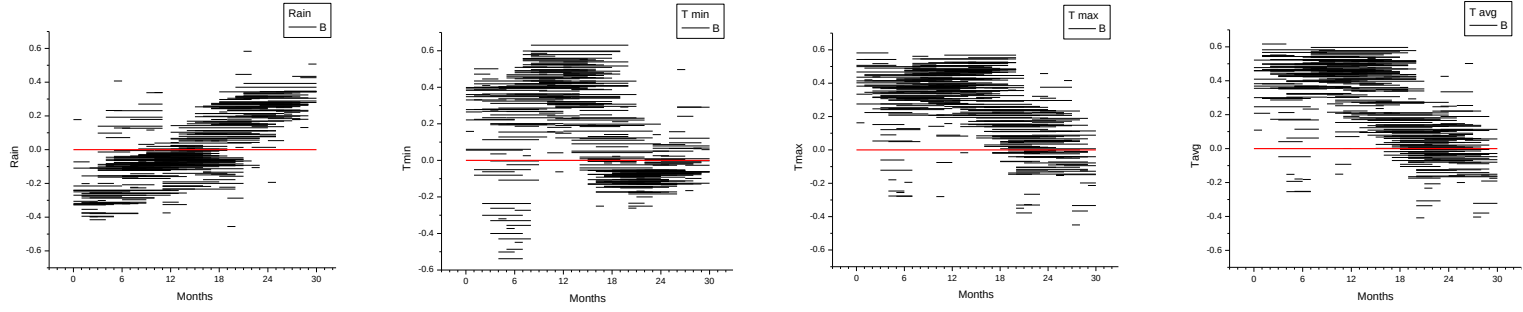
LOS

Σχήμα 15. Διαγράμματα συσχέτισης της λήξη της αναπτυξιακής περιόδου (EOS) με μετεωρολογικές παραμέτρους: Βροχόπτωση, Ελάχιστη, Μέγιστη και Μέση θερμοκρασία (Rain, Tmin, Tmax, Tavg) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Site 1-15).

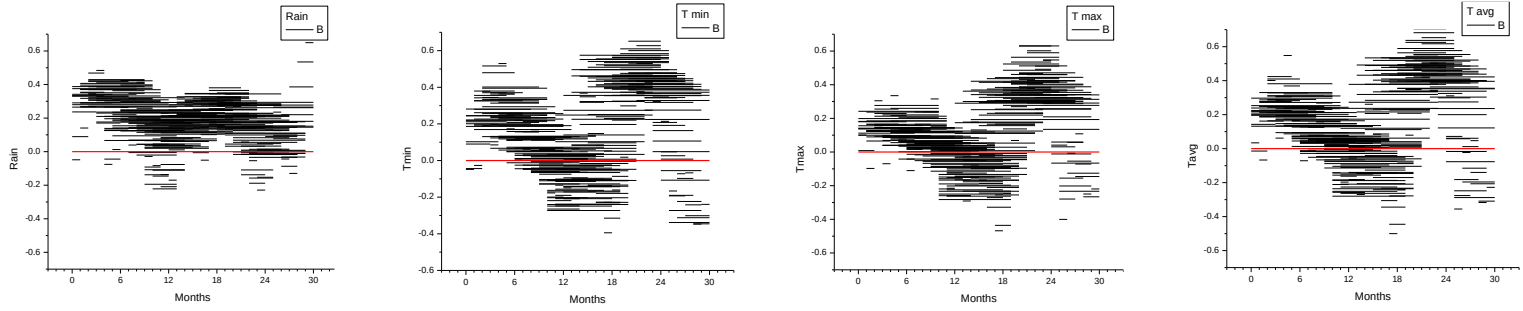
Site 1



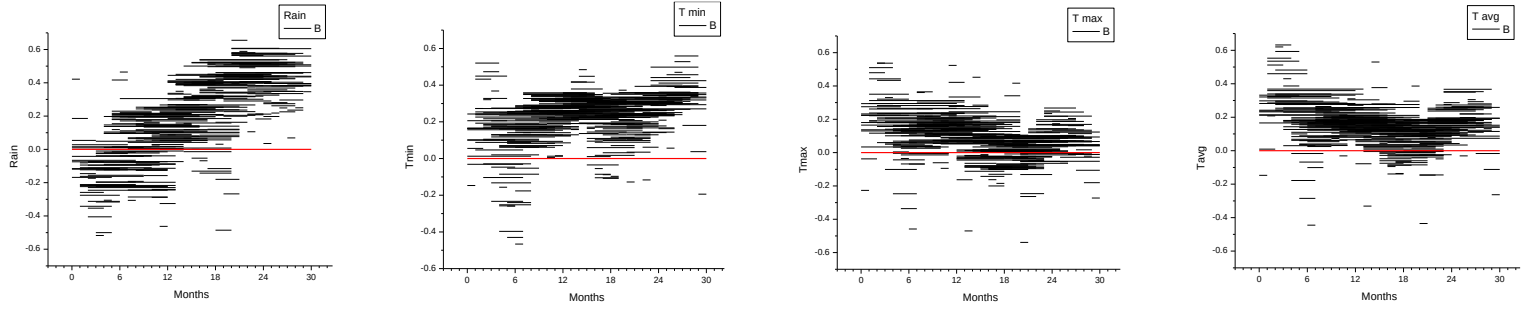
Site 2



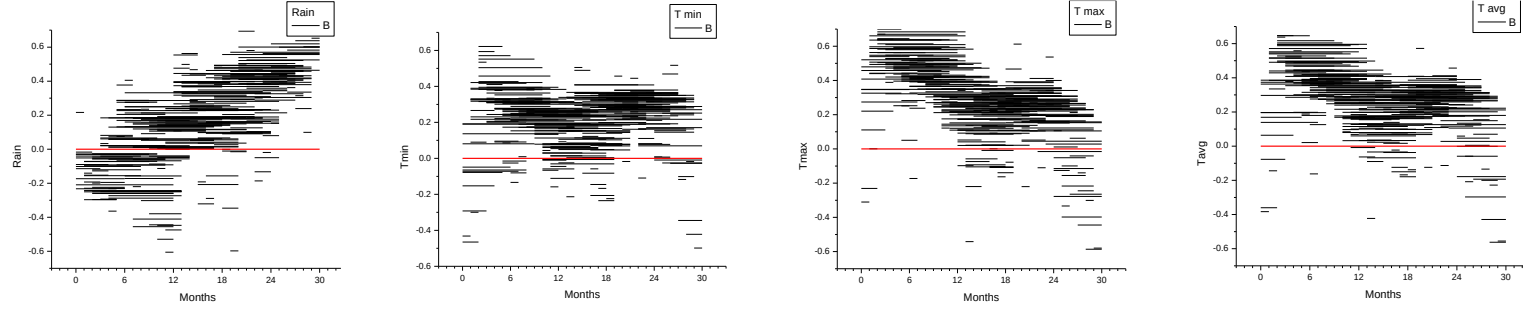
Site 3



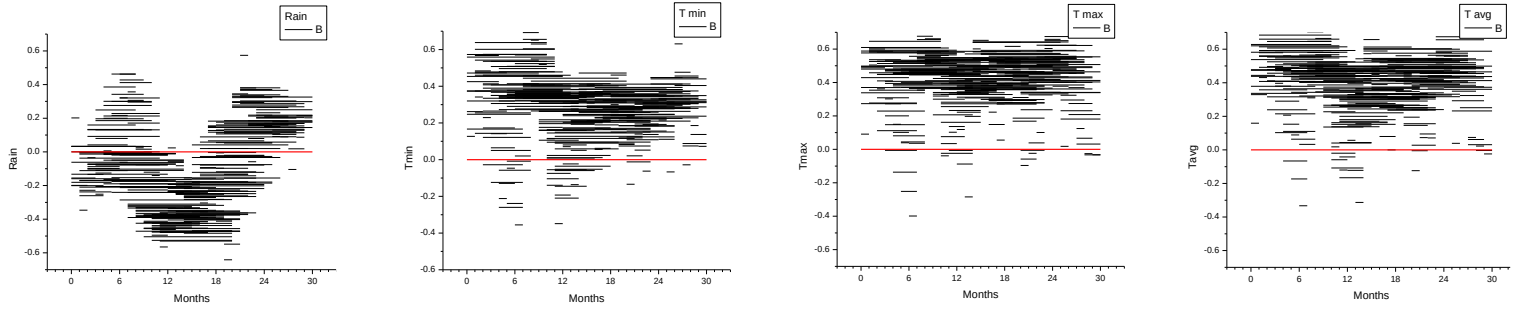
Site 4



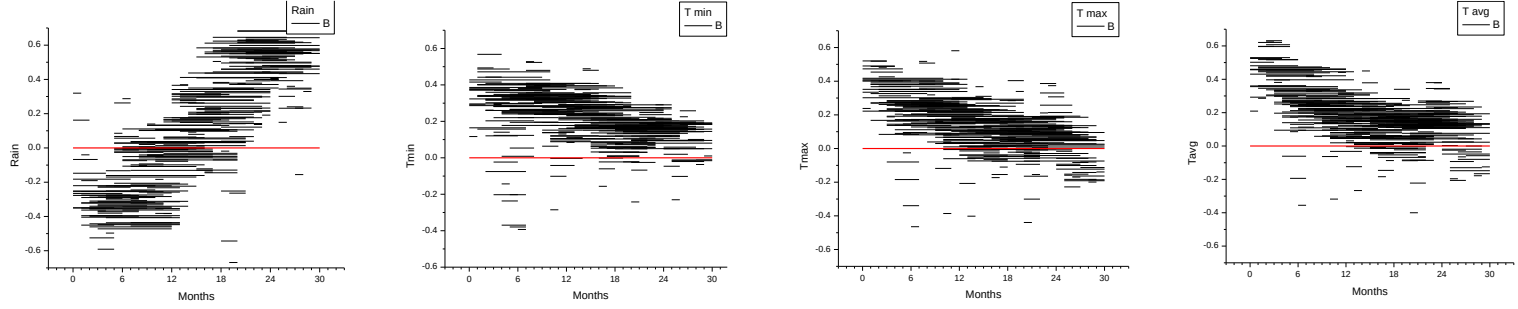
Site 5



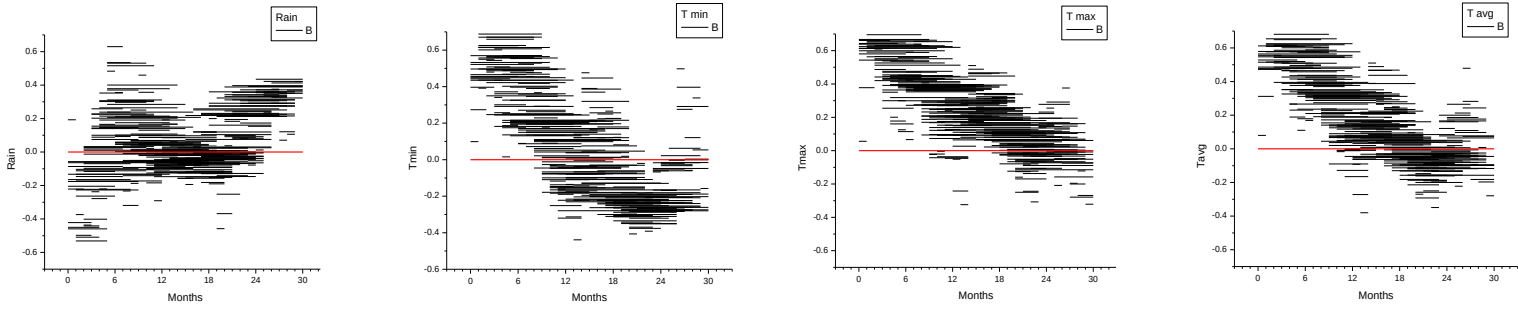
Site 6



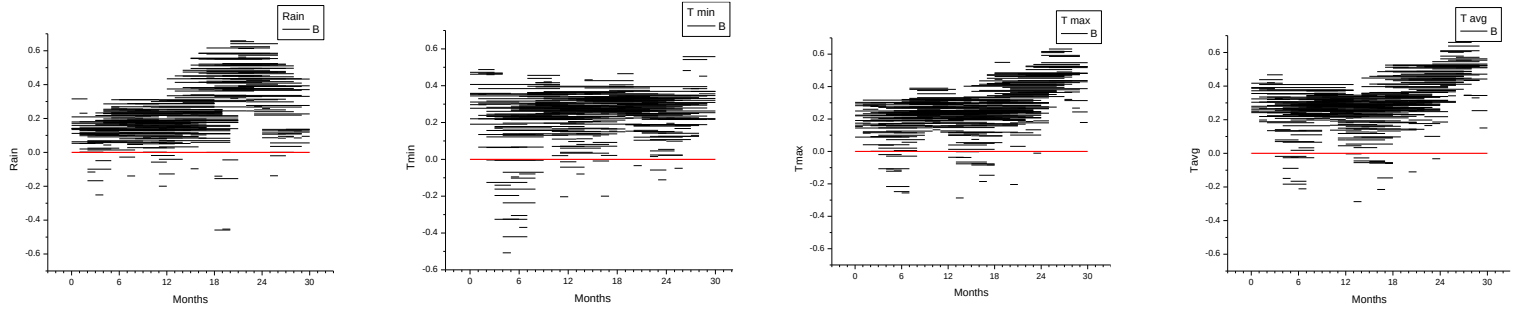
Site 7



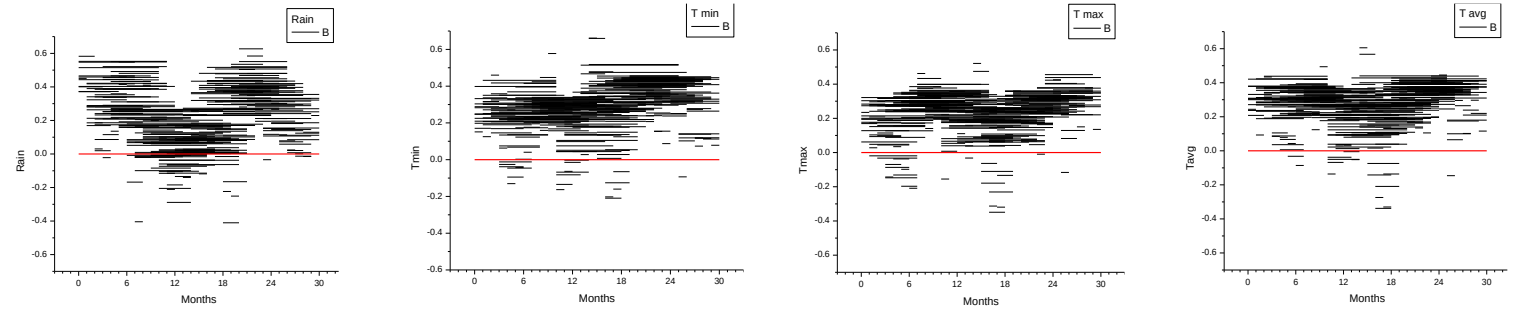
Site 8



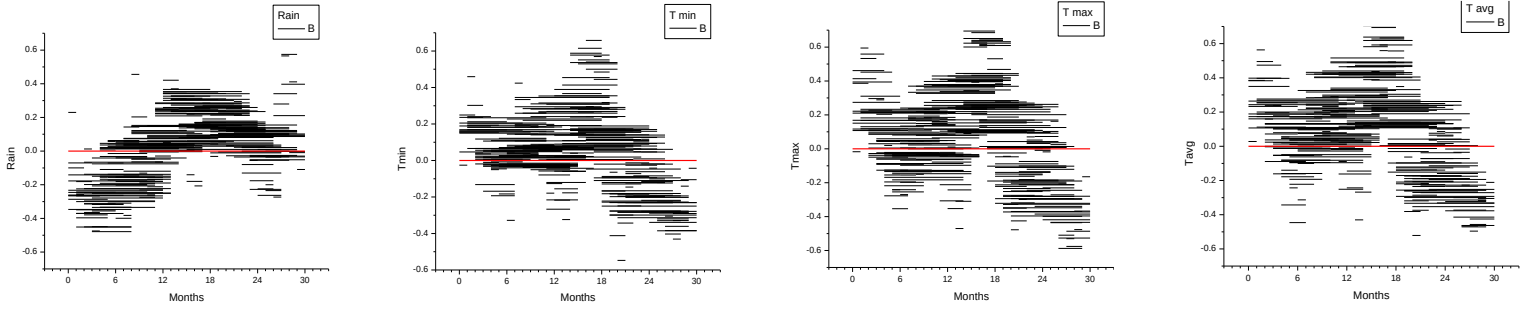
Site 9



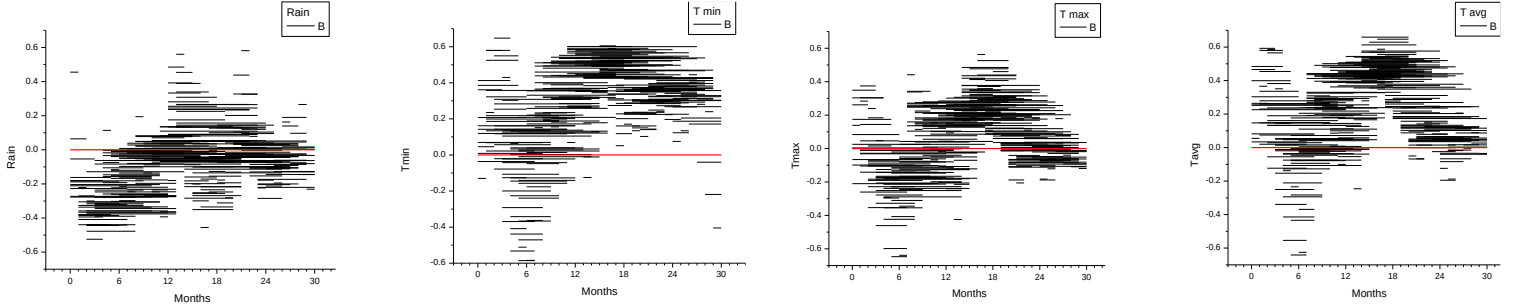
Site 10



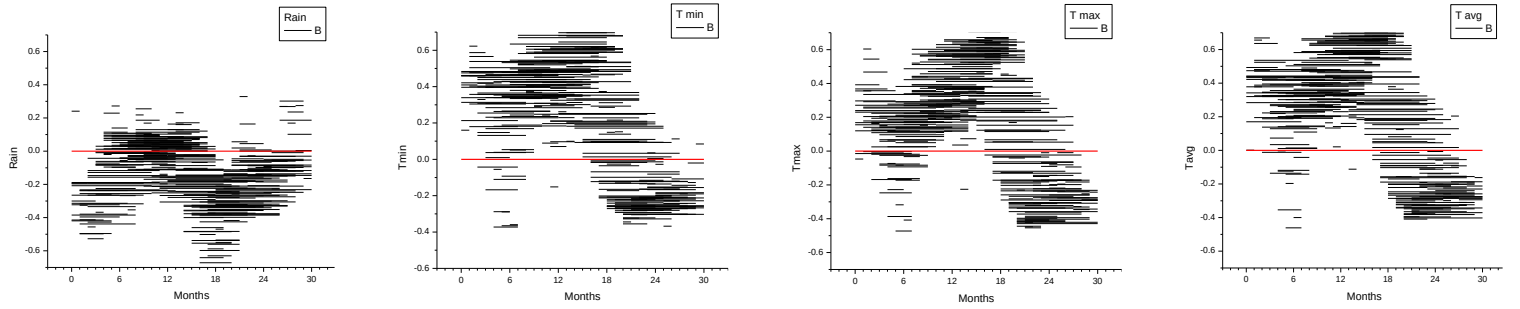
Site 11



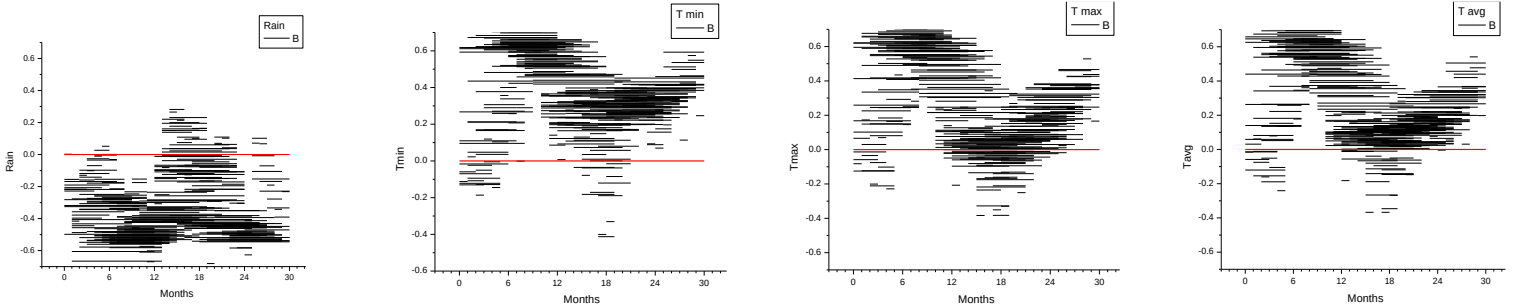
Site 12



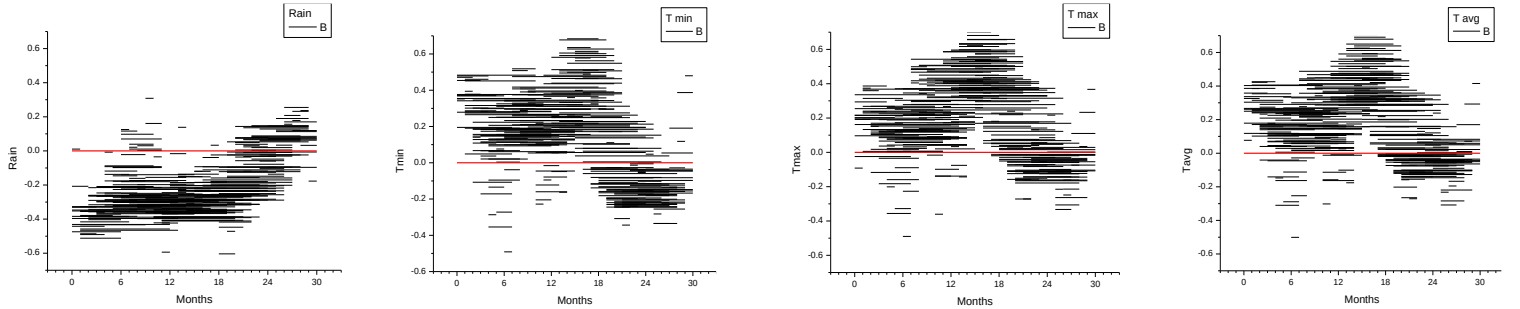
Site 13



Site 14



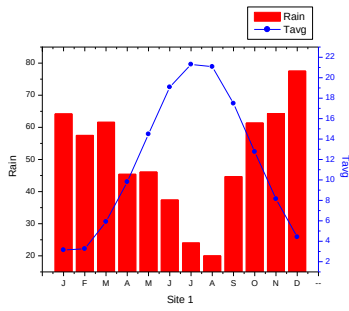
Site 15



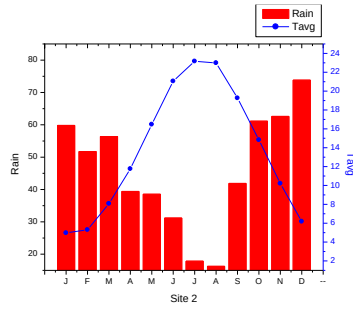
Σχήμα 16. Διαγράμματα συσχέτισης της διάρκειας της αναπτυξιακής περιόδου (LOS) με μετεωρολογικές παραμέτρους: Βροχόπτωση, Ελάχιστη, Μέγιστη και Μέση θερμοκρασία (Rain, Tmin, Tmax, Tavg) για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Site 1-15).

Ομβροθερμικά διαγράμματα

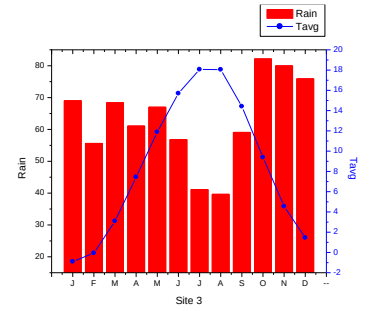
Site 1



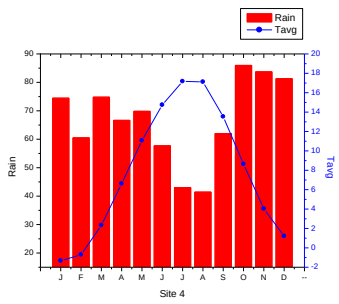
Site 2



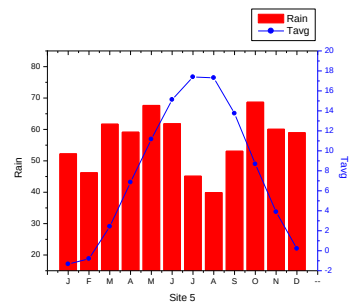
Site 3



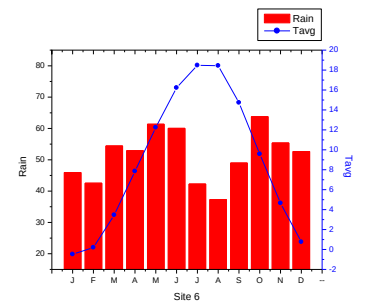
Site 4



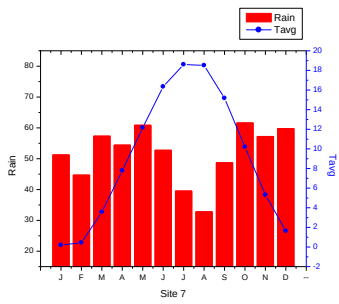
Site 5



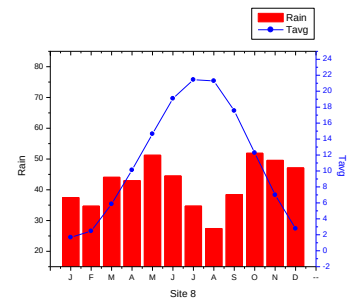
Site 6



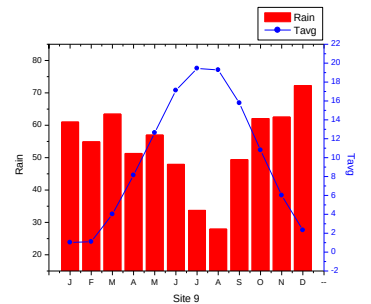
Site 7



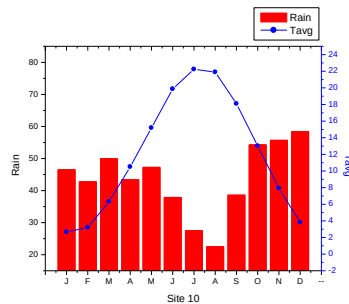
Site 8



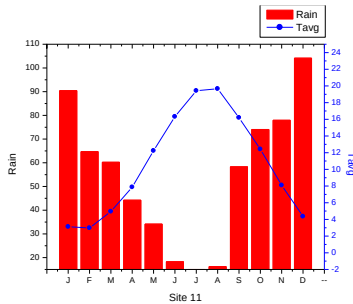
Site 9



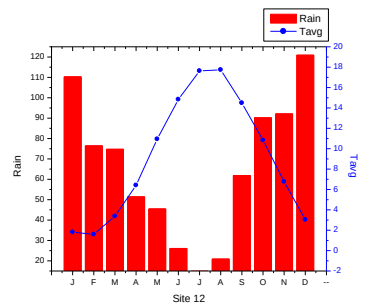
Site 10



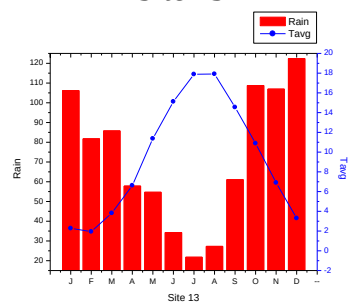
Site 11



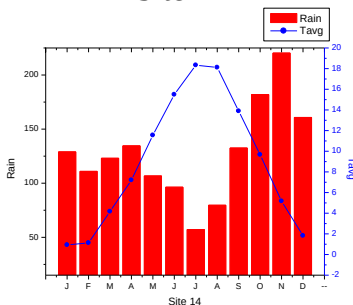
Site 12



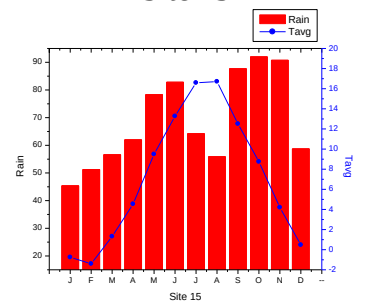
Site 13



Site 14



Site 15



Σχήμα 17. Ομβροθερμικά διαγράμματα για τις 15 ερευνητικές περιοχές (Sites 1-15).