



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΖΩΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΝΤΟΜΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΥΤΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ
& ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Χρήση δεδομένων από οπτικούς, πολυφασματικούς και θερμικούς αισθητήρες
επί ΣμηΕΑ για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση
εντομολογικών προσβολών σε οπωρώνες

Ευαγγελία Ι. Αραποστάθη

Επιβλέπων καθηγητής:

Παπαδούλης Θ. Γεώργιος, Καθηγητής ΓΠΑ

**ΑΘΗΝΑ
2022**

**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΖΩΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΝΤΟΜΟΛΟΓΙΑΣ**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Χρήση δεδομένων από οπτικούς, πολυφασματικούς και θερμικούς αισθητήρες
επί ΣμηΕΑ για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση
εντομολογικών προσβολών σε οπωρώνες

Use of data from optical, multispectral and thermal sensors on UAS
for the detection and monitoring of entomological infestations in orchards

Ευαγγελία Ι. Αραποστάθη

Εξεταστική Επιτροπή:

Παπαδούλης Θ. Γεώργιος, Καθηγητής ΓΠΑ

Περδίκης Διονύσιος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ

Κολιόπουλος Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής ΓΠΑ

Χρήση δεδομένων από οπτικούς, πολυφασματικούς και θερμικούς αισθητήρες επί ΣμηΕΑ για τον εντοπισμό και την παρακολούθηση εντομολογικών προσβολών σε οπωρώνες

ΠΜΣ Ολοκληρωμένα Συστήματα Φυτοπροστασίας & Διαχείρισης του Περιβάλλοντος
Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής
Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας & Εντομολογίας

Περίληψη

Η παρακολούθηση ενός αγρού αποτελεί μια χρονοβόρα και επίπονη, για τον Γεωπόνο, διαδικασία η οποία πρέπει να επαναλαμβάνεται συχνά κατά τη διάρκεια της καλλιεργητικής περιόδου. Η σύγχρονη τεχνολογία της τηλεπισκόπησης (remote sensing) έρχεται να συμπληρώσει την διαδικασία της επιτόπιας παρακολούθησης ενός αγρού κάνοντάς την πιο γρήγορη, εύκολη και δίνοντας καλύτερα αποτελέσματα. Η τηλεπισκόπηση περιλαμβάνει διαφόρων τύπων αισθητήρες (οπτικούς, θερμικούς, πολυφασματικούς, υπερφασματικούς) οι οποίοι προσαρτώνται πάνω σε Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών (ΣμηΕΑ) και ανιχνεύουν την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας από τα φυτά σε αρκετές φασματικές ζώνες, πέρα από το ορατό φάσμα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούν να ανιχνευθούν οι βιοχημικές αλλαγές που λαμβάνουν χώρα εντός φυτών που έχουν υποστεί κάποιου είδους καταπόνηση, είτε εξαιτίας κάποιου αβιοτικού παράγοντα (ξηρασία, έλλειψη θρεπτικών στοιχείων κ.ά.) είτε κάποιου βιοτικού (παθογόνοι μικροοργανισμοί, εχθροί κ.ά.), πριν την εμφάνιση των ορατών στον ανθρώπινο οφθαλμό συμπτωμάτων. Έπειτα, ο Γεωπόνος είναι σε θέση να παρακολουθήσει στοχευμένα τα φυτά στον αγρό και να πραγματοποιήσει ακριβέστερη διάγνωση.

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η λήψη δεδομένων με οπτικό, πολυφασματικό και θερμικό αισθητήρα, προσαρτημένους σε ΣμηΕΑ, από το δενδροκομείο του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Στόχος της αξιοποίησης των δεδομένων αυτών ήταν η δημιουργία χαρτών και ο υπολογισμός του δείκτη φυτοϋγείας NDVI, μέσω προγραμμάτων φωτογραμμετρίας και GIS, τα οποία δύνανται να συμβάλλουν στον εντοπισμό των φυτών του αγρού που είναι καταπονημένα, ακόμα και χωρίς να έχουν εμφανιστεί συμπτώματα αυτής της καταπόνησης. Τα αποτελέσματα της τηλεπισκόπησης χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω για σύγκριση με τα αποτελέσματα από επιτόπια παρατήρηση, ώστε να διαπιστωθεί εάν ο δείκτης NDVI μπορεί να καταδείξει δένδρα τα οποία βρίσκονται στο όριο καταπόνησης.

Οι τιμές του δείκτη NDVI υπέδειξαν ότι πολλά πυρηνόκαρπα και μηλοειδή δένδρα στο δενδροκομείο ήταν καταπονημένα. Τα αποτελέσματα της επιτόπιας παρατήρησης του οπωρώνα έδειξαν ότι πολλά δένδρα παρουσίαζαν συμπτωματολογική εικόνα προσβολής από καπνώδη (*Carponidis tenebrionis*), η οποία ενισχύθηκε και από την παρουσία ενηλίκων του εντόμου πάνω σε αυτά. Οι δύο αυτές μέθοδοι παρακολούθησης της υγείας μιας καλλιέργειας διέφεραν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους για όλες τις περιπτώσεις που ελέγχθηκαν. Επίσης, το ανάγλυφο του εδάφους βρέθηκε να μην επηρεάζει το μικροκλίμα της περιοχής και, κατ' επέκταση, την προσβολή από το έντομο, λόγω της πολύ μικρής κλίσης του εδάφους που επιβεβαιώθηκε από τον ορθοφωτοχάρτη που δημιουργήθηκε.

Η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων από τον δείκτη NDVI θα πρέπει να γίνει την προσεχή άνοιξη με οπτική παρατήρηση, προκειμένου να διαπιστωθεί εάν πράγματι ο δείκτης μπορεί να ανιχνεύσει καταπονημένα φυτά πριν την εμφάνιση των ορατών συμπτωμάτων. Όσο χρήσιμο εργαλείο κι αν είναι η χρήση αισθητήρων επί ΣμηΕΑ για την ανίχνευση της

φυτικής καταπόνησης, θα πρέπει να τονιστεί ότι μέσω αυτής της μεθόδου μπορεί να γίνει ανίχνευση αποκλειστικά της καταπόνησης και όχι του είδους αυτής (βιοτικής ή αβιοτικής), ή του ακριβούς αιτίου που την προκαλεί (έλλειψη θρεπτικών ή προσβολή από μύκητες, έντομα, νηματώδεις κ.α.).

Επιστημονική περιοχή: Ευφυής γεωργία

Λέξεις κλειδιά: ανίχνευση βιοτικής καταπόνησης, εντομολογική προσβολή, μηλοειδή, πολυφασματική κάμερα, πυρηνόκαρπα, ΣμηΕΑ, τηλεπισκόπηση

Use of data from optical, multispectral and thermal sensors on UAS for the detection and monitoring of entomological infestations in orchards

MSc Integrated Plant Protection and Environmental Management
Department of Faculty of Crop Science
Laboratory of Agricultural Zoology & Entomology

Abstract

Monitoring a crop is a time-consuming and laborious process for the Agronomist, which must be repeated frequently during the growing season. Remote sensing completes the on-site monitoring of a field making it faster, easier and giving better results. Various types of sensors (optical, thermal, multispectral, hyperspectral) can be used in remote sensing. These sensors are attached to Unmanned Aerial Systems (UASs) and are able to capture the reflectance of solar radiation of the plants in several spectral bands of the spectrum. The biochemical and structural changes that occur within stressed plants, either due to an abiotic stress factor (drought, lack of nutrients, etc.) or a biotic one (pathogenic microorganisms, pests, etc.), cause differences in the absorption and reflectance of the light. These changes can be detected by the sensors even before the appearance of the symptoms. As a result, the Agronomist can monitor and perform a more accurate field diagnosis in plants that have been recorded as stressed, based on the reflection of the light.

In the current thesis, optical, multispectral and thermal sensors were attached to a UAS in order to obtain aerial imagery data of the orchard of the Agricultural University of Athens. The data were processed with photogrammetry and GIS programs so as to create orthomosaic and elevation maps as well as calculate a vegetation index (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), which will help to locate the stressed trees of the orchard, even though the symptoms of this stress are not visible yet. The results of remote sensing were compared with the ones from on-site observations and diagnosis in order to determine whether the NDVI index could indicate trees that are on the stress limit or not.

The values of the vegetation index NDVI indicated that many stone fruits and apple trees of the orchard were stressed. The results of the on-site observation of the orchard showed that many trees had symptoms of flatheaded wood borer infestation (*Capnodis tenebrionis*), which was reinforced by the presence of adults of the insect on them. These two methods of monitoring the health of a crop had statistically significant differences in all of the cases tested. Also, the terrain was found not to affect the microclimate of the area and, consequently, the infestation by the insect, due to the very small slope of the terrain which was confirmed by the created ortho-photo map.

Confirmation of the results produced by the NDVI index should be done forthcoming spring with on-site observation, in order to determine if the index can indeed detect the stressed plants before the onset of visible symptoms. No matter how useful the remote sensing is for the detection of plant stress, it should be underlined that the method can only detect the stressed plants and not the type of the stress (biotic or abiotic) or the exact cause of it (lack of nutrients or infestation by fungi, insects, nematodes etc.).

Scientific field: Precision agriculture

Key words: aerial data, detection of biotic stress, GIS, multispectral imagery, pest, remote sensing, UAV

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε ορισμένους ανθρώπους χωρίς τους οποίους δεν θα είχε ολοκληρωθεί η παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη.

Πρώτα απ' όλα, ευχαριστώ τον επιβλέπωντα Καθηγητή κ. Γεώργιο Παπαδούλη για την αποδοχή και την ένταξή μου στην ερευνητική του ομάδα στο Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών καθώς και για την καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια του πειράματος. Επιπλέον, ευχαριστώ τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Διονύσιο Περδίκη και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Γεώργιο Κολιόπουλο τόσο για την αποδοχή τους να συμμετάσχουν στην εξεταστική μου επιτροπή όσο και για τις πολύτιμες διορθώσεις τους.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στον Δρ. Αντώνιο Τσαγκαράκη, μέλος του Εργαστηριακού Διδακτικού Προσωπικού του Εργαστηρίου Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας, για την στήριξη, την πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε κατά την διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου μελέτης και για όσο διάστημα ήμουν μέλος του εργαστηρίου και κυρίως, για την εμπιστοσύνη που έδειξε όλο αυτό το διάστημα προς το πρόσωπό μου.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους στο Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας, ιδιαίτερα τον μεταπτυχιακό φοιτητή Κάρελλα Κωνσταντίνο για την αμέριστη βοήθειά του στην πραγματοποίηση των πτήσεων με ΣμηΕΑ που απαιτήθηκαν για το πείραμα, τους υποψήφιους διδάκτορες Θάνου Ζωή και Σιδερή Βασίλη για τις πολύτιμες συμβουλές τους καθώς και την πτυχιούχο γεωπόνο Ράιδου Ελένη. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου για την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια του μεταπτυχιακού μου.

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

Περιεχόμενα

Table of Contents

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
1.1 Οι καλλιέργειες των πυρηνόκαρπων και των γιγαρτόκαρπων.....	6
1.1.1 Πυρηνόκαρπα.....	6
1.1.1.1 Η καλλιέργεια των πυρηνόκαρπων στην Ελλάδα	7
1.1.1.2 Οι σημαντικότεροι εχθροί των πυρηνόκαρπων.....	8
1.1.2 Γιγαρτόκαρπα	12
1.1.2.1 Η καλλιέργεια των γιγαρτόκαρπων στην Ελλάδα	13
1.1.2.2 Οι σημαντικότεροι εχθροί των γιγαρτόκαρπων	14
1.2 Φωτοσύνθεση.....	20
1.2.1 Το φως	20
1.2.2 Βασική αρχή της φωτοσύνθεσης.....	22
1.2.2.1 Φωτοσυνθετικές χρωστικές : δομή, απορρόφηση φωτονίων και διέγερση	22
1.2.2.2 Δομή της φωτοσυνθετικής συσκευής.....	25
1.2.2.3 Η μεταφορά ηλεκτρονίων κατά μήκος της φωτοσυνθετικής συσκευής – Οι «φωτεινές» αντιδράσεις.....	27
1.2.2.4 Προστασία και επιδιόρθωση της φωτοσυνθετικής συσκευής από την περίσσεια ηλιακής ακτινοβολίας.....	30
1.2.3 Καταπονήσεις.....	32
1.2.3.1 Αμυντικοί μηχανισμοί του φυτού ενάντια στις προσβολές εντόμων : Μηχανισμοί αποφυγής	33
1.2.3.2 Αμυντικοί μηχανισμοί του φυτού ενάντια στις προσβολές εντόμων : Μηχανισμοί ανθεκτικότητας.....	34
1.3 Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing)	35
1.3.1 Τηλεπισκόπηση στη Γεωπονία	36
1.3.2 Είδη χρησιμοποιούμενων αισθητήρων.....	37
1.3.3 Δείκτες φυτοϋγείας (Vegetation indices, VIs)	38
ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	43
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	44
3.1 Πτήση.....	44
3.2 Προγράμματα φωτογραμμετρίας και GIS	46
3.2.1 Πρόγραμμα Metashape.....	46
3.2.2 Πρόγραμμα QGIS.....	48
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	50
ΣΥΖΗΤΗΣΗ	55
5.1 Υπάρχουσα πρακτική ανίχνευσης καπνώνδη και συμβολή της τηλεπισκόπησης	55
5.2 Σύγκριση με την υπάρχουσα βιβλιογραφία	55
5.3 Το βασικό μειονέκτημα της τηλεπισκόπησης και αντιμετώπιση του προβλήματος.....	56

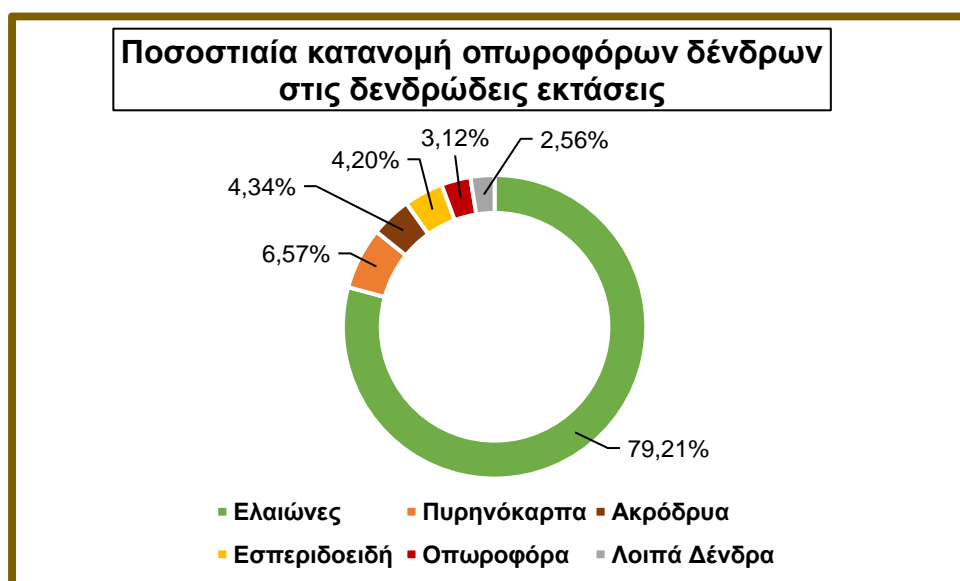
5.4 Συμπεράσματα.....57

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....59

Εισαγωγή

1.1 Οι καλλιέργειες των πυρηνόκαρπων και των γιγαρτόκαρπων

Οι δενδρώδεις καλλιέργειες στην Ελλάδα καλύπτουν σχεδόν το 1/3 των καλλιεργουμένων εκτάσεων (31,13%) και μάλιστα, τα πυρηνόκαρπα είναι η δεύτερη σημαντικότερη καλλιέργεια, μετά την ελιά, με τα ακρόδρυα, τα εσπεριδοειδή και τα οπωροφόρα δένδρα να ακολουθούν (Διάγραμμα 1) (Δελτίο Τύπου ΕΛΣΤΑΤ, 2021). Συνολικά, στην Ελλάδα καλλιεργούνται πάνω από 50 είδη καρποφόρων δένδρων (Θεριός και Δημάση-Θεριού, 2013). Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε σε πυρηνόκαρπα και γιγαρτόκαρπα και γι' αυτόν τον λόγο, παρακάτω δίνονται κάποιες βασικές πληροφορίες για αυτά.



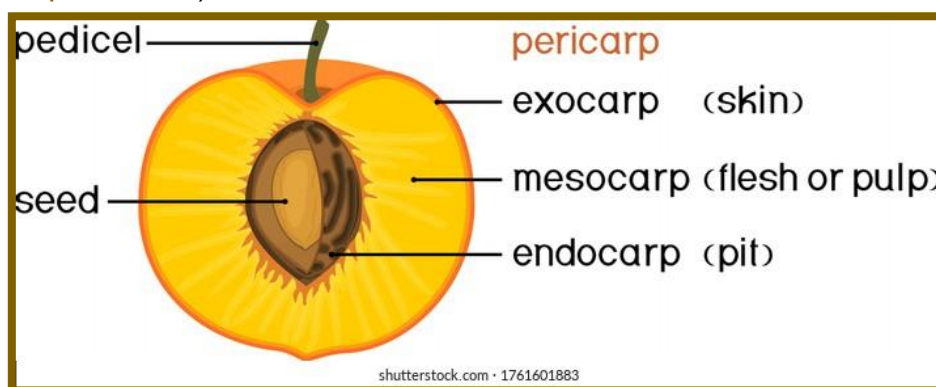
Διάγραμμα 1 : Οι καλλιέργειες οπωροφόρων στις οποίες κατανέμεται η καλλιεργούμενη με δένδρα έκταση γης για το έτος 2019 (Δελτίο Τύπου ΕΛΣΤΑΤ, 2021)

1.1.1 Πυρηνόκαρπα

Τα πυρηνόκαρπα είναι μία ομάδα δένδρων τα οποία κατάγονται από την εύκρατη ζώνη του βόρειου ημισφαιρίου. Η ροδακινιά και η νεκταρινιά, η κερασιά, η βυσσινιά, η δαμασκηνιά, η βερυκοκιά και η αμυγδαλιά ανήκουν στο είδος *Prunus* στην υποοικογένεια *Amygdaloideae* της οικογένειας *Rosaceae* ενώ εξαίρεση αποτελεί η κρανιά που ανήκει στο γένος *Cornus* της οικογένειας *Cornaceae* (Potter *et al.*, 2007· Milošević & Milošević, 2020). Η κύρια ζώνη καλλιέργειας των πυρηνόκαρπων είναι μεταξύ 60° και 35° γεωγραφικό πλάτος βόρεια και μεταξύ 30° και 50° γεωγραφικό μήκος νότια. Παρ' όλα αυτά, εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής, η καλλιέργεια των πυρηνόκαρπων έχει επεκταθεί και σε τροπικές και υποτροπικές ορεινές περιοχές, όπως είναι οι πρόποδες των Ιμαλαΐων στην Ινδία. (Potter *et al.*, 2007). Τα πυρηνόκαρπα καλλιεργούνται για τον καρπό τους ο οποίος μπορεί να καταναλωθεί ωμός, αποξηραμένος ή να χυμοποιηθεί (Θεριός και Δημάση-Θεριού, 2013· Milošević & Milošević, 2020).

Πρόκειται για φυλλοβόλα δένδρα των οποίων το ύψος κυμαίνεται από 4 μέχρι και 10 μέτρα. Τα πυρηνόκαρπα πλαγιοκαρπούν καθώς ο επάκριος οφθαλμός τους είναι πάντα

βλαστοφόρος. Τα κύρια καρποφόρα όργανά τους είναι : α) οι μικτοί βλαστοί, ετήσιοι βλαστοί μήκους μεγαλύτερου από είκοσι εκατοστά (>20 εκ.) που φέρουν παράπλευρους οφθαλμούς (τρεις οφθαλμοί ανά γόνατο εκ των οποίων ο κεντρικός είναι βλαστοφόρος και οι άλλοι δύο ανθοφόροι) β) τα λεπτοκλάδια, ετήσιοι βλαστοί μήκους έως 20 εκατοστά που φέρουν πλάγιους οφθαλμούς και γ) οι ανθοδέσμες ή ροζέττες, με διάρκεια ζωής από ένα (ροδακινιά) μέχρι και επτά χρόνια (κερασιά) αποτελούμενες από τέσσερις-πέντε ανθοφόρους οφθαλμούς και έναν κεντρικό βλαστοφόρο. Ο καρπός τους ονομάζεται δρύπη και είναι πραγματικός, δηλαδή προέρχεται αποκλειστικά από την διόγκωση της ωοθήκης μετά την γονιμοποίησή της. Τα μέρη του καρπού είναι το δερματώδες εξωκάρπιο, το μεσοκάρπιο (σάρκα) και το ξυλώδες ενδοκάρπιο (πυρήνας) τα οποία όλα μαζί αποτελούν το περικάρπιο (Εικόνα 1). Το ενδοκάρπιο είναι ξυλώδες ώστε να προστατεύεται το έμβρυο που υπάρχει εντός του (Θεριός και Δημάση-Θεριού, 2013).



Εικόνα 1 : Τα μέρη του καρπού των πυρηνόκαρπων (www.shutterstock.com)

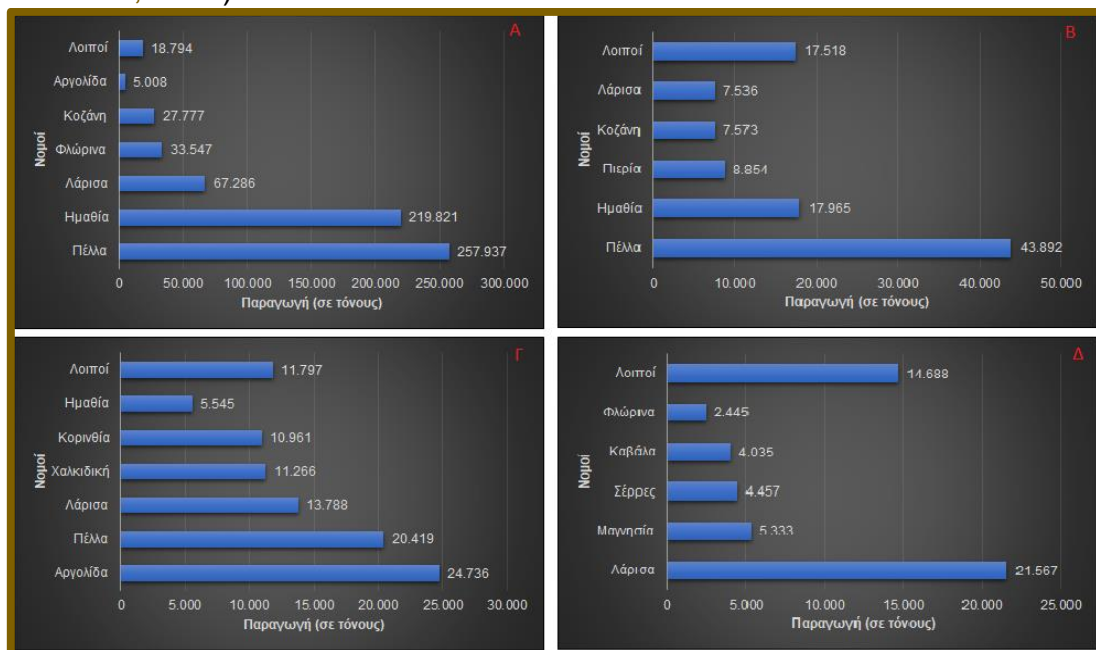
1.1.1.1 Η καλλιέργεια των πυρηνόκαρπων στην Ελλάδα

Σύμφωνα με στοιχεία του έτους 2019, η καλλιέργεια των πυρηνόκαρπων στην Ελλάδα καλύπτει έκταση ίση με 657.725 στρέμματα παρουσιάζοντας 0,1% μείωση συγκριτικά με την έκταση που καλλιεργούταν με πυρηνόκαρπα το 2018. Η ροδακινιά είναι η δημοφιλέστερη καλλιέργεια και ακολουθεί η κερασιά, η βερυκοκιά και τέλος, η βυσσινιά, κορομηλιά και δαμασκηνιά (Διάγραμμα 2) (Δελτίο Τύπου ΕΛΣΤΑΤ, 2021).



Διάγραμμα 2 : Οι σημαντικότερες καλλιέργειες πυρηνόκαρπων στην Ελλάδα και το ποσοστό καλλιεργούμενης γης που καταλαμβάνουν στο σύνολο της καλλιεργούμενης με πυρηνόκαρπα γης για το έτος 2019. Στα λοιπά πυρηνόκαρπα περιλαμβάνονται οι βυσσινιές, οι κορομηλιές και οι δαμασκηνιές (Δελτίο Τύπου ΕΛΣΤΑΤ, 2021)

Οι κυριότεροι νομοί παραγωγής πυρηνοκάρπων είναι οι νομοί Πέλλας, Ημαθίας, Λάρισας, Αργολίδας, Κοζάνης, Κορινθίας και Χαλκιδικής (Διάγραμμα 3) (Δελτίο Τύπου ΕΛΣΤΑΤ, 2021).



Διάγραμμα 3 : Η παραγωγή των σημαντικότερων, για την Ελλάδα, πυρηνοκάρπων ανά νομό για το έτος 2019. Α) Η παραγωγή των ροδάκινων / νεκταρινιών σε τόνους ανά νομό Β) Η παραγωγή των κερασιών σε τόνους ανά νομό Γ) Η παραγωγή των βερύκοκων σε τόνους ανά νομό Δ) Η παραγωγή των αμυγδάλων σε τόνους ανά νομό (Δελτίο Τύπου ΕΛΣΤΑΤ, 2021)

1.1.1.2 Οι σημαντικότεροι εχθροί των πυρηνοκάρπων

Ι. Καρπόκαψες

Cydia pomonella Linnaeus (Lepidoptera: Tortricidae) – σκουλήκι ή καρπόκαψα των μήλων

Έχει 2-3 γενιές ανά έτος. Προσβάλλει κυρίως τα μηλοειδή αλλά και ροδακινιά, βερυκοκιά, αμυγδαλιά, δαμασκηνιά. Διαχειμάζει σε βομβύκιο σε ρωγμές του φλοιού, καταφύγιο ή στο έδαφος. Τα ακμαία εμφανίζονται την άνοιξη και ωτοκοούν σε φύλλα, μικρούς βλαστούς ή μικρούς καρπούς. Οι προνύμφες εισέρχονται στον καρπό, συνήθως μέσω του κάλυκα, και καταναλώνουν την σάρκα (στα μηλοειδή, καταναλώνουν και τους τρυφερούς σπόρους στο κέντρο των καρπών). Έτσι, προκαλείται πρόωρη καρπόπτωση ή οι καρποί καθίστανται ακατάλληλοι για εμπορία (Εικόνα 2) (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).



Εικόνα 2 : Προνύμφη του *C. pomonella* σε καρπό γιγαρτόκαρπου (www.cydiapomonella.eu)

Grapholitha funebrana Treitschke (Lepidoptera: Tortricidae) – σκουλήκι ή καρπόκαψα των δαμάσκηνων

Έχει 2-3 γενιές ανά έτος. Προσβάλλει τα πυρηνόκαρπα και κυρίως, τα δαμάσκηνα. Διαχειμάζει σε βομβύκιο σε προστατευμένες θέσεις του φλοιού του δένδρου ή στο έδαφος. Τα ενήλικα εμφανίζονται τέλη άνοιξης με αρχές καλοκαιριού και ωτοκοούν στον ποδίσκο καρπών που είναι κοντά στην ωρίμανση ή στο περικάρπιο. Οι προνύμφες αναπτύσσονται τρεφόμενες από το μεσοκάρπιο (κοντά στο ενδοκάρπιο) ώστε έπειτα να εξέλθουν και να νυμφωθούν στον φλοιό ή στο έδαφος. Οι καρποί καθίστανται ακατάλληλοι για εμπορία και μπορεί να προκληθεί ακόμα και πρόωρη πτώση των καρπών (Εικόνα 3) (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).



Εικόνα 3 : Ζημιά από το έντομο *G. funebrana* σε δαμάσκηνο (www.bladmineerders.nl)

II. Βλαστορύκτες

Anarsia lineatella Zeller (Lepidoptera: Gelechiidae) – ανάρσια, σοκολατένιο σκουλήκι, βλαστορύκτης της ροδακινιάς

Έχει 2-3 γενιές ανά έτος. Κύριοι ξενιστές αυτού του βλαστορύκτη είναι η ροδακινιά, βερυκοκιά και η αμυγδαλιά και δευτερευόντως τα υπόλοιπα πυρηνόκαρπα. Διαχειμάζει ως νεαρή προνύμφη εντός στοάς που ορύσσει στον φλοιό, συνήθως στη μασχάλη κλαδίσκου ηλικίας 2-3 ετών και διαμέτρου 1-5 εκατοστών. Με την έκπτυξη των βλαστοφόρων οφθαλμών την άνοιξη, η προνύμφη εξέρχεται από την στοά και ορύσσει στοά σε νεοεκπυσσόμενο βλαστό, κατά μήκος αυτού,



Εικόνα 4 : Προνύμφη του βλαστορύκτη της ροδακινιάς μέσα σε στοά βλαστού (www.treefruit.wsu.edu)



Εικόνα 5 : Ζημιά από το *Anarsia lineatella* σε ροδάκινα (www.wiki.bugwood.org)

προκαλώντας την ξήραυσή του (Εικόνα 4). Τα ενήλικα εμφανίζονται Μάιο – Ιούνιο ωτοκτώντας σε βλαστούς ή ποδίσκους καρπών και οι προνύμφες αναπτύσσονται προσβάλλοντας κορυφές νεαρών βλαστών ή ανώριμους καρπούς, είτε καναταλώνοντάς τους επιφανειακά είτε καταναλώνοντας το στρώμα του μεσοκάρπιου κοντά στο ενδοκάρπιο αφού προηγουμένως έχουν εισέλθει στον καρπό. Τα συμπτώματα ομοιάζουν με προσβολή από το *Grapholitha molesta* (Εικόνα 5) (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

Grapholitha molesta Busck (Lepidoptera: Tortricidae) – βλαστορύκτης της ροδακινιάς

Έχει 5-6 γενιές ανά έτος. Προσβάλλει την ροδακινιά και δευτερευόντως, τα υπόλοιπα πυρηνόκαρπα. Διαχειμάζει ως αναπτυγμένη προνύμφη σε ρωγμές του φλοιού, κάτω από ξερά φύλλα ή σε άλλα καταφύγια. Τα ενήλικα ωτοκοούν την άνοιξη σε φύλλα και νεαρούς βλαστούς και οι προνύμφες αναπτύσσονται προκαλώντας ζημιά στους νεαρούς βλαστούς στους οποίους ορύσσουν στοές κατά μήκος του άξονά τους με την κορυφή αυτών να μαραίνεται ή να ξεραίνεται. Ομοίως με το *Anarsia lineatella*, οι επόμενες γενιές του

Grapholitha molesta μπορούν να δράσουν ως καρπόκαψες ζημιώνοντας σημαντικά τους καρπούς και μάλιστα, συχνά οι προσβεβλημένοι καρποί δεν διακρίνονται εξωτερικά κατά την συγκομιδή αφού η οπή εισόδου της προνύμφης βρίσκεται κοντά στον ποδίσκο (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

III. Μύγες των φρούτων

Ceratitis capitata Wiedemann (Diptera: Tephritidae) – μύγα της Μεσογείου, μεσογειακή μύγα των φρούτων

Έχει 3-7 γενιές ανά έτος. Προσβάλλει πολλά είδη οπωροφόρων (εξαιρετικά πολυφάγο)



Εικόνα 6 : Προνύμφες της μύγας της μεσογείου σε προσβεβλημένο ροδάκινο (www.naturepl.com)

– συμπεριλαμβανομένων των πυρηνοκάρπων (ροδακινιά, βερυκοκιά, κερασιά κλπ). Διαχειμάζει ως προνύμφη εντός των προσβεβλημένων καρπών ή ως νύμφη στο έδαφος. Την άνοιξη τα ακμαία άτομα τρέφονται με ζαχαρούχες και αζωτούχες ουσίες (νέκταρ, μελιτώματα) και ωτοκοούν στο περικάρπιο καρπών δημιουργώντας μικρή οπή με τον ωθέτη τους πάνω στα φρούτα και οι προνύμφες καταναλώνουν την σάρκα του σχεδόν ώριμου ή ώριμου καρπού προκειμένου να ολοκληρώσουν την ανάπτυξή τους και να ακολουθήσει η νύμφωσή τους εντός των καρπών ή στο έδαφος (Εικόνα 6). Οι προκαλούμενες από το έντομο ζημιές περιλαμβάνουν την διάβρωση και νέκρωση της

σάρκας των καρπών, την ανάπτυξη μυκήτων δευτερογενώς καθώς και την προσέλκυση για ωτοκία άλλων ειδών εντόμων (*Drosophila* spp., *Carpophilus* spp.) των οποίων οι προνύμφες επιταχύνουν την σήψη και καταστροφή του καρπού (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

Rhagoletis cerasi Linnaeus (Diptera: Tephritidae) – ραγολέτιδα, σκουλήκι ή μύγα των κερασιών

Έχει 1 γενιά ανά έτος. Προσβάλλει κυρίως την κερασιά και λιγότερο συχνά τη βυσσινιά. Διαχειμάζει ως νύμφη στο έδαφος και τα ενήλικα άτομα εμφανίζονται την άνοιξη και αρχίζουν να ωτοκοούν όταν οι καρποί αρχίζουν να ωριμάζουν (στάδιο αλλαγής χρώματος καρπού). Οι προνύμφες καταναλώνουν την σάρκα του καρπού ορύσσοντας στοά και όταν ολοκληρωθεί η ανάπτυξή της, πέφτει στο έδαφος όπου νυμφώνεται (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

IV. Υμενόπτερα

Eurytoma amygdali Enderlein (Hymenoptera: Eurytomidae) – ευρύτομο της αμυγδαλιάς

Έχει 1 γενιά ανά έτος. Προσβάλλει την αμυγδαλιά, είναι σοβαρός εχθρός της. Διαχειμάζει ως προνύμφη εντός των προσβεβλημένων καρπών οι οποίοι παραμένουν μουμιοποιημένοι πάνω στα δένδρα (Εικόνα 7). Τα ενήλικα άτομα εξέρχονται την άνοιξη από τους μουμιοποιημένους καρπούς που βρίσκονται είτε πάνω στα δένδρα είτε στο έδαφος



Εικόνα 7 : Μουμιοποιημένος καρπός αμυγδαλιάς με εμφανή την οπή εξόδου του ακμαίου (www.phototheque-fl.ctifl.fr)

ανοίγοντας σπή με τις γνάθους τους στον καρπό και ωτοκοούν στα μικρά καρπίδια. Η νεαρή προνύμφη καταναλώνει το έμβρυο και στη συνέχεια διαχειμάζει εντός του καρπού ο οποίος είτε πέφτει από το δένδρο είτε παραμένει σε αυτό και μαυρίζει εξωτερικά («μουμισιοποιημένος» καρπός). Όταν ο πληθυσμός είναι μεγάλος, προκαλείται μεγάλη ζημιά στην παραγωγή – σε ορισμένες ποικιλίες το ποσοστό των καρπών που ζημιώνονται μπορεί να ξεπεράσει το 90% (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

V. Ξυλοφάγα έντομα

Cossus cossus Linnaeus (Lepidoptera: Cossidae) – κόσσος

Έχει 1 γενιά ανά 2 ή 3 έτη. Προσβάλλει πολλά είδη δασικών και καρποφόρων δένδρων, ανάμεσά τους την κερασιά, δαμασκηλιά, ροδακινιά, βερυκοκιά. Διαχειμάζει ως προνύμφη μέσα στην στοά που δημιουργεί εσωτερικά των κλαδιών του δένδρου. Δημιουργεί νυμφικό θάλαμο εντός της στοάς για νύμφωση και τους μήνες Μάιο - Ιούλιο εξέρχεται το ακμαίο άτομο το οποίο εναποθέτει τα ωά του σε ρωγμές του φλοιού του δένδρου. Οι προνύμφες που εκκολάπτονται εισέρχονται στον φλοιό του δένδρου δημιουργώντας ανοδική στοά αλλά συνήθως φτάνουν μόνο μέχρι το κάμβιο την ίδια χρονιά, διαχειμάζουν και την επόμενη άνοιξη επεκτείνουν την στοά τους φτάνοντας ακόμα και μέχρι το ξύλο (Εικόνα 8). Οι στοές που δημιουργεί το έντομο είναι ελλειπτικές. Η προσβολή γίνεται αντιληπτή από τα κόκκινα αποχωρήματα που αφήνει η προνύμφη στη βάση του κορμού, κάτω από την στοά της (Εικόνα 9). Τα δένδρα που προσβάλλει συνήθως είναι ήδη εξασθενημένα ή προσβεβλημένα από άλλη ασθένεια / εχθρό κι έτσι, μπορεί να προκληθεί ακόμα και θάνατος αυτών των δένδρων. Σε πιο σπάνιες περιπτώσεις, σοβαρές ζημιές μπορούν να παρατηρηθούν και σε υγιή δένδρα (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).



Εικόνα 8 : Προσβολή του εντόμου σε δένδρο με εμφανείς τις σπές από τις οποίες γίνεται αντιληπτή η προσβολή εξαιτίας των παραγόμενων ρινισμάτων και των αποχωρημάτων της προνύμφης (www.gd.eppo.int)



Εικόνα 9 : Προνύμφες του εντόμου *Cossus cossus* έχοντας δημιουργήσει στοές στο ξύλο δένδρου (www.gd.eppo.int)

Capnodis tenebrionis Linnaeus (Coleoptera: Buprestidae) – καπνώδης των πυρηνόκαρπων, μυλωνάς, πλατυκέφαλο σκουλήκι

Έχει 1 γενιά ανά έτος ή ανά 2 έτη, σπανιότερα. Προσβάλλει τα περισσότερα είδη πυρηνόκαρπων δένδρων (ροδακινιά, βερυκοκιά, κερασιά, δαμασκηλιά, αμυγδαλιά) ενώ δευτερευόντως δύναται να προσβάλλει και τα μηλοειδή (Εικόνα 10). Διαχειμάζει ως προνύμφη εντός της στοάς που δημιουργεί στο ξύλο του δένδρου, αν και υπάρχουν αναφορές για διαχείμαση κι ως ενήλικο άτομο (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003). Αφού νυμφωθούν σε νυμφικό θάλαμο που σχηματίζουν εντός της στοάς τους, τα



Εικόνα 10 : Ενήλικο άτομο του εντόμου *Capnodis tenebrionis* πάνω σε κορμό πυρηνόκαρπου δένδρου στο δενδροκομείο του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών (Φωτογραφία από Ράϊδου Ελένη)

ενήλικα άτομα εξέρχονται την άνοιξη και διατρέφονται από τους οφθαλμούς των δένδρων, τον φλοιό των νεαρών κλαδίσκων και τους μίσχους των φύλλων. Καθ' όλη την διάρκεια του καλοκαιριού τα ακμαία ωτοκοούν σε ρωγμές του εδάφους κοντά στον λαιμό των δένδρων καθώς και πάνω στον λαιμό των δένδρων σε ρωγμές του φλοιού (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003· Mfarrej & Sharaf, 2010· Bari *et al.*, 2019). Οι προνύμφες που εκκολάπτονται από τα ωά είναι ξυλοφάγες κι έτσι εισέρχονται στο εσωτερικό στρώμα του φλοιού στο ύψος του λαιμού ή στις ρίζες και προχωρούν προς το κάμβιο και το ξύλο κινούμενες τόσο προς τα πάνω όσο και προς τα κάτω εντός του δένδρου, ακόμα και έως τις κεντρικές ρίζες (Εικόνα 11)



Εικόνα 11 : Προσβολή από καπνώδη στον λαιμό πυρηνοκάρπων. Αριστερά, εμφανής ζημιά κάτω από τον φλοιό του δένδρου. Δεξιά, σπές από τις προνυμφικές στοές (Επεξεργασία από Αραποστάθη Ευαγγελία)

(Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003· Bari *et al.*, 2019). Οι στοές είναι ακανόνιστες, ελικοειδείς και επικαλυπτόμενες με μήκος περίπου 30-45 εκατοστά ή και μεγαλύτερες.

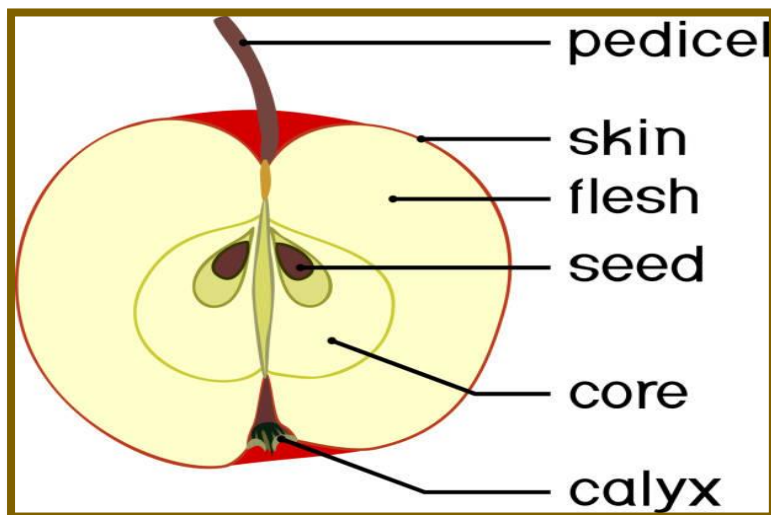
Η ζημιά που προκαλείται στον φλοιό, το ξύλο και τις κεντρικές ρίζες οδηγεί στον θάνατο των δένδρων στην πλειονότητα των περιπτώσεων προσβολής, ιδιαίτερως σε περιοχές με ξηρό καλοκαίρι και φθινόπωρο (Mfarrej & Sharaf, 2010). Όπως και στην περίπτωση του κόσσου, τα εξασθενημένα ή ήδη άρρωστα δένδρα καθώς και τα νεαρά δενδρύλλια είναι πιο ευπαθή (Mendel, Assael & Ben-Yehuda, 2003· Mfarrej & Sharaf, 2010· Bari *et al.*, 2019).

1.1.2 Γιγαρτόκαρπα

Τα δένδρα της ομάδας των γιγαρτοκάρπων κατάγονται, όπως και τα πυρηνόκαρπα, από την εύκρατη ζώνη του βόρειου ημισφαιρίου (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003· Blattný, 2003· Skog & Chu, 2003· Bell & Leitão, 2011). Αυτή η ομάδα αποτελείται από την μηλιά (*Malus* spp.), την αχλαδιά (*Pyrus* spp.) και την κυδωνιά (*Cydonia* sp.), γένη τα οποία κατατάσσονται στην υποοικογένεια Maloideae της οικογένειας Rosaceae στην οποία ανήκουν πολλά είδη καρποφόρων αλλά και καλλωπιστικών φυτών (Blattný, 2003· Skog & Chu, 2003· Bell & Leitão, 2011). Τα γιγαρτόκαρπα καλλιεργούνται στις περισσότερες περιοχές της εύκρατης ζώνης αλλά και σε χώρες όπως η Αργεντινή, η Νέα Ζηλανδία, η Νότια Αφρική. Επειδή κάποια από αυτά, όπως η μηλιά, απαιτούν έκθεση σε χαμηλές θερμοκρασίες τον χειμώνα για συγκεκριμένες ώρες προκειμένου να σπάσει ο λήθαργος των οφθαλμών την άνοιξη και να ακολουθήσει η άνθιση και η καρποφορία τους, η καλλιέργειά τους επεκτείνεται και σε χώρες με λιγότερο εύκρατο κλίμα, όπως είναι το Μεξικό, αρκεί αυτή να πραγματοποιείται σε περιοχές με υψόμετρο (Skog & Chu, 2003).

Τα γιγαρτόκαρπα είναι επίσης φυλλοβόλα δένδρα με ύψος που συνήθως κυμαίνεται από τα 4 (κυδωνιά) μέχρι και τα 12-15 μέτρα (μηλιά). Αντιθέτως με ό, τι συμβαίνει στα πυρηνόκαρπα, τα γιγαρτόκαρπα ακροκαρπούν, δηλαδή οι ανθοφόροι οφθαλμοί τους φέρονται επάκρια είτε σε μικτούς οφθαλμούς στα άκρα βλαστών προηγούμενου έτους είτε σε καρποφόρα όργανα. Τα κύρια καρποφόρα όργανά τους είναι : α) ο επάκριος ανθοφόρος οφθαλμός ο οποίος φέρεται σε λεπτοκλάδια και μικτούς οφθαλμούς β) η ανθοφόρος αιχμή, βλαστός μήκους 1-2 εκατοστών που φέρει επάκρια ανθοφόρο οφθαλμό γ) η λαμβρούρδα, βραχύ όργανο που φέρει την ουλή του καρπού που έπεσε ή συγκομίστηκε καθώς και μια νέα

πλευρική ανθοφόρο αιχμή και δ) ο ασκός, βραχύ όργανο που προκύπτει μετά την διόγκωση μεγαλύτερης ηλικίας λαμβούρδας. Ο καρπός των γιγαρτοκάρπων δεν είναι πραγματικός καρπός (true fruit), όπως αυτός των πυρηνοκάρπων, αλλά ψευδής (false fruit). Αυτό σημαίνει ότι το εδώδιμο μέρος του καρπού (σάρκα) δεν προέρχεται από διόγκωση της ωθήκης, όπως συμβαίνει στους πραγματικούς καρπούς, αλλά από την πάχυνση της βάσης του κάλυκα, της στεφάνης και των σημόνων (Εικόνα 12). Στην περίπτωση των ψευδών καρπών, η ωθήκη δεν είναι βρώσιμη (Θερίος και Δημάση-Θεριού, 2013).



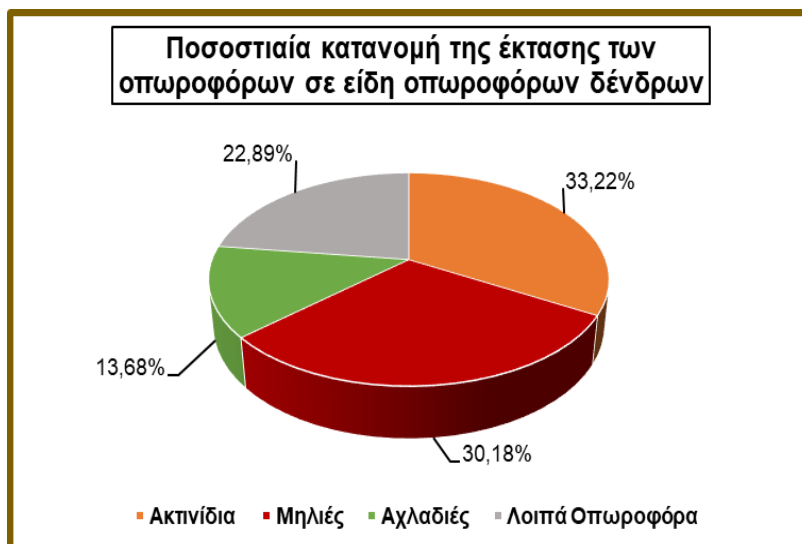
Εικόνα 12 : Τα μέρη του καρπού των γιγαρτοκάρπων δένδρων (www.shutterstock.com)

1.1.2.1 Η καλλιέργεια των γιγαρτοκάρπων στην Ελλάδα

Η ΕΛΣΤΑΤ στο Δελτίο Τύπου για την Ετήσια Γεωργική Στατιστική Έρευνα που πραγματοποιεί δεν εμφανίζει την ομάδα των γιγαρτοκάρπων δένδρων χωριστά αλλά την συμπτύσσει με τα άλλα οπωροφόρα (ακτινίδιο, ροδιά, συκιά). Έτσι, για το έτος 2019, στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται το ποσοστό καλλιεργούμενης έκτασης που καλύπτει καθένα από τα είδη των οπωροφόρων δένδρων (ακτινίδιο, μηλιά, αχλαδιά, κυδωνιά, ροδιά, συκιά) από την συνολική έκταση στην οποία αυτά καλλιεργούνται στην Ελλάδα, σύμφωνα με το Δελτίο Τύπου της ΕΛΣΤΑΤ (2021) (Διάγραμμα 4). Σε αυτό φαίνεται ότι το ακτινίδιο κατέχει την μεγαλύτερη έκταση καλλιέργειας με μικρή διαφορά από την μηλιά. Η αχλαδιά είναι η τρίτη σημαντικότερη καλλιέργεια οπωροφόρων στην Ελλάδα (Δελτίο Τύπου ΕΛΣΤΑΤ, 2021).

Οι κυριότεροι νομοί παραγωγής μήλων είναι οι νομοί Κοζάνης, Καστοριάς, Ημαθίας, Μαγνησίας, Λάρισας και Πέλλας ενώ παραγωγής αχλαδιών είναι οι νομοί Λάρισας, Ημαθίας, Πέλλας και Μαγνησίας (Διάγραμμα 5).

Διάγραμμα 4 : Οι σημαντικότερες καλλιέργειες οπωροφόρων στην Ελλάδα και το ποσοστό καλλιεργούμενης γης που καταλαμβάνουν στο σύνολο της καλλιεργούμενης με οπωροφόρα γης για το έτος 2019. Στα λοιπά οπωροφόρα περιλαμβάνονται οι κυδωνιές, οι ροδιές και οι συκιές (Δελτίο Τύπου ΕΛΣΤΑΤ, 2021)





Διάγραμμα 5 : Η παραγωγή μήλων και αχλαδιών ανά νομό στην Ελλάδα για το έτος 2019. Α) Η παραγωγή των μήλων σε τόνους ανά νομό Β) Η παραγωγή των αχλαδιών σε τόνους ανά νομό (Δελτίο Τύπου ΕΛΣΤΑΤ, 2021)

1.1.2.2 Οι σημαντικότεροι εχθροί των γιγαρτοκάρπων

Ι. Καρπόκαψες

Cydia pomonella Linnaeus (Lepidoptera: Tortricidae) – σκουλήκι ή καρπόκαψα των μήλων

Στην υποενότητα 2.1.1.2 έχει παρουσιαστεί ο βιολογικός κύκλος του εντόμου και η ζημιά που προκαλεί. Αποτελεί τον σημαντικότερο εχθρό των μηλοειδών διεθνώς (Εικόνα 13). Ο



Εικόνα 13 : Ενήλιο άτομο *Cydia pomonella* (www.stuff.co.nz)

κίνδυνος για την παραγωγή εξαρτάται από την πυκνότητα του πληθυσμού του εντόμου, τη δραστηριότητα και την εξέλιξη του πληθυσμού αναλόγως των κλιματικών συνθηκών αλλά και από την αφθονία των καρπών στα δένδρα. Γι' αυτό τον λόγο, ο πληθυσμός του εντόμου θα πρέπει να παρακολουθείται με φερομονικές παγίδες για τα ακμαία αρσενικά ή με λουρίδες νύμφωσης για την παρακολούθηση εμφάνισης των ακμαίων ατόμων την άνοιξη και να προγραμματίζεται εγκαίρως η αντιμετώπιση του εντόμου (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης,

2003).

II. Φυλλοδέτες - Φυλλορύκτες

Adoxophyes orana Fischer von Rösslerstamm (Lepidoptera: Tortricidae) – φυλλοδέτης

Έχει 3 γενιές ανά έτος. Προσβάλλει πολλά είδη καλλωπιστικών και καρποφόρων φυτών – με τις σημαντικότερες προκαλούμενες ζημιές σε μηλιά, αχλαδιά, κερασιά. Διαχειμάζει ως



Εικόνα 14 : Επιφανειακή διάβρωση σε μήλο που έχει προκληθεί από την διατροφή του εντόμου (www.bctfpg.ca)

προνύμφη 3^{ης} ηλικίας εντός του μετάξινου καταφυγίου που δημιουργεί σε ρωγμές του φλοιού του δένδρου, σε ξερούς φλοιούς ή αλλού. Η προνύμφη δραστηριοποιείται την άνοιξη τρεφόμενη από τους εκπτυσσόμενους οφθαλμούς, τα φύλλα, τις τρυφερές κορυφές των βλαστών, τα άνθη. Οι τελευταίας ηλικίας προνύμφες δύνανται να προσβάλλουν ακόμα και καρπούς, ιδιαιτέρως αυτούς που γεινιάζουν. Οι καρποί παραμορφώνονται ή εμφανίζουν επιφανειακές δερματώσεις (Εικόνα 14). Η νύμφωση λαμβάνει χώρα εντός του

καταφυγίου που έχει δημιουργήσει ανάμεσα από τα προσβεβλημένα όργανα. Συχνά αναπτύσσει πυκνούς πληθυσμούς σε περιοχές που έχουν πλούσια και παρατεταμένη βλάστηση (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

Archips rosana Linnaeus (Lepidoptera: Tortricidae) – φυλλοδέτης

Έχει 1 γενιά ανά έτος. Προσβάλλει πολλά είδη οπωροφόρων, ανάμεσά τους την μηλιά, την αχλαδιά αλλά και τα πυρηνόκαρπα και την φουντουκιά. Διαχειμάζει ως ωό πάνω στον φλοιό του προσβεβλημένου δένδρου. Οι προνύμφες εκκολάπτονται Μάρτιο - Απρίλιο και αναπτύσσονται καταναλώνοντας τους εκπτυσσόμενους οφθαλμούς, τα φύλλα, κορυφές βλαστών, άνθη και νεαρούς καρπούς αφού έχουν δημιουργήσει προηγουμένως ένα καταφύγιο δένοντας ορισμένα φυτικά μέρη μαζί (συνήθως φύλλα, κορυφές βλαστών) με τα μετάξινα νημάτια τα οποία παράγουν. Γύρω στον Μάιο, οι προνύμφες θα νυμφωθούν μέσα στα καταφύγιά τους και τα ακμαία άτομα θα εξέλθουν αρχές καλοκαιριού για να ωτοκήσουν στον φλοιό των προσβεβλημένων δένδρων, με τα ωά να παραμένουν σε διάπαυση μέχρι την επόμενη άνοιξη. Οι ζημιές που προκαλεί το έντομο είναι ανάλογες του πληθυσμού του. Η προσβολή μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή των καρπών, όταν αυτοί είναι πολύ μικροί, ή επιφανειακή διάβρωση και παραμόρφωση μειώνοντας την εμπορική τους αξία (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

Phyllonorycter blancardella Fabricius (Lepidoptera: Gracillariidae – νάρκη των γιγαρτόκαρπων



Εικόνα 15 : Όψη ψηφιδωτού στην άνω επιφάνεια φύλλου μηλιάς προκαλούμενη από την δραστηριότητα του φυλλοδέτη *P. blancardella* (www.invasive.org)

Έχει 3-4 γενιές ανά έτος. Προσβάλλει κυρίως τα μηλοειδή (μηλιά, αχλαδιά, κυδωνιά). Διαχειμάζει ως νύμφη σε βομβύκιο εντός της προνυμφικής στοάς, στα πεσμένα ξερά φύλλα. Τα ενήλικα άτομα της 1^{ης} γενιάς εμφανίζονται κοντά στην άνθιση των μηλοειδών (άνοιξη), ωτοκοούν στην κάτω επιφάνεια των φύλλων και καθεμία από τις προνύμφες εισέρχεται σε φύλλο ορύσσοντας ωοειδή στοά, η οποία φτάνει ως την άνω επιδερμίδα του φύλλου, κι έτσι, η άνω επιφάνεια του φύλλου έχει την όψη ψηφιδωτού με υπόλευκες ή ανοιχτοπράσινες κηλίδες (Εικόνα 15). Τελικά, η προνύμφη νυμφώνεται στην προνυμφική στοά με το

πρόσθιο τμήμα της να βρίσκεται εκτός στοάς (εξέρχει από την επιφάνεια του φύλλου). Οι επόμενες γενιές έχουν αλληλοεπικάλυψη (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

Phyllonorycter corylifoliella Hübner (Lepidoptera: Gracillariidae – νάρκη των γιγαρτόκαρπων

Ο βιολογικός κύκλος καθώς και οι ξενιστές αυτού του εντόμου είναι παρόμοια με αυτή του *P. blancardella*. Τα ακμαία εναποθέτουν τα ωά τους στην άνω επιφάνεια των φύλλων, σε αντίθεση με το είδος *P. blancardella* το οποίο τα εναποθέτει στην κάτω επιφάνεια των φύλλων. Επιπλέον, το σχήμα της στοάς του εντόμου *P. corylifoliella* διαφέρει καθώς δύναται να είναι ατρακτοειδές, ακανόνιστο, ωοειδές ή ασύμμετρο (Εικόνα 16). Η νύμφωση λαμβάνει χώρα πάλι εντός της προνυμφικής στοάς, σε ένα πυκνό βομβύκιο που υφαίνει η προνύμφη της τελευταίας ηλικίας, προκαλώντας το δίπλωμα του ελάσματος του φύλλου προς τα πάνω (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).



Εικόνα 16 : Ακανόνιστη στοά σε φύλλο προσβεβλημένο από το έντομο *Phyllonorycter corylifoliella* (www.observation.org)

Leucoptera malifoliella O. G. Costa (Lepidoptera: Lyonetiidae) – φυλλορύκτης των μηλοειδών

Έχει 3-4 γενιές ανά έτος. Προτιμά κυρίως την μηλιά και την αχλαδιά αλλά γενικά θεωρείται πολυφάγο με ξενιστές πολλά πλατύφυλλα δασικά και καρποφόρα δένδρα (γιγαρτόκαρπα, πυρηνόκαρπα). Διαχειμάζει ως νύμφη σε χαρακτηριστικό υπόλευκο βομβύκιο σχήματος Η, κάτω από ξερούς φλοιούς ή άλλα καταφύγια. Τα ενήλικα εμφανίζονται την άνοιξη, περίοδος κατά την οποία ωτοκοούν τοποθετώντας τα ωά του ανάμεσα σε πλάγιες νευρώσεις της κάτω επιφάνειας των φύλλων. Η νεοεκκολαπτόμενη προνύμφη εισέρχεται στο φύλλο και εγκαθίσταται στο πασσαλώδες παρέγχυμα όπου δημιουργεί κυκλική στοά η οποία σταδιακά αυξάνεται σε διάμετρο, με την αλλαγή της ηλικίας της προνύμφης (Εικόνα 17). Στα φύλλα της μηλιάς οι στοές είναι συνήθως καστανές με ανοιχτόχρωμη περίμετρο. Όταν η προνύμφη συμπληρώσει την ανάπτυξή της, εκκρίνει ένα



Εικόνα 17 : Η κυκλική στοά που σχηματίζει προνύμφη του εντόμου και τα υπόλευκα βομβύκια σχήματος Η των νυμφών (www.insecta.pro)

νήμα από το οποίο κρέμεται προκειμένου να φτάσει στην επιλεγμένη θέση νύμφωσης – συνήθως στον φλοιό ή στους καρπούς και σπανιότερα στα φύλλα – και στη συνέχεια η άνω επιδερμίδα του φύλλου στη θέση της στοάς ξεραίνεται και μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε ολική ξήρανση του φύλλου. Σε αυξημένους πληθυσμούς (8-10 προνύμφες / φύλλο) μπορεί να προκληθεί φυλλόπτωση ή ακόμα και πλήρης καταστροφή του φυλλώματος της τρέχουσας χρονιάς, αν και σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις. Μεγαλύτερες ζημιές παρατηρούνται στα φύλλα της άνω κόμης του δένδρου καθώς και σε καρπούς με βομβύκια στον ποδίσκο ή στον κάλυκα των οποίων μειώνεται η εμπορική τους αξία (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

Lyonetia clerkella Linnaeus (Lepidoptera: Lyonetiidae) – φυλλορύκτης της μηλιάς

Έχει 2-3 γενιές ανά έτος. Κύριοι ξενιστές του είναι η μηλιά και η κερασιά αλλά προσβάλλει γενικά τα γιγαρτόκαρπα και πυρηνόκαρπα καθώς και ορισμένα πλατύφυλλα.



Εικόνα 18 : Η οφιοειδής προνυμφική στοά του φυλλορύκτη της μηλιάς (www.irishmoths.net)

Διαχειμάζει ως ενήλικο σε καταφύγια και την άνοιξη δραστηριοποιείται. Τα ωά εναποθέτονται μονήρη σε σχισμές που δημιουργεί το ακμαίο με τον εκτατό ωοθήτη του στην κάτω επιφάνεια του φύλλου. Κατ' επέκταση, η προνύμφη ορύσσει οφιοειδή στοά στο φύλλο με το χρώμα της αρχικά να είναι κίτρινο και στη συνέχεια να γίνεται καστανό (Εικόνα 18).

Η νύμφωση λαμβάνει χώρα σε βομβύκιο στην κάτω επιφάνεια διαφορετικού φύλλου. Όταν ο πληθυσμός του εντόμου είναι αυξημένος και τα προσβεβλημένα δένδρα νεαρά, η ανάπτυξη τους μπορεί να καθυστερήσει. Επίσης, όταν οι προνυμφικές στοές είναι διασταυρούμενες και διασχίζουν το κεντρικό ή

πλάγια νεύρα, μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα σε φυσιολογικές λειτουργίες του φύλλου που μπορεί να οδηγήσουν μέχρι και σε φυλλόπτωση (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

Yponomeuta malinellus Zeller (Lepidoptera: Yponomeutidae) – υπονομευτής της μηλιάς

Έχει 1 γενιά ανά έτος. Προσβάλλει κυρίως τη μηλιά. Διαχειμάζει ως προνύμφη 1^{ης} ηλικίας ομαδικά, κάτω από τα κελύφη των ωών της ωόπλακας από τα οποία εκκολάφθηκαν. Με την εμφάνιση των πρώτων τρυφερών φύλλων στα δένδρα, οι προνύμφες αρχίζουν να δραστηριοποιούνται και να διατρέφονται ομαδικά. Ορύσσουν ομαδικές στοές στα φύλλα από τα οποία καταναλώνουν το παρέγχυμα αφήνοντας την άνω και κάτω επιδερμίδα ανέγγιχτη. Σε μεγαλύτερη ηλικία, μετακινούνται στην κορυφή τρυφερού βλαστού όπου δένουν τα φύλλα μεταξύ τους με την βοήθεια των μετάξιων νημάτων που παράγουν κι έτσι, δημιουργούν μια αραιή φωλιά όπου και συνεχίζουν την κατανάλωση και καταστροφή του φυλλώματος. Σε σπάνιες περιπτώσεις δύνανται να προκαλέσουν ζημιά και στον φλοιό τρυφερών βλαστών. Όταν καταναλώσουν τα φύλλα ενός βλαστού, μετακινούνται σε άλλον όπου κατασκευάζουν και πάλι αραιή ομαδική φωλιά. Τελικά νυμφώνονται μέσα σε βομβύκιο που δημιουργούν εντός της αραιής φωλιάς. Τα ακμαία ωοτοκούν τους μήνες Ιούνιο - Ιούλιο κατά ομάδες (ωόπλακες) στο φλοιό κλαδίσκων δύο ετών και πιο συγκεκριμένα στη μασχάλη οφθαλμών ή κλαδίσκων. Ο υπονομευτής της μηλιάς δύναται να προκαλέσει σχεδόν πλήρη αποφύλλωση των δένδρων (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

III. Ημίπτερα

Cacopsylla pyri Linnaeus (Hemiptera: Psyllidae) – ψύλλα της αχλαδιάς

Έχει 4-6 γενιές ανά έτος. Προσβάλλει την αχλαδιά. Διαχειμάζει ως ενήλικο σε καταφύγια (πάνω στα δένδρα, σε πεσμένα ξερά φύλλα και αλλού). Οι νύμφες εκκολάπτονται όταν αρχίζει η έκπτυξη των σύνθετων οφθαλμών του δένδρου την άνοιξη, εισέρχονται στους εκπτυσσόμενους οφθαλμούς και μυζούν τους χυμούς από τα νεαρά φύλλα και άνθη. Αργότερα μετακινούνται στα φύλλα όπου εγκαθίστανται τρεφόμενες από τους χυμούς των φύλλων και προστατεύονται από σταγόνες μελιτωμάτων που εκκρίνουν. Το μέγιστο του πληθυσμού παρατηρείται συνήθως τέλη Μαρτίου - μέσα Απριλίου και στην συνέχεια,



Εικόνα 19 : Μελιτώδεις εκκρίσεις σε φύλλο και καρπό αχλαδιάς καθώς και εμφανείς νεκρώσεις στο φύλλο από την δράση της ψύλλας της αχλαδιάς (www.treefruit.wsu.edu)

εμφανίζονται τα ενήλικα άτομα. Τις περισσότερες φορές, τα ωά εναποθέτονται από τα ακμαία άτομα κατά μήκος του κεντρικού νεύρου στην κάτω επιφάνεια των φύλλων. Τα ενήλικα άτομα της διαπαύουσας γενιάς εμφανίζονται τέλη Σεπτεμβρίου - αρχές Οκτωβρίου και είναι σκοτεινόχρωμα. Τα μέγιστα του πληθυσμού της ψύλλας μέσα στην καλλιεργητική περίοδο παρατηρούνται την άνοιξη και το φθινόπωρο. Οι ζημιές που προκαλούνται από την δράση του εντόμου είναι άμεσες και έμμεσες. Άμεσα, το έντομο προκαλεί κολλώδεις καρπούς, χλωρώσεις και συχνά νεκρώσεις των φύλλων στα σημεία προσβολής, καθυστερημένη ανάπτυξη της βλάστησης ή και φυλλόπτωση (Εικόνα 19). Έμμεσα, δύναται να μεταδώσει παθογόνα (ιούς, ιοειδή) εξαιτίας του τύπου των

στοματικών του μορίων, ευνοεί την ανάπτυξη μυκήτων της καπνιάς λόγω των μελιτωδών απεκκρίσεών του και τέλος, υποβαθμίζει ποιοτικά τους καρπούς είτε λόγω έκκρισης των μελιτωμάτων είτε λόγω της επακόλουθης ανάπτυξης μυκήτων της καπνιάς (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

IV. Υμενόπτερα

Hoplocampa brevis Klug (Hymenoptera: Tenthredinidae) – οπλοκάμπη της αχλαδιάς

Έχει 1 γενιά ανά έτος. Προσβάλλει την αχλαδιά. Διαχειμάζει ως αναπτυγμένη προνύμφη σε βομβύκιο στο έδαφος. Τα ενήλικα άτομα του εντόμου εμφανίζονται την εποχή που ανθίζει η αχλαδιά (μέσα Μαρτίου - αρχές Απριλίου), τρέφονται με γύρη και νέκταρ, συζευγνύονται και ωτοκοούν στον κάλυκα του άνθους, με τη βοήθεια του ωθέτη τους με τον οποίο κάνουν μια σχισμή. Η νεαρή προνύμφη ορύσσει περιμετρική στοά στα επιφανειακά στρώματα του αναπτυσσόμενου καρπού (Εικόνα 20). Στην επόμενη ηλικία της κατευθύνεται προς το κέντρο του μικρού καρπού το οποίο καταναλώνει. Συνήθως η προνυμφική ανάπτυξη ολοκληρώνεται σε έναν καρπό αλλά έχει παρατηρηθεί και η προσβολή δεύτερου καρπού στον οποίο εισέρχεται και καταναλώνει το κεντρικό μέρος και τα γίγαρτα πριν ανοίξει οπή εξόδου και πέσει στο έδαφος για να νυμφωθεί σε μικρό βάθος. Η



Εικόνα 20 : Καρπός αχλαδιάς προσβεβλημένος από προνύμφη του εντόμου *Hoplocampa brevis*. Διακρίνεται η προνύμφη η οποία εξέρχεται από τον καρπό έχοντας δημιουργήσει οπή εξόδου (www.extension.usu.edu)

ζημιά είναι αξιόλογη όταν το έντομο αναπτύξει πυκνό πληθυσμό καθώς οι προσβεβλημένοι καρποί παραμορφώνονται, εμφανίζουν καστανές κηλίδες και τελικά πέφτουν (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

Hoplocampa testudinea Klug (Hymenoptera: Tenthredinidae) – σπλοκάμπη της μηλιάς

Έχει 1 γενιά ανά έτος. Προσβάλλει την μηλιά. Η προνύμφη προκαλεί ζημιά σε άνθη και νεαρούς καρπούς της μηλιάς προσβάλλοντας με τον ίδιο τρόπο που προσβάλλει το είδος *H. Brevis* την αχλαδιά. Η εμφάνιση των προσβεβλημένων καρπών είναι διαφορετική αφού αυτά παρουσιάζουν οφιοειδή επιμήκη ουλή εξαιτίας της επιφανειακής στοάς που ορύσσει η προνύμφη (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

V. Ξυλοφάγα έντομα

Synathedon myopaeformis Borkhausen (Lepidoptera: Sesiidae) – σέζια των γιγαρτόκαρπων

Έχει 1 γενιά ανά έτος. Προσβάλλει κυρίως τα μηλοειδή αλλά μπορεί να βρεθεί και σε κερασιά, βερυκοκιά, δαμασκηλιά. Διαχειμάζει ως προνύμφη εντός της στοάς που δημιουργεί κάτω από τον φλοιό του προσβεβλημένου δένδρου. Ακολουθεί η νύμφωση εντός βομβύκιου που σχηματίζει μέσα στην προνυμφική στοά και στη συνέχεια, εξέρχεται το ενήλικο άτομο από την οπή εξόδου, την οποία έχει δημιουργήσει η προνύμφη στο φλοιό πριν τη νύμφωσή της. Αφού εξέλθει το ακμαίο άτομο, το πρόσθιο μέρος του νυμφικού δερματίου εξέχει από τον φλοιό ενώ το οπίσθιο μέρος του είναι σφηνωμένο στην οπή εξόδου. Μέσα στο καλοκαίρι παρατηρείται το μέγιστο του πληθυσμού του εντόμου. Τα ενήλικα άτομα τρέφονται από χυμούς των ανθέων διαφόρων φυτών και ωτοκοούν Ιούνιο - Ιούλιο πάνω σε τομές κλαδέματος, σε θέσεις των κλάδων που φέρουν έλκη ή πληγές, γενικότερα σε εξασθενημένα μέρη του δένδρου, αλλά και σε εσοχές υγιούς φλοιού. Η προνύμφη εισέρχεται στον φλοιό του δένδρου ορύσσοντας συνήθως οφιοειδή στοά σε φλοιό και κάμβιο (Εικόνα 21). Στις περισσότερες περιπτώσεις, το έντομο προσβάλλει γηρασμένα ή εξασθενημένα δένδρα ή νεαρά δένδρα στο σημείο ένωσης εμβολίου – υποκειμένου. Η ζημιά που προκαλεί το έντομο μπορεί να οδηγήσει σε θάνατο κλάδων ή ολόκληρων των εξασθενημένων ή νεαρών δένδρων, ιδιαίτερα εάν η δράση του εντόμου συνδυαστεί και με φυτοπαθογόνους μικροοργανισμούς. Το μηχανικό κλάδεμα αυξάνει τις προσβολές διότι τα δένδρα καθίστανται επιδεκτικά προσβολής εξαιτίας των περισσότερων και μεγαλύτερων τραυμάτων που δημιουργούνται (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).



Εικόνα 21 : Προνυμφική στοά του εντόμου σέζια κάτω από τον φλοιό δένδρου (Noma *et al.*, 2010)

Zeuzera pyrina Linnaeus (Lepidoptera: Cossidae) – ζευζέρα

Έχει 1 γενιά ανά 2 έτη. Προσβάλλει την αχλαδιά, την μηλιά, την ελιά και λιγότερο την κυδωνιά, την δαμασκηλιά, την καρυδιά και άλλα καρποφόρα, δασικά και καλλωπιστικά δένδρα και θάμνους, δηλαδή είναι εξαιρετικά πολυφάγο. Διαχειμάζει ως προνύμφη μέσα στον κορμό του δένδρου. Η νύμφωση λαμβάνει χώρα την άνοιξη εντός της προνυμφικής στοάς,



Εικόνα 22 : Προσβολή μηλιάς από ζευζέρα με εμφανές το σημείο της στοάς καθώς και των πορτοκαλί αποχωρημάτων του εντόμου και των ρινισμάτων ξύλου κάτω από την οπή της στοάς (www.gd.eppo.int)

κοντά στην επιφάνεια του φλοιού. Τα ακμαία άτομα εμφανίζονται Ιούνιο - Αύγουστο και εναποθέτουν τα ωά τους σε ομάδες ή μονήρη σε ρωγμές του φλοιού του κορμού ή των κλάδων. Η προνύμφη ορύσσει στοά, μήκους 25 εκατοστών ή και μεγαλύτερη, εντός του δένδρου φτάνοντας ακόμα και ως την εντεριώνη. Χαρακτηριστικό της προσβολής είναι το γεγονός ότι η προνύμφη διατηρεί ανοιχτή μια οπή της στοάς στον φλοιό και αποβάλλει από αυτήν τα πορτοκαλί κοκκώδη αποχωρήματά της καθώς και τα ρινίσματα ξύλου που προκύπτουν από την δραστηριότητά της (Εικόνα 22). Η προνύμφη ολοκληρώνει την ανάπτυξή της συνήθως το φθινόπωρο του επόμενου έτους. Ομοίως με ό, τι συμβαίνει με το *Synanthedon myo-raeformis*, η προνύμφη νυμφώνεται στη θέση της οπής της στοάς και όταν το ενήλικο άτομο εξέρχεται την άνοιξη, μέρος του νυμφικού εκδύματος είναι εμφανές από την επιφάνεια του φλοιού. Η ζευζέρα προκαλεί πολύ σημαντικές ζημιές στα δένδρα, συγκεκριμένα στα γιγαρτόκαρπα στην ηπειρωτική Ελλάδα και στην ελιά στα νησιά. Η προνύμφη προκαλεί ξηράνσεις κλάδων και βραχίωνων οι οποίοι μπορεί να σπάσουν από δυνατό άνεμο ενώ σε έντονες προσβολές μπορεί να προκαλέσει την ξήρανση ακόμα και ολόκληρου νεαρού δένδρου ηλικίας 1-3 ετών (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

Cossus cossus Linnaeus (Lepidoptera: Cossidae) – κόσσος

Ο βιολογικός κύκλος του εντόμου, οι ξενιστές που προσβάλλει και η προκαλούμενη ζημιά έχουν περιγραφεί στο 2.1.1.2. Όπως και το *Zeuzera pyrina*, έχει παρατηρηθεί ότι ο κόσσος προκαλεί ζημιές κυρίως στα καρποφόρα Rosaceae στην Ελλάδα ενώ στη νησιωτική, ζημιώνονται περισσότερο τα ελαιόδενδρα από την δράση του εντόμου, χωρίς να είναι γνωστή η αιτία που αυτό συμβαίνει (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

Capnodis tenebrionis Linnaeus (Coleoptera: Buprestidae) – καπνώδης των πυρηνόκαρπων, μυλωνάς, πλατυκέφαλο σκουλήκι

Ομοίως με τον κόσσο, ο βιολογικός κύκλος, οι ξενιστές και οι ζημιές που προκαλεί το έντομο έχουν περιγραφεί στο 2.1.1.2. Τα γιγαρτόκαρπα προσβάλλονται δευτερογενώς από το συγκεκριμένο έντομο και αν υπάρχουν πυρηνόκαρπα στην περιοχή, συνήθως η προσβολή θα ξεκινήσει από αυτά και στη συνέχεια θα συνεχιστεί και στα μηλοειδή. Προκαλεί σοβαρά προβλήματα στην τροφοδοσία του δένδρου με νερό, αφού η προνύμφη καταστρέφει τα αγγεία του ξύλου, αλλά και στο φύλλωμα, αφού τα ενήλικα άτομα διατρέφονται από αυτό (Κατσόγιαννος και Τζανακάκης, 2003).

1.2 Φωτοσύνθεση

1.2.1 Το φως

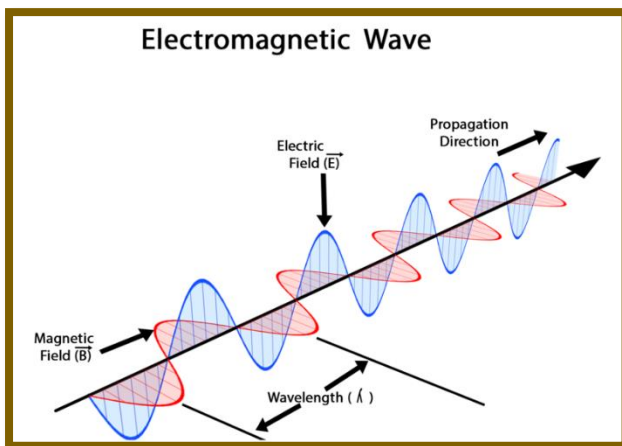
Το φως κατέχει καταλυτικό ρόλο στην διαδικασία της φωτοσύνθεσης, την μοναδική βιολογική διαδικασία μέσω της οποίας μπορεί να δεσμευτεί η ηλιακή ενέργεια και να παραχθούν ενώσεις υψηλής ενέργειας καθώς και να αποθηκευτεί μέρος της ηλιακής ενέργειας αφού προηγουμένως μετατραπεί σε χημική ενέργεια. Προτού περιγραφεί

αναλυτικά η διαδικασία της φωτοσύνθεσης, θα γίνει αναφορά σε ορισμένα γνωρίσματα του φωτός (Blankenship, 2010).

Το φως έχει διττή φύση, κυματική και σωματιδιακή. Ως κύμα, το φως είναι ένα εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα στο οποίο τόσο τα ηλεκτρικά όσο και τα μαγνητικά πεδία ταλαντώνονται κάθετα ως προς την διάδοσή του και έχοντας γωνία 90° μεταξύ τους (Εικόνα 23). Όπως όλα τα κύματα, λοιπόν, χαρακτηρίζεται από το μήκος κύματος και την συχνότητα. Το μήκος κύματος (λ) ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών ενός κύματος ενώ η συχνότητα ενός κύματος (ν ή f) είναι ο αριθμός των κορυφών του κύματος που περνά από ένα ακίνητο σημείο σε δεδομένο χρόνο. Τα δύο αυτά μεγέθη έχουν αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ τους και συνδέονται με την παρακάτω σχέση δίνοντας την ταχύτητα του κύματος :

$$c = \lambda \times \nu$$

όπου σε αυτή την περίπτωση είναι η ταχύτητα του φωτός, εξαιτίας της ταυτόχρονης σωματιδιακής φύσης του φωτός, η οποία ισούται με 3×10^8 m/s.



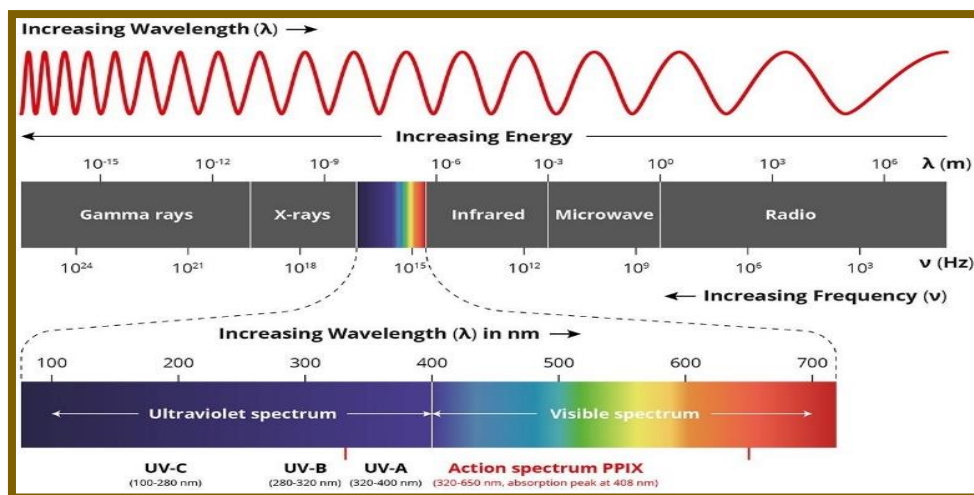
Εικόνα 23 : Το φως ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα (www.differencebetween.com)

Ως σωματίδιο, το φως ονομάζεται φωτόνιο και περιέχει ποσό ενέργειας (quantum) το οποίο μπορεί να υπολογιστεί από το νόμο του Planck :

$$E = h \times \nu$$

όπου h η σταθερά του Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J sec) και ν η συχνότητα του φωτός (Blankenship, 2010).

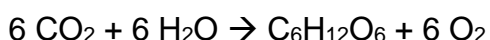
Ορατή στον ανθρώπινο οφθαλμό είναι μόνο η περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που εκτείνεται από τα 400 μέχρι και τα 800 nm περίπου (455-495 nm μπλε, 540-580 nm πράσινο, 658-678 nm κόκκινο, 707-727 nm red edge) και ονομάζεται περιοχή του ορατού φάσματος, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 24 (Blankenship, 2010· Dash *et al.*, 2017). Η ενέργεια του φωτός αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας και την μείωση του μήκους του κύματος επομένως το φως μικρού μήκους κύματος έχει υψηλή συχνότητα και περιέχει υψηλό ποσό ενέργειας ενώ το αντίστροφο συμβαίνει στο φως μεγάλου μήκους κύματος (Εικόνα 24) (Blankenship, 2010).



Εικόνα 24 : Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (www.byjus.com)

1.2.2 Βασική αρχή της φωτοσύνθεσης

Η ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς χρησιμοποιείται για την σύνθεση υδατανθράκων και την παραγωγή οξυγόνου στον πλέον φωτοσυνθετικά ενεργό ιστό των φυτών που δεν είναι άλλος από το μεσόφυλλο, το οποίο περιέχει μεγάλο αριθμό χλωροπλαστών. Κατά την φωτοσύνθεση, λοιπόν, πραγματοποιούνται δύο διεργασίες εντός των οργανισμών : η οξειδωση του νερού (H₂O) προς παραγωγή οξυγόνου (O₂) και η αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) προς παραγωγή οργανικών ενώσεων, κυρίως σακχάρων. Η παραγωγή οργανικών ενώσεων πραγματοποιείται είτε μέσω των λεγόμενων «φωτεινών» αντιδράσεων ή αντιδράσεων των θυλακοειδών, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στις μεμβράνες των θυλακοειδών των χλωροπλαστών και οδηγούν στην παραγωγή υψηλά ενεργειακών ενώσεων (ATP, NADPH), είτε μέσω των αντιδράσεων δέσμευσης του ατμοσφαιρικού άνθρακα, οι οποίες λαμβάνουν χώρα στο στρώμα του χλωροπλάστη χρησιμοποιώντας τις ενώσεις που παράγονται από τις φωτεινές αντιδράσεις (ATP, NADPH). Όλα τα παραπάνω περιγράφονται από την εξίσωση που διατυπώθηκε για πρώτη φορά στα τέλη του 19^{ου} αιώνα :



Πέραν του διοξειδίου του άνθρακα, βρέθηκε ότι ορισμένα θυλακοειδή έχουν την δυνατότητα να ανάγουν κι άλλες ουσίες, όπως για παράδειγμα τα άλατα σιδήρου, προς παραγωγή οξυγόνου. Έτσι, αποδείχθηκε ότι πολλές ουσίες μπορούν να δράσουν ως τεχνητοί δείκτες ηλεκτρονίων στην αντίδραση της φωτοσύνθεσης και είναι εφικτό να εκλυθεί οξυγόνο ακόμα και απουσία διοξειδίου του άνθρακα, δηλαδή το παραγόμενο οξυγόνο προέρχεται από την διάσπαση του νερού και όχι από το διοξείδιο του άνθρακα (Blankenship, 2010).

1.2.2.1 Φωτοσυνθετικές χρωστικές : δομή, απορρόφηση φωτονίων και διέγερση

Κάθε φωτοσυνθετικός οργανισμός διαθέτει παραπάνω από μία χρωστική για την δέσμευση του ηλιακού φωτός διότι κάθε μία από αυτές απορροφούν διαφορετικού μήκους κύματος φως. Στα φυτά, οι χρωστικές εντοπίζονται στον χλωροπλάστη. Οι φωτοσυνθετικές χρωστικές λειτουργούν ως μια ενιαία κεραία συλλογής του φωτός και η φωτεινή ενέργεια οδηγείται στην συνέχεια στο σύμπλοκο του κέντρου αντίδρασης όπου πραγματοποιούνται

οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις οι οποίες συμβάλλουν στην αποθήκευση της ενέργειας ως χημική. Κάθε κέντρο αντίδρασης είναι συνδεδεμένο με πολλά μόρια χρωστικών ώστε να παραμένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα ενεργό καθώς ένα μόριο χλωροφύλλης μπορεί να απορροφήσει συγκεκριμένο αριθμό φωτονίων ανά δευτερόλεπτο, ακόμα και σε συνθήκες πλήρους ηλιοφάνειας. Τόσο οι φωτοσυλλεκτικές κεραίες όσο και τα κέντρα αντίδρασης συναντώνται στην φωτοσυνθετική μεμβράνη η οποία εντοπίζεται στους μεν ευκαρυωτικούς οργανισμούς εντός του χλωροπλάστη, στους δε προκαρυωτικούς στην πλασματική μεμβράνη ή σε μεμβράνες προερχόμενες από αυτήν (Blankenship, 2010).

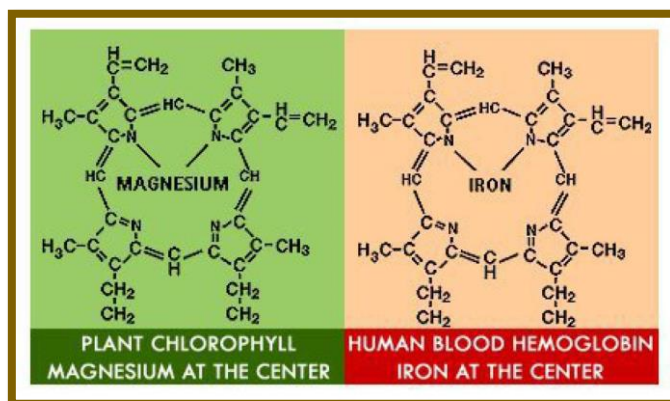
Η κυριότερη φωτοσυνθετική χρωστική είναι η χλωροφύλλη. Υπάρχουν διάφοροι τύποι χλωροφυλλών οι οποίες συναντώνται στους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς. Η επικρατέστερη είναι η χλωροφύλλη a η οποία βρίσκεται σε φυτά, κυανοβακτήρια και προχλωρόφυτα (προκαρυωτικοί οργανισμοί). Ακόμα, υπάρχει η χλωροφύλλη b που εντοπίζεται κυρίως στα φυτά και οι χλωροφύλλες c και d που αποτελούν τις φωτοσυνθετικές χρωστικές πολλών πρωτίστων και κυανοβακτηρίων. Όσον αφορά την δομή τους, οι χλωροφύλλες αποτελούνται από έναν

δακτύλιο, ο οποίος ομοιάζει χημικά με τις πορφυρινικές ομάδες της αιμοσφαιρίνης και των κυτοχρωμάτων και διαθέτει ένα άτομο Mg στο κέντρο του, και μια μακριά υδρόφοβη υδρογονανθρακική αλυσίδα, η οποία συμβάλλει στην σταθεροποίηση του μορίου πάνω στην φωτοσυνθετική μεμβράνη (Εικόνα 25). Στον δακτύλιο λαμβάνουν χώρα οι αναδιατάξεις των ηλεκτρονίων κατά την διαδικασία

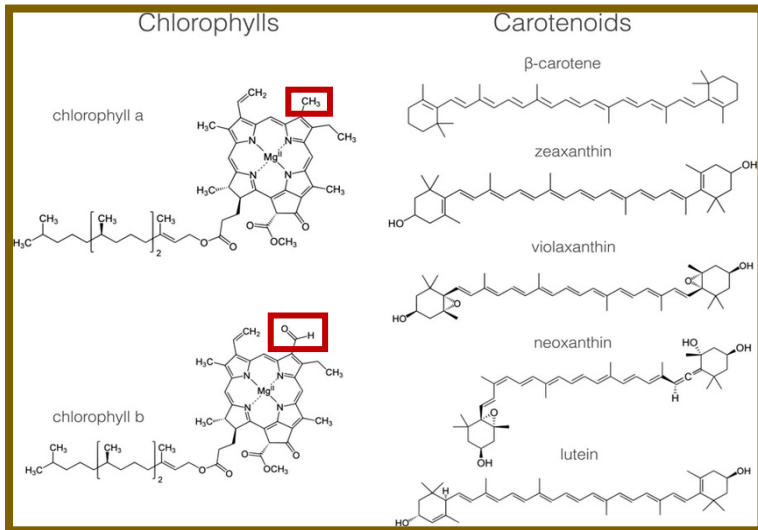
διέγερσης της χλωροφύλλης και των ασύζευκτων ηλεκτρονίων κατά την οξείδωση ή αναγωγή τους. Οι διάφοροι τύποι χλωροφυλλών διαφέρουν μεταξύ

τους ως προς τις υποκαταστάσεις των δακτυλίων, δηλαδή στην ομάδα που είναι συνδεδεμένη με τον δακτύλιο, και στο πρότυπο εναλλαγής των διπλών δεσμών (Blankenship, 2010). Τα καρτενοειδή είναι βοηθητικές χρωστικές όλων σχεδόν των φωτοσυνθετικών οργανισμών που συναντώνται στην μεμβράνη των θυλακοειδών των χλωροπλάστων και είναι συνδεδεμένες με πρωτεΐνες της φωτοσυνθετικής συσκευής. Από χημικής άποψης, τα καρτενοειδή είναι γραμμικά μόρια με πολλαπλούς συζυγείς δεσμούς και απορροφούν φωτεινή ενέργεια στην ζώνη 400-500 nm, εξαιτίας της οποίας έχουν και το χαρακτηριστικό πορτοκαλί χρώμα, μεταφέροντάς την στα μόρια της χλωροφύλλης κατά την φωτοσύνθεση (γι' αυτόν τον λόγο χαρακτηρίζονται ως «βοηθητικές» χρωστικές). Επιπρόσθετα, αποτελούν και προστατευτικούς παράγοντες των οργανισμών έναντι των καταπονήσεων που προκαλούνται από την πλεονάζουσα ηλιακή ακτινοβολία (Εικόνα 26) (Blankenship, 2010).

Οι χλωροφύλλες και οι βοηθητικές φωτοσυλλεκτικές χρωστικές της κεραίας και του κέντρου αντίδρασης ενώνονται με πρωτεΐνες με μη ομοιοπολικό δεσμό σχηματίζοντας σύμπλοκα χρωστικών – πρωτεϊνών. Με αυτόν τον τρόπο βελτιστοποιείται η μεταφορά ενέργειας μέσα στην κεραία και η μεταφορά ηλεκτρονίων στα κέντρα διέγερσης (Blankenship, 2010).



Εικόνα 25 : Η στενή χημική συγγένεια του δακτυλίου της χλωροφύλλης με αυτόν της αιμογλοβίνης (χρωστική του αίματος). Η χλωροφύλλη διαθέτει ένα μόριο μαγνησίου (Mg) στο κέντρο του δακτυλίου ενώ η αιμογλοβίνη ένα μόριο σιδήρου (Fe) (www.patch.com)



Εικόνα 26 : Η χημική δομή των χλωροφυλλών με τον χαρακτηριστικό δακτύλιο και την υδρογονανθρακική ουρά και το γραμμικό μόριο των καροτενοειδών. Η χλωροφύλλη a και b διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ομάδα υποκατάστασης που είναι συνδεδεμένη με τον δακτύλιο (Johnson, 2016)

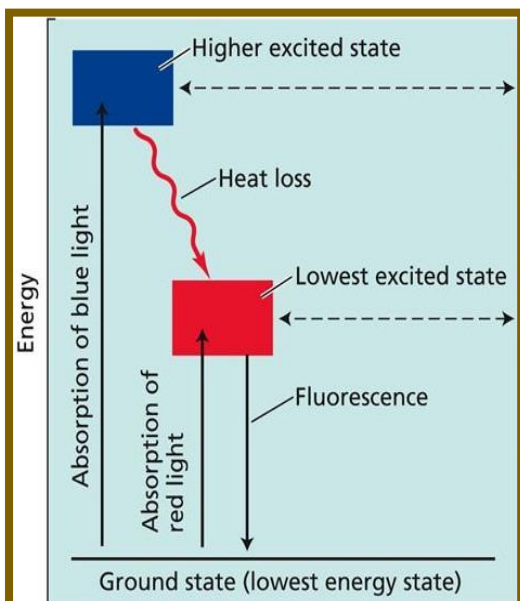
Κάθε χρωστική έχει συγκεκριμένο φάσμα απορρόφησης, το οποίο υποδεικνύει το ποσό ενέργειας που απορροφά ένα μόριο της χρωστικής προκειμένου να αξιοποιηθεί από τον οργανισμό κατά την φωτοσύνθεση. Όταν τα

μόρια απορροφούν ή εκπέμπουν ηλιακή ακτινοβολία, μεταβάλλουν την ηλεκτρονιακή τους κατάσταση. Τα υγιή φύλλα απορροφούν το 70-90% της ορατής ακτινοβολίας, ειδικότερα στην κυανή και ερυθρή περιοχή του ορατού φάσματος (475 και 670 nm, αντίστοιχα), και αντανακλούν φως κυρίως της πράσινης περιοχής (550 nm) επομένως γι' αυτό ο ανθρώπινος οφθαλμός αντιλαμβάνεται τα φυτά πράσινα (Blankenship, 2010· Lum *et al.*, 2016· Roman & Ursu, 2016). Η απορρόφηση του φωτός από την χλωροφύλλη περιγράφεται στην εξίσωση :



η οποία εκφράζει την αλλαγή στην ηλεκτρονιακή κατάσταση ενός μορίου χλωροφύλλης. Συγκεκριμένα, ένα μόριο χλωροφύλλης (Chl) το οποίο βρίσκεται στην θεμελιώδη κατάσταση, δηλαδή στην χαμηλότερη ενεργειακά κατάσταση, απορροφώντας ένα φωτόνιο ($h\nu$) μεταπίπτει σε μια ενεργειακά υψηλότερη κατάσταση (Chl^*), την διεγερμένη κατάσταση. Τα φωτόνια μικρού μήκους κύματος έχουν μεγαλύτερη ενέργεια άρα η απορρόφηση κυανού φωτός οδηγεί την χλωροφύλλη σε μια ενεργειακά ανώτερη διεγερμένη κατάσταση συγκριτικά με την απορρόφηση του ερυθρού φωτός. Όταν ένα μόριο χλωροφύλλης φτάσει στην ανώτερη διεγερμένη κατάσταση, τείνει να αποδώσει μέρος της ενέργειάς του στο περιβάλλον με έκλυση θερμότητας καθώς σε αυτή την κατάσταση είναι πολύ ασταθές. Έτσι, μεταπίπτει στην

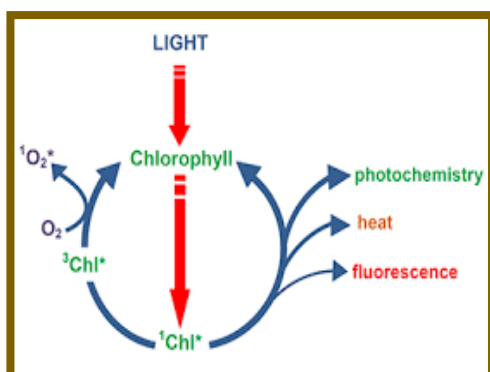
κατώτατη διεγερμένη κατάσταση όπου είναι πιο σταθερό το μόριο και μπορεί να παραμείνει σε αυτή την αυτήν για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (Εικόνα 27) (Blankenship, 2010).



Εικόνα 27 : Οι δύο διεγερμένες ενεργειακά καταστάσεις ενός μορίου χλωροφύλλης μετά από απορρόφηση φωτονίου της μπλε και κόκκινης περιοχής του φάσματος (Blankenship, 2010)

Η επιστροφή του μορίου της χλωροφύλλης στην αρχική του κατάσταση (Chl) γίνεται με διοχέτευση της ενέργειας που έχει μέσω τεσσάρων διεργασιών: i. του *φθορισμού* (fluorescence), δηλαδή εκπομπή ενός φωτονίου (με προηγηθείσα μετατροπή μέρους της ενέργειας διέγερσης σε θερμότητα) όπου η χλωροφύλλη φθορίζει στην ερυθρή περιοχή του φάσματος, ii. της απευθείας

μετατροπής της ενέργειας διέγερσης σε *θερμότητα* χωρίς εκπομπή φωτονίου, **iii.** της *ενεργειακής μετατροπής* (energy transfer), δηλαδή μεταφορά της ενέργειας του μορίου χλωροφύλλης σε άλλο μόριο, και **iv.** της *φωτοχημείας* όπου η ενέργεια διέγερσης προκαλεί χημικές αντιδράσεις (Εικόνα 28) (Blankenship, 2010).



Εικόνα 28 : Οι τέσσερις διαδικασίες τις οποίες μπορεί να ακολουθήσει ένα διεγερμένο μόριο χλωροφύλλης για να επανέλθει στην θεμελιώδη του κατάσταση (Chl) : φωτοχημεία, έκλυση θερμότητας, φθορισμός και μεταφορά ενέργειας σε άλλο μόριο (εδώ σε ένα μόριο οξυγόνου) (www.flex-photosyn.ca)

Από την συνολική απορροφούμενη ενέργεια, το κλάσμα των απορροφούμενων φωτονίων που οδηγείται προς παραγωγή φωτοχημικού έργου είναι μεγαλύτερο, ακολουθεί αυτό του φθορισμού ενώ το

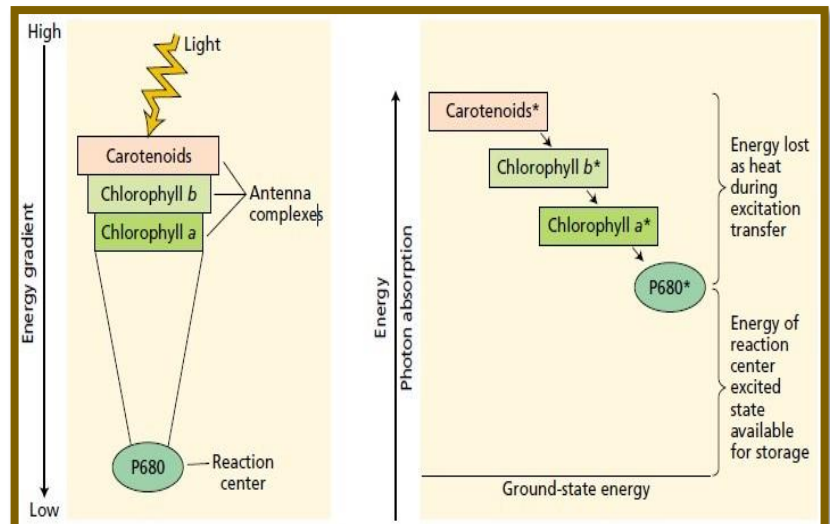
κλάσμα των φωτονίων που χρησιμοποιείται για έκλυση θερμότητας και μεταφορά της ενέργειας σε άλλο μόριο είναι σχεδόν αμελητέο. Η αποδοτικότητα μετατροπής του φωτός σε χημική ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, είναι περίπου 27%, ποσοστό από το οποίο το μεγαλύτερο μέρος του χρησιμοποιείται σε διαδικασίες συντήρησης του κυττάρου και ένα πολύ μικρό ποσό κατευθύνεται για αύξηση της βιομάζας του φυτού (Blankenship, 2010).

1.2.2.2 Δομή της φωτοσυνθετικής συσκευής

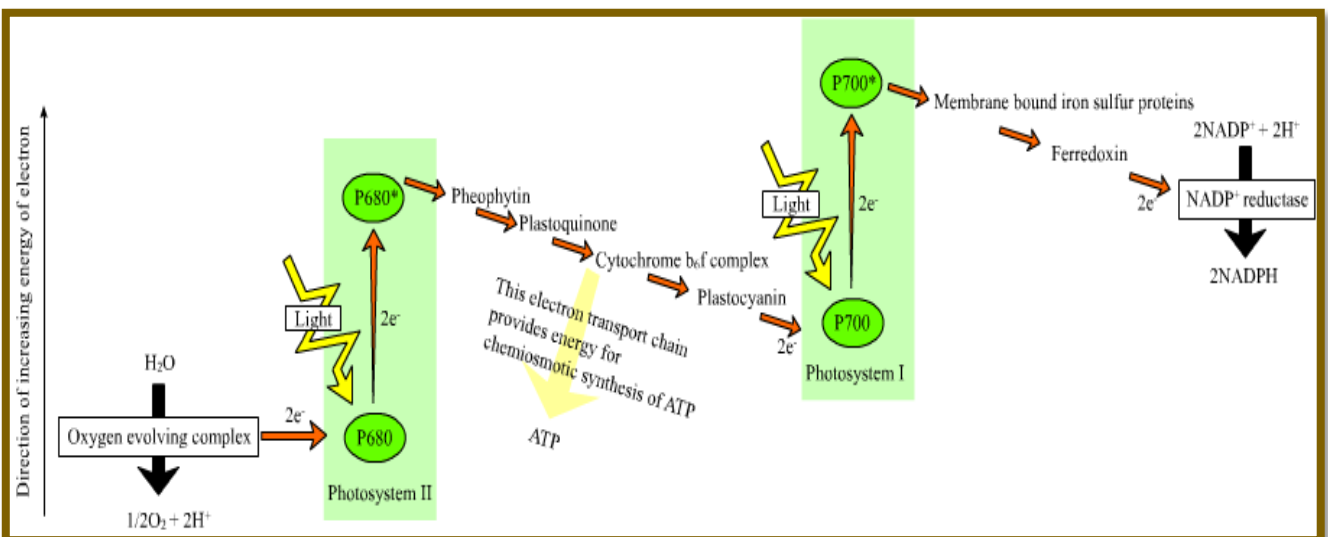
Η φωτοσυνθετική συσκευή που βρίσκεται εντός των χλωροπλαστών των φυτών αποτελείται από δύο φωτοχημικά σύμπλοκα, το φωτοσύστημα I και το φωτοσύστημα II (photosystem I (PSI), photosystem II (PSII)), καθένα από τα οποία περιλαμβάνει τις χρωστικές της δικής του φωτοσυλλεκτικής κεραίας και το δικό του κέντρο αντίδρασης. Τα δύο φωτοσυστήματα λειτουργούν συμπληρωματικά και γι' αυτό τον λόγο, βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο συνδεδεμένα με μια αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων. Τα δύο φωτοσυστήματα δεν βρίσκονται σε ανάλογη ποσότητα εντός των χλωροπλαστών αλλά έχει βρεθεί ότι υπάρχει πλεόνασμα του φωτοσυστήματος II (PSII). Συνήθως η αναλογία των φωτοσυστημάτων I και II είναι 1:1,5, αντίστοιχα, στα φυτά, με μεταβολές κατά τα διάφορα αναπτυξιακά στάδια του φυτού αλλά και των συνθηκών φωτισμού που μπορεί να επικρατούν (Blankenship, 2010).

Οι φωτοσυλλεκτικές κεραίες είναι υπεύθυνες για την δέσμευση της ενέργειας καθώς και την μεταφορά της στα κέντρα αντίδρασης με τα οποία είναι συνδεδεμένες. Το μέγεθος και η δομή των φωτοσυλλεκτικών κεραιών διαφέρει μεταξύ των διάφορων φωτοσυνθετικών οργανισμών. Όσον αφορά το μέγεθός τους στα ανώτερα φυτά, αυτό κυμαίνεται μεταξύ 200 και 300 μορίων χλωροφύλλης. Οι χρωστικές της κεραίας συνδέονται με πρωτεΐνες σχηματίζοντας σύμπλοκα χρωστικών-πρωτεϊνών. Μπορεί να υπάρχει μεγάλη ποικιλομορφία αναφορικά με την δομή των κεραιών αλλά πάντα συνδέονται με την φωτοσυνθετική μεμβράνη, δηλαδή την μεμβράνη των θυλακοειδών. Ο μηχανισμός μεταφοράς της ενέργειας διέγερσης από ένα μόριο χρωστικής σε άλλο και τελικά στο κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος ονομάζεται μεταφορά ενέργειας μέσω συντονισμού ή μεταφορά παλμού, κατά την οποία η ενέργεια μεταφέρεται στα γειτονικά μόρια χρωστικών τα οποία και διεγείρει, έως ότου φτάσει στον τελικό αποδέκτη της. Αν και αυτός είναι ένας πολύ αποδοτικός τρόπος μεταφοράς της ενέργειας καθώς περίπου 95-99% της ενέργειας των απορροφούμενων

φωτονίων μεταφέρεται στο κέντρο αντίδρασης, μέρος της ενέργειας χάνεται υπό την μορφή θερμότητας κατά την μεταφορά της (Εικόνα 29). Το φωτοσύστημα II απορροφά κυρίως φως της περιοχής του ανοικτού ερυθρού (680 nm) παράγοντας ένα ισχυρό οξειδωτικό, το οποίο οξειδώνει το νερό, και ένα ασθενές αναγωγικό. Έτσι, το αναγωγικό μόριο μεταφέρει ηλεκτρόνια μέσω του κυτοχρωματικού συμπλόκου (bcf) στο φωτοσύστημα I. Το φωτοσύστημα I απορροφά σκοτεινό ερυθρό φως (700 nm) παράγοντας ένα ασθενές οξειδωτικό μόριο και ένα ισχυρά αναγωγικό το οποίο ανάγει το NADP^+ σε NADPH (Εικόνα 30) (Blankenship, 2010).



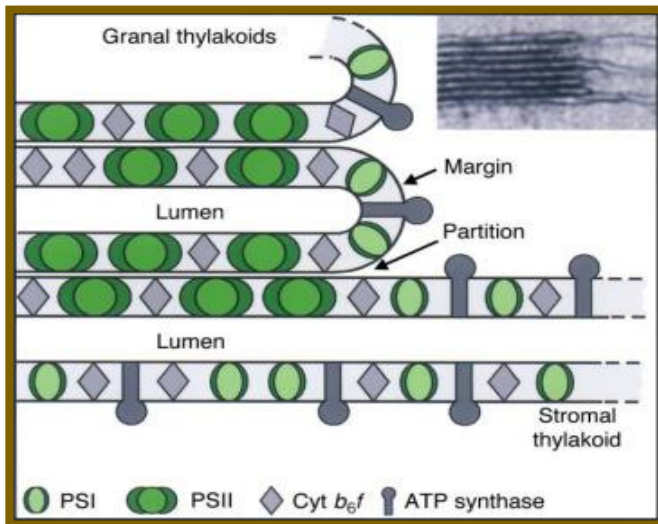
Εικόνα 29 : Αριστερά, ένα παράδειγμα της δομής του συμπλόκου της φωτοσυλλεκτικής κεραίας που είναι συνδεδεμένη με το κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος. Δεξιά, ο μηχανισμός μεταφοράς της ενέργειας διέγερσης μέσω συντονισμού ή παλμού από το ένα μόριο χρωστικής στο άλλο μέχρι να καταλήξει στο κέντρο αντίδρασης (Blankenship, 2010)



Εικόνα 30 : Τα φωτοσυστήματα I και II με τα κέντρα αντίδρασής τους και την αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων η οποία τα συνδέει. Στο σχήμα φαίνονται οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Το κέντρο αντίδρασης του PSI απορροφά κυρίως φως σκοτεινού ερυθρού (700 nm) ενώ το κέντρο αντίδρασης του PSII απορροφά ανοικτό ερυθρό φως (680 nm) (www.reasonandscience.catsboard.com)

Τα φωτοσυστήματα είναι σύμπλοκα τα οποία αποτελούνται από ολομεμβρανικές πρωτεΐνες (κέντρα αντίδρασης, πρωτεϊνικά σύμπλοκα των χρωστικών της κεραίας, πρωτεϊνικοί μεταφορείς ηλεκτρονίων) οι οποίες είναι βυθισμένες στις μεμβράνες των θυλακοειδών των χλωροπλάστων και ένα μέρος τους προβάλλει προς την πλευρά του στρώματος του χλωροπλάστη (stroma) ενώ άλλο μέρος τους έχει προσανατολισμό προς τον ενδοθυλακοειδή χώρο (lumen). Το φωτοσύστημα II εντοπίζεται κυρίως στα θυλακοειδή grana, σημεία όπου τα θυλακοειδή συνδέονται τόσο στενά μεταξύ τους που σχηματίζονται

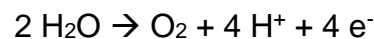
συστοιχίες λόγω πολλαπλών αναδιπλώσεων, ενώ το φωτοσύστημα I μαζί με την ATP-συνθάση βρίσκεται στα θυλακοειδή του στρώματος, που είναι μεμονωμένες μεμβράνες χωρίς αναδιπλώσεις, και στις παρυφές των θυλακοειδών grana. Μεταξύ των δύο φωτοσυστημάτων υπάρχει ένα σύμπλοκο, το κυτοχρωμικό σύμπλοκο b_6f , στην αλυσίδα μεταφοράς ηλεκτρονίων το οποίο βρίσκεται στα θυλακοειδή του στρώματος και grana (Εικόνα 31) (Blankenship, 2010).



Εικόνα 31 : Οι θέσεις στις οποίες συναντώνται τα φωτοσυστήματα I, II, το κυτοχρωματικό σύμπλοκο b_6f και η ATP-συνθάση στις μεμβράνες των θυλακοειδών grana και των θυλακοειδών του στρώματος (Plant Physiology, 2010)

1.2.2.3 Η μεταφορά ηλεκτρονίων κατά μήκος της φωτοσυνθετικής συσκευής – Οι «φωτεινές» αντιδράσεις

Στα φυτά, ο αρχικός δότης ηλεκτρονίων είναι το νερό (H_2O) και ο τελικός δέκτης το $NADP^+$. Το νερό είναι ένα πολύ σταθερό μόριο το οποίο οξειδώνεται χάρη στο φωτοσύστημα II και από αυτή την διαδικασία, παράγεται οξυγόνο (O_2), όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση :



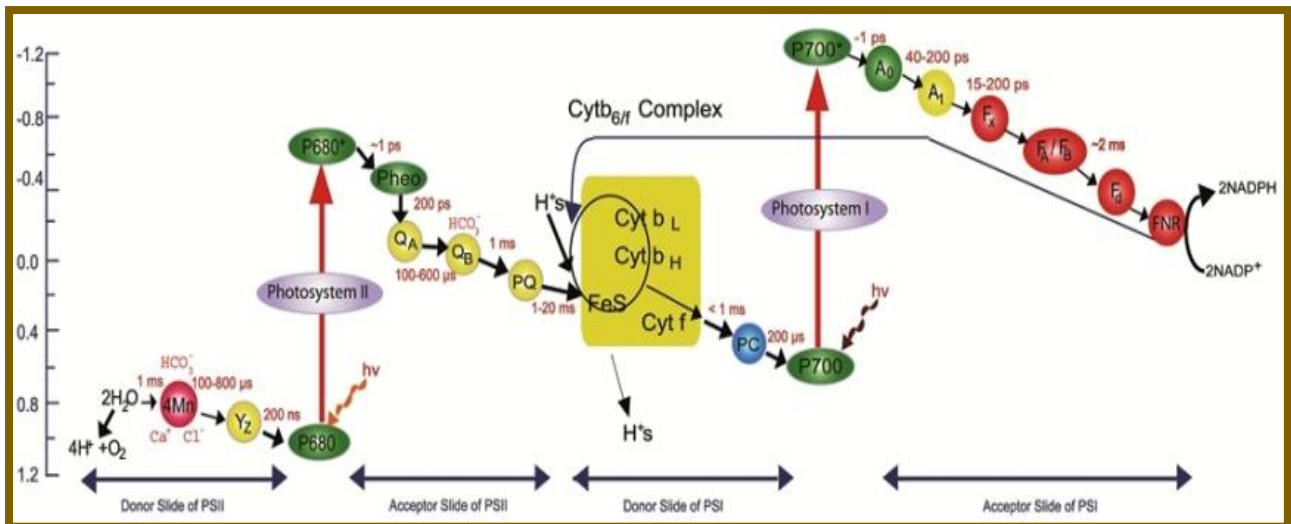
Πιο συγκεκριμένα, το σύμπλοκο έκλυσης οξυγόνου (oxygen-evolving complex (OEC) ή water-splitting complex), μέρος του φωτοσυστήματος II, καταλύει την παραπάνω αντίδραση σε όλους τους φωτοσυνθετικούς οργανισμούς (φυτά, άλγη, κυανοβακτήρια) (Raymond & Blankenship, 2007). Το φωτοσυνθετικό σύμπλοκο είναι αυτό που εμπλουτίζει κατά κύριο λόγο την ατμόσφαιρα της γης με οξυγόνο καθώς είναι το μοναδικό βιοχημικό σύστημα που πραγματοποιεί την αντίδραση οξείδωσης του νερού και επομένως έκλυσης οξυγόνου. Ο ενδοθυλακοειδής χώρος (μικροχώρος των θυλακοειδών) και το στρώμα έχουν μια διαφορά ηλεκτροχημικού δυναμικού εξαιτίας της υψηλής συγκέντρωσης H^+ στον μικροχώρο, η οποία προκύπτει από την διάσπαση του νερού από το σύμπλοκο έκλυσης οξυγόνου, και της χαμηλής συγκέντρωσης H^+ στο στρώμα, η οποία προκύπτει από την χρήση τους για αναγωγή της πλαστοκινόνης και του $NADP^+$ (Blankenship, 2010).

Το σύμπλοκο έκλυσης οξυγόνου (OEC) οξειδώνει το νερό παράγοντας H^+ και O_2 . Ένα μόριο-μεταφορέας (Y_z) θα μεταφέρει τα ηλεκτρόνια που παράχθηκαν από αυτή την αντίδραση στο οξειδωμένο κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος II (P680). Ταυτόχρονα το κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος II δέχεται ηλεκτρόνια και από την φωτοσυλλεκτική κεραία (μήκους κύματος 680 nm, όπως αναφέρθηκε παραπάνω) προκειμένου να αναχθεί (P680*). Εν συνεχεία, η διεγερμένη χλωροφύλλη του φωτοσυστήματος II μεταφέρει ηλεκτρόνια στο μόριο της φαιοφυτίνης, μιας χλωροφύλλης που το κεντρικό της μαγνήσιο έχει αντικατασταθεί από δύο υδρογόνα, και αυτή με την σειρά της τα αποδίδει σε δύο πλαστοκινόνες (PQ_A και PQ_B). Η πλαστοκινόνη PQ_B , λοιπόν, δεχόμενη δύο ηλεκτρόνια από την πλαστοκινόνη PQ_A και δύο πρωτόνια από το στρώμα ανάγεται

πλήρως, με το ανηγμένο μόριο πια να ονομάζεται πλαστοϋδροκινόνη (PQH_2) (Blankenship, 2010).

Επόμενο δέκτη των ηλεκτρονίων αποτελεί το κυτοχρωματικό σύμπλοκο b_6f . Αυτό το σύμπλοκο είναι μια μεγάλη πρωτεΐνη με πολλές υπομονάδες και προσθετικές ομάδες. Τα βασικότερα μέρη του συμπλόκου είναι το κυτόχρωμα f (Cyt f , ομάδα αίμης τύπου c), δύο κυτοχρώματα b (Cyt b , ομάδες αίμης τύπου b), μία σιδηροθειούχος πρωτεΐνη Rieske (FeS_R) και μία πρόσθετη ομάδα αίμης (αίμη c_n). Όμως, ακόμα και σήμερα, δεν έχει αποσαφηνιστεί πλήρως ο ρόλος όλων των συστατικών και συμπαραγόντων του συμπλόκου. Εντός του συμπλόκου λαμβάνουν χώρα δύο πορείες μεταφοράς ηλεκτρονίων και πρωτονίων, η μη κυκλική ή γραμμική πορεία, που στόχος της είναι να μεταφέρει ηλεκτρόνια στο κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος I , και η κυκλική πορεία, γνωστή και ως κύκλος Q που στόχος της είναι να αυξήσει τον αριθμό των πρωτονίων που διασχίζουν εγκάρσια την μεμβράνη. Στην κυκλική πορεία, λοιπόν, ένα μόριο πλαστοϋδροκινόνης (PQH_2) θα οξειδωθεί χάνοντας δύο ηλεκτρόνια, εκ των οποίων το ένα θα αποδοθεί στην οξειδωμένη πρωτεΐνη Rieske (FeS_R) του συμπλόκου κυτοχρωμάτων και αυτή με την σειρά της θα το μεταφέρει στο κυτόχρωμα f για να καταλήξει σε ένα μόριο-μεταφορέα, την πλαστοκυανίνη (PC), που θα δώσει το ηλεκτρόνιο στο κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος I ($P700$) προκαλώντας την αναγωγή του ($P700^*$) (γραμμική ροή). Το δεύτερο ηλεκτρόνιο της πλαστοϋδροκινόνης θα αξιοποιηθεί από το ίδιο το σύμπλοκο b_6f και πιο συγκεκριμένα, θα το προσλάβουν διαδοχικά τα κυτοχρώματα b ανάγοντας τελικά μια πλαστοκινόνη (PQ) σε πλαστοημικινόνη ($PQ\cdot^-$). Στην κυκλική πορεία, ένα δεύτερο μόριο πλαστοϋδροκινόνης (PQH_2) οξειδώνεται χάνοντας δύο ηλεκτρόνια εκ των οποίων το πρώτο περνάει από την σιδηροθειούχο πρωτεΐνη Rieske (FeS_R) στην πλαστοκυανίνη (PC) καταλήγοντας στο κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος I ($P700 \rightarrow P700^*$) ενώ το δεύτερο περνά από τα δύο κυτοχρώματα b και τελικώς ανάγεται η πλαστοημικινόνη ($PQ\cdot^-$) σε πλαστοϋδροκινόνη (PQH_2) προσλαμβάνοντας συγχρόνως δύο πρωτόνια από το στρώμα και ακολουθεί η αποδέσμευσή της από το κυτοχρωματικό σύμπλοκο b_6f . Επομένως, για κάθε δύο ηλεκτρόνια που φτάνουν στο κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος I , τέσσερα πρωτόνια μετακινούνται μέσω της μεμβράνης (Blankenship, 2010).

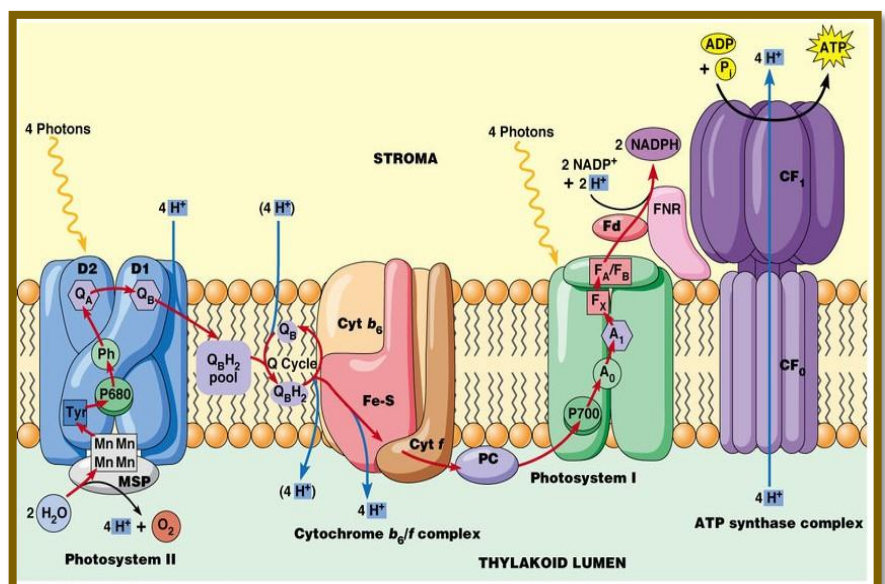
Έχοντας δεχθεί ηλεκτρόνια μέσω της πλαστοκυανίνης (PC) από το κυτοχρωματικό σύμπλοκο b_6f αλλά και από την φωτοσυλλεκτική κεραία του (μήκους κύματος 700 nm από την τελευταία, όπως αναφέρθηκε παραπάνω για το κέντρο αντίδρασης του PSI), το κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος I ($P700$) ανάγεται ($P700^*$). Από εκεί, τα ηλεκτρόνια θα αποδοθούν διαδοχικά σε ένα μόριο χλωροφύλλης (A_0), στο μόριο της φυλλοκινόνης (A_1), στα κέντρα $Fe-S$ (μια σειρά από σιδηροθειούχες πρωτεΐνες, FeS_X , FeS_A και FeS_B) για να καταλήξουν εν τέλει στη σιδηροθειούχο πρωτεΐνη φερρεδοξίνη (Fd). Τελικά, η φλαβοπρωτεΐνη αναγωγάση φερρεδοξίνης-NADP, που είναι συνδεδεμένη με την μεμβράνη, θα πραγματοποιήσει την αναγωγή του $NADP^+$ σε $NADPH$ (Εικόνα 32) (Blankenship, 2010).



Εικόνα 32 : Απεικόνιση του λεγόμενου σχήματος Z της φωτοσύνθεσης. Η ροή μεταφοράς των ηλεκτρονίων κατά μήκος της φωτοσυνθετικής μεμβράνης. Στην εικόνα εμφανίζονται όλα τα βασικά μόρια – μεταφορείς των ηλεκτρονίων καθώς και τα σύμπλοκα που μετέχουν στην διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Στις φωτεινές αντιδράσεις, το μόριο του νερού (H_2O) αποτελεί τον αρχικό δότη ηλεκτρονίων τα οποία ανάγοντας διαδοχικά τα μόρια – μεταφορείς και τα κέντρα αντίδρασης των συμπλόκων συμβάλλουν στην παραγωγή ATP και NADPH, μόρια που θα αποτελέσουν πηγή ενέργειας για τις αντιδράσεις του άνθρακα στον κύκλο Calvin-Benson προκειμένου να παραχθούν υδατάνθρακες (www.accessscience.com)

Η διαφορά στο χημικό δυναμικό οποιουδήποτε μοριακού στοιχείου εκατέρωθεν μιας μεμβράνης μπορεί να λειτουργήσει ως εν δυνάμει πηγή ενέργειας. Μία τέτοια διαφορά ηλεκτροχημικού δυναμικού είναι αυτή που προκύπτει μεταξύ του στρώματος και του ενδοθυλακοειδή χώρου και αποτελεί την κινητήρια δύναμη για την σύνθεση ενός άλλου ενεργειακού μορίου, του ATP. Συγκεκριμένα, η ροή των ηλεκτρονίων έχει ως αποτέλεσμα την μετακίνηση πρωτονίων (ιόντα H^+) από το στρώμα προς τον μικροχώρο των θυλακοειδών, δηλαδή το στρώμα γίνεται πιο αλκαλικό (λιγότερα ιόντα H^+) ενώ ο ενδοθυλακοειδής χώρος γίνεται πιο όξινος (περισσότερα ιόντα H^+). Το ενζυμικό σύμπλοκο που καταλύει την παραγωγή ATP ονομάζεται ATP συνθάση ή ATPάση (ATP synthase, ATPase). Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 1.1.4, η ATP συνθάση εντοπίζεται στα θυλακοειδή του στρώματος και στις παρυφές των grana. Το σύμπλοκο αυτό αποτελείται από ένα υδρόφοβο τμήμα (CF_0) που βρίσκεται βυθισμένο εντός της φωτοσυνθετικής μεμβράνης και ένα τμήμα (CF_1) το οποίο προβάλλει στο στρώμα. Το CF_0 λειτουργεί ως μία δίοδος πρωτονίων στην μεμβράνη ενώ το CF_1 είναι υπεύθυνο για την σύνθεση του ATP (Εικόνα 33).

Εικόνα 33 : Η οργάνωση του φωτοσυστήματος II, του κυτοχρωματικού συμπλόκου b_6f , του φωτοσυστήματος I και της ATP συνθάσης στην φωτοσυνθετική μεμβράνη του χλωροπλάστη και οι διεργασίες που αυτά επιτελούν προκειμένου να παραχθούν τα ενεργειακά μόρια NADPH και ATP (Plant Physiology, 2010)



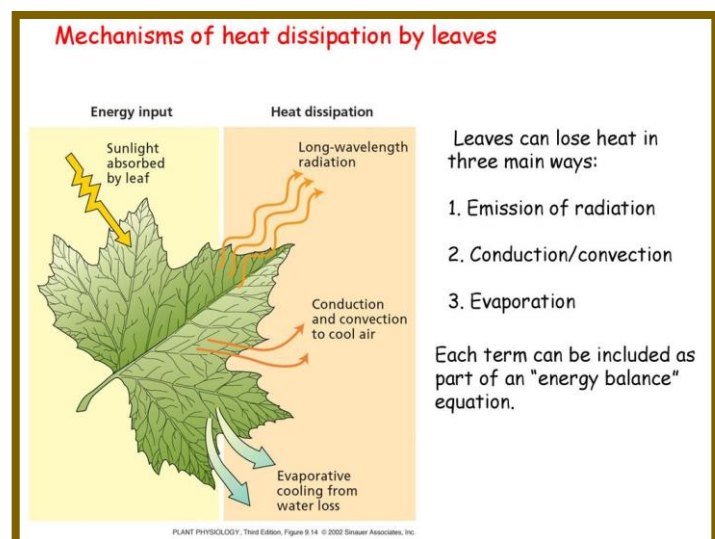
Κατά την διάρκεια της κατάλυσης, το τμήμα CF_o του ενζύμου περιστρέφεται κι έτσι, σε κάθε περιστροφή του ενζύμου, παράγονται τρία μόρια ATP (Blankenship, 2010).

1.2.2.4 Προστασία και επιδιόρθωση της φωτοσυνθετικής συσκευής από την περίσσεια ηλιακής ακτινοβολίας

Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που θα δεχθεί ένα φύλλο παίζει σημαντικό ρόλο για την σωστή λειτουργία της φωτοσυνθετικής συσκευής. Όταν η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα φύλλο ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο κατώφλι τότε υπάρχει κίνδυνος σχηματισμού τοξικών φωτοπροϊόντων εντός του φυτού (σουπεροξειδίου O₂⁻, οξυγόνο σε μονήρη κατάσταση ¹O₂^{*}, υπεροξειδίου του υδρογόνου H₂O₂, ρίζα υδροξυλίου •OH) που μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στη φωτοσυνθετική συσκευή. Για αυτόν τον λόγο, οι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί διαθέτουν μηχανισμούς για την προστασία των βιολογικών μεμβρανών τους από της περίσσεια της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και για την επιδιόρθωση της φωτοσυνθετικής συσκευής εάν αυτή υποστεί κάποια βλάβη (Blankenship, 2010).

Για την προστασία των μεμβρανών και κατά συνέπεια της φωτοσυνθετικής συσκευής, θα πρέπει να υπάρξει απόσβεση της περίσσειας ενέργειας, δηλαδή της ενέργειας διέγερσης της χλωροφύλλης (Blankenship, 2010). Η επιπλέον ηλιακή ακτινοβολία που δεσμεύεται από το φύλλο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του θερμικού του φορτίου επομένως είναι απαραίτητο να διασκορπιστεί αυτό το φορτίο, κάτι που συμβαίνει είτε με εκπομπή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος από το φύλλο είτε με μεταφορά θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο ή μέσω εξάτμισης νερού (διαπνοή). Το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ενός αντικειμένου είναι αντιστρόφως ανάλογο της θερμοκρασίας του. Εξαιτίας της σχετικά χαμηλής θερμοκρασίας που έχει ένα φύλλο, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία του είναι μεγάλου μήκους κύματος και γι' αυτό δε γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο οφθαλμό (εκτός του ορατού φάσματος). Ως θερμότητα προς τον περιβάλλοντα χώρο αποβάλλεται όταν η θερμοκρασία του φύλλου είναι μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντα αέρα. Τέλος, η διαπνοή στηρίζεται στο γεγονός ότι για να εξατμιστεί το νερό απαιτείται ενέργεια αποσπώντας σημαντική ποσότητα θερμότητας από το φύλλο το οποίο παράλληλα ψύχεται, ομοίως λειτουργεί ο μηχανισμός της εφίδρωσης στον άνθρωπο (Εικόνα 34). Οι δύο συνηθέστεροι τρόποι απόσβεσης της περίσσειας ενέργειας είναι η μεταφορά θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο και η διαπνοή (Ehleringer & Sandquist, 2010).

Παρ' όλα αυτά, οι παραπάνω ενέργειες μπορεί να μην επαρκούν για να αποτρέψουν τον σχηματισμό τοξικών φωτοπροϊόντων. Σε αυτή την περίπτωση, ο οργανισμός

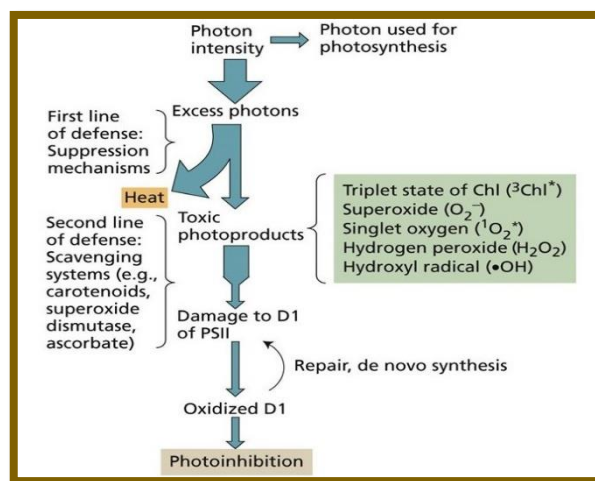


Εικόνα 34 : Οι τρεις μηχανισμοί με τους οποίους ένα φύλλο μπορεί να αποσβέσει την περίσσεια της ηλιακής ακτινοβολίας (Blankenship, 2010)

επιστρατεύει μια σειρά μορίων τα οποία θα αναλάβουν να αποτοξινώσουν τον οργανισμό από αυτά τα προϊόντα. Τα καροτενοειδή είναι ένα παράδειγμα τέτοιων μορίων. Σκοπός τους είναι η απόσβεση της ενέργειας της διεγερμένης χλωροφύλλης, δηλαδή η ταχεία διοχέτευση της ενέργειάς της μέσω μεταφοράς παλμού. Τα καροτενοειδή λαμβάνουν την ενέργεια από την διεγερμένη χλωροφύλλη αλλά επειδή τα διεγερμένα καροτενοειδή δεν έχουν αρκετή ενέργεια για να παραχθεί οξυγόνο σε μονήρη κατάσταση, αποβάλλουν την περίσσεια ενέργειας ως θερμότητα επιστρέφοντας ταυτοχρόνως στην βασική τους κατάσταση. Άλλος ένα μηχανισμός απόσβεσης της περίσσειας ενέργειας του φωτοσυστήματος II είναι η μη φωτοχημική απόσβεση που λαμβάνει χώρα εντός της φωτοσυλλεκτικής κεραίας, δηλαδή η απόσβεση της ενέργειας διέγερσης της χλωροφύλλης με διαδικασίες που δεν περιλαμβάνουν φωτοσημεία. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη σε τρία καροτενοειδή, πιο συγκεκριμένα τρεις ξανθοφύλλες, την βιολαξανθίνη, την ανθηροξανθίνη και την ζεαξανθίνη. Σε υψηλές εντάσεις φωτός επικρατεί η ζεαξανθίνη ενώ σε χαμηλές η βιολαξανθίνη με τα δύο μόρια να αλληλομετατρέπονται αναλόγως τις συνθήκες έντασης φωτός, με ενδιάμεσο μόριο την ανθηροξανθίνη. Για την παραγωγή της ζεαξανθίνης, χρησιμοποιείται ως συμπαράγοντας το ασκορβικό οξύ, άλλη μία ουσία αποτοξίνωσης. Σε υψηλές εντάσεις φωτός, η ζεαξανθίνη προσδένεται στην φωτοσυλλεκτική κεραία μαζί με πρωτόνια προκαλώντας δομικές αλλαγές σε αυτήν που οδηγούν σε θερμική απόσβεση (Blankenship, 2010).

Εάν η απόσβεση της ενέργειας δεν πραγματοποιηθεί εγκαίρως, υπάρχει κίνδυνος βλάβης του κέντρου αντίδρασης του φωτοσυστήματος II. Σε αυτή την περίπτωση, έχουμε το φαινόμενο της φωτοαναστολής, δηλαδή η περίσσεια ενέργειας φτάνει στο κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος II προκαλώντας αδρανοποίηση (αναστολή φωτοσύνθεσης) και στη συνέχεια βλάβη. Το βασικό στοιχείο του κέντρου αντίδρασης που βλάπτεται είναι η πρωτεΐνη D1. Τότε κινητοποιούνται οι επιδιορθωτικοί μηχανισμοί του κυττάρου οι οποίοι απομακρύνουν την κατεστραμμένη πρωτεΐνη D1 από την μεμβράνη και την αντικαθιστούν με ένα νεοσυντιθέμενο μόριο. Τα λοιπά συστατικά του κέντρου αντίδρασης δεν βλάπτονται κι

έτσι, είναι σε θέση να επαναχρησιμοποιηθούν. Ομοίως, το κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος I υφίσταται εύκολα βλάβες από τις δραστικές μορφές οξυγόνου οι οποίες μπορεί να παραχθούν από την δράση της φερρεδοξίνης του PSI. Η φερρεδοξίνη, που είναι ισχυρά αναγωγικό μόριο, μπορεί εύκολα να ανάξει το μοριακό οξυγόνο με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ρίζα σουπεροξειδίου (O_2^-). Η αναγωγή του μοριακού οξυγόνου ανταγωνίζεται την φυσιολογική προώθηση των ηλεκτρονίων προς το $NADP^+$ και παράλληλα, η ρίζα σουπεροξειδίου που σχηματίζεται προκαλεί βλάβες στις βιολογικές μεμβράνες. Γι' αυτό τον λόγο, υπάρχουν ένζυμα, όπως η σουπεροξειδική δισμουτάση και η υπεροξειδάση του ασκορβικού, που εξουδετερώνουν τον σχηματισμό της ρίζας σουπεροξειδίου προστατεύοντας το κέντρο αντίδρασης του φωτοσυστήματος I (Εικόνα 35) (Blankenship, 2010).



Εικόνα 35 : Η συνολική πορεία για την προστασία αλλά και επιδιόρθωση της φωτοσυνθετικής συσκευής σε περίπτωση βλάβης από υπερβάλλουσα ενέργεια (Blankenship, 2010)

1.2.3 Καταπονήσεις

Ως καταπόνηση ορίζεται οποιαδήποτε δυσμενής επίδραση παράγοντα που τείνει να επηρεάσει ή να παρεμποδίσει την εύρυθμη λειτουργία φυσιολογικών μηχανισμών σε έναν οργανισμό (Lichtenthaler, 1996· Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012). Οι παράγοντες που έχουν ως αποτέλεσμα την καταπόνηση ενός φυτού μπορεί να είναι είτε βιοτικοί, δηλαδή να οφείλονται στην δράση ζωντανών οργανισμών (προσβολή από φυτοπαθογόνα βακτήρια, μύκητες, έντομα, ακάρεα κλπ), είτε αβιοτικοί, δηλαδή να είναι απόρροια ακραίων συνθηκών (ξηρασία, υψηλή αλατότητα, ακραίες θερμοκρασίες κλπ) (Radin *et al.*, 2010· Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

Η προσβολή από εχθρούς και παθογόνα έχει άμεσες επιπτώσεις σε ζωτικές φυσιολογικές λειτουργίες του φυτού – ξενιστή. Οι αλλαγές που θα προκληθούν και το εύρος αυτών εξαρτώνται από το είδος του εχθρού / παθογόνου, το είδος του οργάνου που προσβάλλεται, το αναπτυξιακό στάδιο του ξενιστή και του προσβαλλόμενου οργάνου, τη χρονική στιγμή της προσβολής κ. ά. (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

Φωτοσύνθεση

Μία από τις θεμελιώδεις φυσιολογικές λειτουργίες των φυτών είναι η φωτοσύνθεση, η οποία μπορεί να επηρεαστεί τόσο άμεσα όσο και έμμεσα. Η μειωμένη φωτοσυνθετική ικανότητα αποτελεί άμεση απόρροια της προσβολής των φυτών από εχθρούς ή παθογόνα που βλάπτουν τα φύλλα του ξενιστή, τα κύρια όργανα στα οποία λαμβάνει χώρα η φωτοσύνθεση. Μάλιστα, σε προχωρημένα στάδια προσβολής μπορεί να προκληθεί ακόμα και καταστροφή των χλωροπλαστών και φυλλόπτωση, δηλαδή μείωση της συνολικής φωτοσυνθετικής επιφάνειας. Αντιθέτως, εχθροί ή παθογόνα που καταστρέφουν τα αγγεία του ηθμού ή του ξύλου (αδρομυκητες, αδροβακτήρια, ξυλοφάγα έντομα) περιορίζουν την φωτοσυνθετική δραστηριότητα του ξενιστή εξαιτίας του γεγονότος ότι προκαλούν κλείσιμο των στομάτων των φύλλων. Επιπλέον, η έκφραση γονιδίων που σχετίζονται με την άμυνα του ξενιστή υπερέχει έναντι άλλων λειτουργιών του οδηγώντας σε αναστολή γονιδίων σχετιζόμενων με την φωτοσύνθεση (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

Διαπνοή

Τα παθογόνα και οι εχθροί που προσβάλλουν τα φύλλα του φυτού προκαλούν ζημιές στην εφυμενίδα και στην επιδερμίδα με αποτέλεσμα να προκαλείται αύξηση του ρυθμού διαπνοής, κάτι το οποίο οδηγεί σε ανεξέλεγκτη απώλεια νερού από τα φύλλα. Άλλη μία επίπτωση της προσβολής από εχθρούς ή παθογόνα είναι η δυσλειτουργία των καταφρακτικών κυττάρων που προκαλεί το συνεχές άνοιγμα των στομάτων. Και στις δύο περιπτώσεις, εάν δεν αυξηθεί η ταχύτητα άντλησης νερού από τη ρίζα και μεταφοράς του προς το υπέργειο τμήμα του φυτού τότε το φυτό εμφανίζει συμπτώματα μάρανσης στα φύλλα καθώς τα κύτταρά του παύουν να βρίσκονται σε σπαργή. Όταν το φυτό αντιληφθεί την προσβολή, ενεργοποιείται ο μηχανισμός κλείσιμου των στομάτων για τον περιορισμό των απωλειών νερού από αυτά (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

Αναπνοή

Παρατηρείται αύξηση της αναπνοής σε περιπτώσεις προσβολής από βιοτικούς παράγοντες επειδή με αυτόν τον τρόπο καλύπτονται οι ανάγκες της επαγόμενης άμυνας. Στις ευπαθείς ποικιλίες, αυτή η αύξηση έχει παρατεταμένη διάρκεια ενώ στις ανθεκτικές ποικιλίες,

παρατηρείται μείωση της αναπνευστικής δραστηριότητας λίγο μετά από την προσβολή. Η αύξηση της αναπνευστικής δραστηριότητας συνεπάγεται την παραγωγή και δραστηριοποίηση αναπνευστικών ενζύμων τα οποία με τη σειρά τους ενεργοποιούν το βιοχημικό μονοπάτι των φωσφορικών πεντοζών, ενώσεις οι οποίες είναι υπεύθυνες για την βιοσύνθεση φαιολικών ενώσεων και άλλων δευτερογενών μεταβολιτών της άμυνας του φυτού (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

Μεταφορά νερού και ανόργανων θρεπτικών στοιχείων

Οι ζημιές στα αγγεία του ξύλου επηρεάζουν τη μεταφορά ανόργανων θρεπτικών συστατικών και νερού. Η ρίζα αντιμετωπίζει πρόβλημα στην άντληση νερού και ανόργανων στοιχείων από το έδαφος και μεταφοράς τους προς το υπέργειο τμήμα του φυτού διότι τα αγγεία μπορεί είτε να έχουν υποστεί ζημιά από την δράση του παθογόνου ή του εχθρού είτε να έχουν φράξει λόγω της παρουσίας του παθογόνου ή και της παραγωγής πολυσακχαριτών (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

Μεταβολές στην κατανομή των πόρων

Τα παθογόνα και οι εχθροί έχουν την τάση να προκαλούν ανακατανομή των πόρων του ξενιστή τους προκειμένου τα θρεπτικά συστατικά του φυτού να μετακινηθούν προς την περιοχή προσβολής, δηλαδή την περιοχή παρουσίας του παθογόνου / εχθρού (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

Περατότητα κυτταρικών μεμβρανών

Τέλος, οι αλλαγές στην περατότητα των κυτταρικών μεμβρανών που πραγματοποιούνται μετά από προσβολή εχθρών ή παθογόνων οδηγούν στην διαρροή ηλεκτρολυτών από το κύτταρο, απώλεια διαμερισματοποίησης και εν τέλει, στο θάνατο των κυττάρων (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

1.2.3.1 Αμυντικοί μηχανισμοί του φυτού ενάντια στις προσβολές εντόμων : Μηχανισμοί αποφυγής

Τα φυτά δύναται να αντιμετωπίσουν τους βιοτικούς παράγοντες καταπόνησης μέσω δύο βασικών στρατηγικών, της αποφυγής και της ανθεκτικότητας. Η αποφυγή έχει ως στόχο την παρεμπόδιση της εισόδου του παθογόνου στους ιστούς του φυτού – ξενιστή ή την αποτροπή κατανάλωσης των ιστών του από φυτοφάγους οργανισμούς (έντομα, ακάρεα). Για την επίτευξη της αποφυγής της προσβολής, τα φυτά διαθέτουν την θεμελιώδη προϋπάρχουσα άμυνα, δηλαδή ένα σύνολο αμυντικών μηχανισμών οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την μόνιμη προστασία των φυτικών ιστών και οργάνων. Η ανθεκτικότητα σχετίζεται με την επαγόμενη άμυνα του φυτού – ξενιστή η οποία ενεργοποιείται όταν ο βιοτικός παράγοντας καταπόνησης έχει πια εισέλθει στους ιστούς του ξενιστή και πρέπει να αντιμετωπιστεί εκεί. Με λίγα λόγια, η επαγόμενη άμυνα είναι το σύνολο των αμυντικών βιοχημικών μηχανισμών που εκδηλώνονται μόνο όταν τα φυτικά κύτταρα αντιληφθούν την προσβολή (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

Οι μηχανισμοί αποφυγής περιλαμβάνουν μορφολογικά χαρακτηριστικά των φυτών που έχουν αμυντικό χαρακτήρα. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι η εφυμενίδα και οι κηροί που αποτελούν ένα συνεχές στρώμα το οποίο καλύπτει όλα τα υπέργεια μέρη του φυτού. Εξαιτίας του υδρόφοβου χαρακτήρα τους περιορίζουν τις απώλειες νερού από το φυτό μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες κατανάλωσής τους από τους εχθρούς. Οι αδενώδεις τρίχες, επιδερμικά

εξαρτήματα ορισμένων φυτών, είναι υπεύθυνες για την παραγωγή και έκκριση αιθέριωνέλαιων τα οποία είναι πτηρικά μίγματα δευτερογενών μεταβολιτών που συχνά παρουσιάζουν τοξική δράση έναντι παθογόνων και εχθρών. Άλλα είδη φυτών, όπως τα κωνοφόρα, εκκρίνουν ρητίνη από τους ρητινοφόρους αγωγούς που διαθέτουν εμποδίζοντας έτσι τα έντομα να καταναλώσουν τον ιστό και επουλώνοντας ταυτόχρονα τα τραύματα του δένδρου (Εικόνα 36). Επίσης, πολυμερή όπως η λιγνίνη και η κυτταρίνη προσφέρουν αμυντική θωράκιση στους φυτικούς ιστούς καθώς παρεμποδίζουν την είσοδο παθογόνων ή καθιστούν τους ιστούς δύσπεπτους. Ένας άλλος μηχανισμός προστασίας των φυτών από εχθρούς είναι η έκκριση γαλακτώδους χυμού ο οποίος παράγεται από τους γαλακτοφόρους σωλήνες. Αυτός ο χυμός έχει τοξική δράση στους φυτοφάγους εχθρούς διότι περιέχει αλκαλοειδή, φαινολικές ουσίες, πρωτεΐνες, χιτίνες κι άλλες ουσίες με τοξική δράση (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).



Εικόνα 36 : Εκκρινόμενη ρητίνη σε κορμό κερασιάς (www.commonswikimedia.org)

Τα χυμοτόπια των επιδερμικών και παρεγχυματικών κυττάρων είναι υπεύθυνα για την αποθήκευση μεγάλου αριθμού δευτερογενών μεταβολιτών που συμβάλλουν στην άμυνα των φυτών έναντι παθογόνων και εχθρών. Τέτοιοι μεταβολίτες είναι οι φαινολικές ουσίες (ταννίνες), πολλά τερπένια (πυρεθροειδή, σεσκιτερπενικές λακτόνες, στεροειδή, λιμονοειδή), αζωτούχες ενώσεις (αλκαλοειδή, θειογλυκοσίδια, κυανογόνα γλυκοσίδια) και μη πρωτεϊνικά αμινοξέα. Οι μεταβολίτες αυτοί μπορεί να έχουν τοξική ή απωθητική δράση ή να προκαλούν ανάσχεση της ανάπτυξης ή ακόμα και θάνατο των εχθρών και παθογόνων των φυτών (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

1.2.3.2 Αμυντικοί μηχανισμοί του φυτού ενάντια στις προσβολές εντόμων : Μηχανισμοί ανθεκτικότητας

Όταν η προϋπάρχουσα άμυνα του φυτού δεν είναι επαρκής για να σταματήσει την είσοδο του παθογόνου ή εχθρού εντός των ιστών του φυτού τότε ενεργοποιείται η επαγόμενη άμυνα. Η επαγόμενη άμυνα περιλαμβάνει τα στάδια της αντίληψης του εχθρού / παθογόνου, διαβίβασης του σήματος και απάντησης εκ μέρους του φυτού (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

Η αντίληψη της προσβολής από φυτοφάγους εχθρούς βασίζεται στους διεγέρτες. Αυτοί είναι μόρια τα οποία ανιχνεύονται από τα φυτά και χωρίζονται στους διεγέρτες που σχετίζονται με φυτοφάγα και σε αυτούς που προέρχονται από τους τραυματισμένους φυτικούς ιστούς. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει μόρια ή και πρωτεΐνες τα οποία εντοπίζονται στα υγρά ωοτοκίας ή στις εκκρίσεις των σιελογόνων αδένων των εχθρών (βρουσίνη, β-γλυκοσιδάση). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν μόρια τα οποία προέρχονται από τους τραυματισμένους φυτικούς ιστούς και έχουν τροποποιηθεί μετά τη δράση των εχθρών (ολιγοσακχαρίτες, πηκτίνες από τα κυτταρικά τοιχώματα του φυτού). Επίσης, υπάρχουν τροποποιημένα λιπίδια τα οποία εντοπίζονται στη σίελο των εντόμων και αποτελούν ενώσεις λιπαρών οξέων, προερχόμενων από το ίδιο το έντομο, με αμινοξέα, προερχόμενα από το φυτό (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

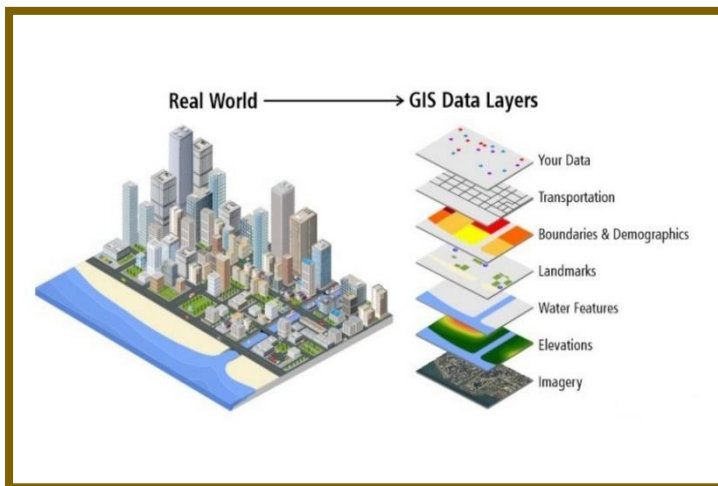
Μετά την αντίληψη της προσβολής, σειρά έχει η διαβίβαση του σήματος για την ενεργοποίηση της άμυνας του φυτού. Σπουδαίο ρόλο στη διαδικασία κατέχει το γιασμονικό

οξύ, μία ορμόνη που φυσιολογικά βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα στα φύλλα υγιών φυτών κι έτσι είναι δυνατή η συσσώρευση ορισμένων πρωτεϊνών (JAZ πρωτεΐνες) οι οποίες με τη σειρά τους καταστέλλουν τη μεταγραφή αμυντικών γονιδίων του φυτού. Σε αντίθετη περίπτωση, οι πρωτεΐνες καταστρέφονται μετά τη δράση εχθρών, κάτι που οδηγεί στην έκφραση και μεταγραφή των αμυντικών γονιδίων προκειμένου αυτά να δράσουν ενάντια στους εχθρούς. Το γιασμονικό οξύ μεταφέρεται διασυστηματικά στα φύλλα μέσω των αγγείων του ηθμού. Άλλη μία ουσία που είναι υπεύθυνη για την επαγωγή αμυντικών γονιδίων είναι η καλμοντουλίνη, η οποία παράγεται μετά από συσσώρευση ιόντων ασβεστίου στο κυτταρόπλασμα (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

Τελευταίο στάδιο του μηχανισμού ανθεκτικότητας των φυτών έναντι εχθρών είναι η απόκριση, δηλαδή η ενεργοποίηση των αμυντικών μηχανισμών. Οι αμυντικοί μηχανισμοί έχουν τοπική αλλά και διασυστηματική δράση. Οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την ενεργοποίηση της άμυνας του φυτού έχουν άμεσο και έμμεσο χαρακτήρα. Άμεσο χαρακτήρα έχουν αμυντικές και τραυματικές πρωτεΐνες αλλά και τοξικές ουσίες. Η σύνθεση αμυντικών και τραυματικών πρωτεϊνών επάγεται από το γιασμονικό οξύ και περιλαμβάνει πληθώρα αμυντικών μορίων όπως λεκτίνες, χιπινάσες, παρεμποδιστές πρωτεϊνών και οξειδωτικά ένζυμα. Από αυτά τα μόρια, άλλα παρεμποδίζουν τους εχθρούς να προσλαμβάνουν θρεπτικά συστατικά από την τροφή (λεκτίνες) ή μειώνουν την ικανότητα πέψης και μεταβολισμού των φυτικών ιστών (παρεμποδιστές πρωτεϊνών), άλλα υδρολύουν τη χιτίνη που περιέχει το σώμα των εντόμων (χιπινάσες) ενώ άλλα προκαλούν παραγωγή τοξικών προϊόντων εντός του σώματος των εχθρών (οξειδωτικά ένζυμα). Οι αντιδράσεις έμμεσου χαρακτήρα περιλαμβάνουν τη σύνθεση πτητικών ουσιών που στοχεύουν στην παροχή στέγης ή τροφής σε αρπακτικά με τελικό σκοπό να απαλλαγούν τα φυτά από τους εχθρούς. Συγκεκριμένα, παράγονται μεθυλιωμένα παράγωγα του γιασμονικού και του σαλικυλικού οξέος περίπου 24 ώρες μετά την προσβολή και πτητικά συστατικά των πράσινων φύλλων αμέσως μετά τον τραυματισμό των φυτικών ιστών. Αυτά τα πτητικά αποτελούν είτε σήματα προσέλκυσης αρπακτικών είτε σήματα συναγερμού για τα γειτονικά φυτά προκειμένου να προετοιμαστούν για ενδεχόμενη προσβολή (Καραμπουρνιώτης, Λιακόπουλος & Νικολόπουλος, 2012).

1.3 Τηλεπισκόπηση (Remote Sensing)

Η τηλεπισκόπηση (remote sensing) είναι η επιστήμη ανίχνευσης και επιτήρησης των φυσικών χαρακτηριστικών μιας δεδομένης περιοχής με την μέτρηση της ανακλώμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από απόσταση – συνήθως μέσω ενός δορυφόρου ή ενός ΣμηΕΑ (Σύστημα Μη Επανδρωμένου Αεροσκάφους – Unmanned Aerial Systems, UASs). Ειδικοί αισθητήρες (θερμικές, πολυφασματικές, υπερφασματικές κάμερες) χρησιμοποιούνται για την συλλογή φωτογραφιών οι οποίες με τη σειρά τους παρέχουν πληροφορίες για την υπό εξέταση περιοχή. Οι πληροφορίες αυτές παρέχονται μετά από επεξεργασία των φωτογραφιών σε Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographic Information System, GIS), πιο συγκεκριμένα, συστήματα υπολογιστή τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα επεξεργασίας, ανάλυσης δεδομένων και εμφάνισης πληροφοριών γεωγραφικής αναφοράς (Εικόνα 37) (United States Geological Survey).



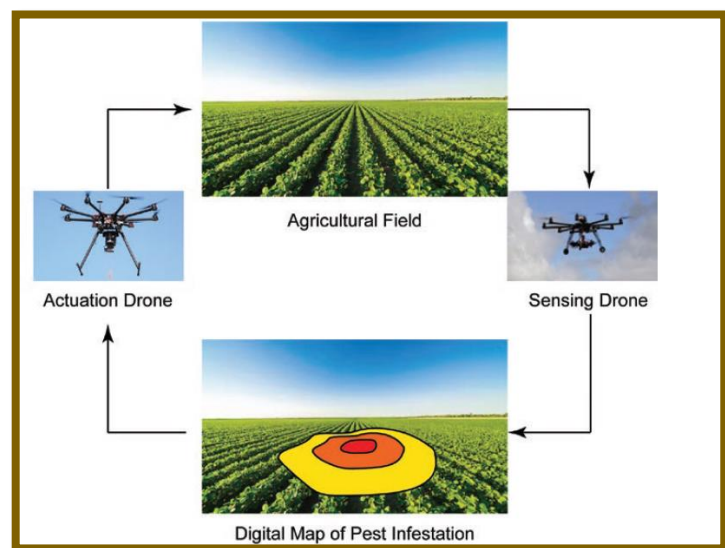
Εικόνα 37 : Παράδειγμα χαρτογράφησης με Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (GIS) (www.pobonline.com)

1.3.1 Τηλεπισκόπηση στη Γεωπονία

Η τηλεπισκόπηση βρίσκει εφαρμογή σε πολλά ερευνητικά πεδία, όπως αυτά της τοπογραφίας, της αρχαιολογίας, της γεωπονίας (Roman & Ursu, 2016). Όσον αφορά την γεωπονία, μπορεί να επιφέρει πολλές βελτιώσεις σε καθημερινές εργασίες. Για παράδειγμα, η τηλεπισκόπηση δίνει τη δυνατότητα να πραγματοποιείται πρόβλεψη της σοδειάς, παρακολούθηση της φυτοϋγείας της καλλιέργειας, του

φυτρώματος των φυτών, του συστήματος άρδευσης, της υγρασίας, των αναγκών της καλλιέργειας σε λίπανση, της ανάπτυξης των φυτών κλπ. Επιπλέον, χρησιμοποιείται ακόμα και από κτηνοτρόφους για την παρακολούθηση κοπαδιών ζώων (Lum *et al.*, 2016).

Χώρες όπως οι Η.Π.Α., η Αυστραλία και η Γερμανία αρχίζουν να ενσωματώνουν τέτοιου είδους τεχνολογίες ολοένα και περισσότερο στον πρωτογενή τους τομέα (Zhang & Kovacs, 2012· lost Filho *et al.*, 2020). Οι πρώτες αναφορές για χρήση ΣμηΕΑ στην γεωργία εμφανίστηκαν γύρω στο 1998 και έχουν αυξηθεί ραγδαία την τελευταία δεκαετία. Μέχρι το 2016, οι εισπράξεις της παγκόσμιας αγοράς ΣμηΕΑ υπολογίζονταν γύρω στα \$6,8 δις αναμένοντας να φτάσουν τα \$14,3 δις μέχρι το 2028 ενώ συγκεκριμένα τα μικρά ΣμηΕΑ που χρησιμοποιούνται στη γεωργία αντιπροσώπευαν τα \$500 εκατομμύρια των εισπράξεων της αγοράς το 2016, με το ποσό να αναμένεται να αγγίξει τα \$3,7 δις μέχρι το 2022. Τα είδη των ΣμηΕΑ που χρησιμοποιούνται στη γεωργία είναι το καταγραφικό, στο οποίο αναρτώνται αισθητήρες για την λήψη φωτογραφιών και την εύρεση σημείων προσβολής (hotspots) στον αγρό και τη δημιουργία ψηφιακών χαρτών, και το ψεκαστικό, με το οποίο γίνεται εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων ή λίπανσης στα σημεία του χωραφιού που έχουν υποδειχθεί μέσω των χαρτών (Εικόνα 38) (lost Filho *et al.*, 2020).



Εικόνα 38 : Το καταγραφικό (sensing drone) και ψεκαστικό ΣμηΕΑ (actuation drone) τα οποία χρησιμοποιούνται μαζί προκειμένου να ανιχνευθεί η καταπόνηση των φυτών μιας καλλιέργειας και τα κυριότερα σημεία της μέσα στο χωράφι (hotspot) με την δημιουργία χαρτών και να γίνει στη συνέχεια επέμβαση, εάν κριθεί απαραίτητο (lost Filho *et al.*, 2020)

Η χρήση ΣμηΕΑ για ανίχνευση της καταπόνησης των φυτών ή για ψεκασμό της καλλιέργειας έχει ορισμένα προτερήματα έναντι των συμβατικών μεθόδων πραγματοποίησης των αντίστοιχων διαδικασιών στον αγρό. Πρώτα απ'όλα, τα ΣμηΕΑ παρέχουν τη δυνατότητα

γρήγορης και εύκολης επιθεώρησης της καλλιέργειας μέσω του χάρτη που παράγεται από τα δεδομένα που έχουν συλλέξει αφού ο Γεωπόνος μπορεί να επιλέγει τις υποψήφιες ζώνες που θα επισκεφθεί στον αγρό για πιο λεπτομερείς επιθεωρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται σημαντικά ο χρόνος που ο ειδικός χρειάζεται να μείνει στον αγρό προκειμένου να γίνει η διάγνωση (Vanegas *et al.*, 2018• Maes & Steppe, 2019• *lost Filho et al.*, 2020). Αναλόγως του αισθητήρα που θα χρησιμοποιηθεί, είναι εφικτό να γίνει ανίχνευση της ζημιάς όχι μόνο όταν τα συμπτώματα είναι ορατά στον ανθρώπινο οφθαλμό αλλά και στα πρωταρχικά στάδια μιας ασθένειας ή προσβολής από έναν εχθρό όπου συμβαίνουν μέσα στο φυτό βιοχημικές και φυσιολογικές αλλαγές οι οποίες δεν είναι ακόμα ανιχνεύσιμες από τον ανθρώπινο οφθαλμό (Maes & Steppe, 2019• *lost Filho et al.*, 2020). Ακόμα, έκθεση των Ηνωμένων Εθνών αναφέρει ότι η ασφάλεια των τροφίμων αυξάνεται χάρη στη χρήση των ΣμηΕΑ στη γεωργία καθώς γίνεται εντοπισμένη εφαρμογή φυτοπροστατευτικών προϊόντων στον αγρό με μεγάλη ακρίβεια, αποκλειστικά στα φυτά στα οποία κρίνεται απαραίτητο ότι πρέπει να γίνει εφαρμογή, κάτι το οποίο προστατεύει ταυτοχρόνως το περιβάλλον (μειωμένες εισροές φυτοπροστατευτικών προϊόντων) και γενικότερα το οικοσύστημα (προστασία φυσικών εχθρών, ζώων μη στόχων κλπ) (*lost Filho et al.*, 2020).

Εδώ θα πρέπει να τονιστεί ότι μέσω της τηλεπισκόπησης δεν επιτυγχάνεται η ανίχνευση του παράγοντα καταπόνησης παρά μόνο οι διαφορές στην ανάκλαση του φωτός της βλάστησης που προκύπτουν από αυτόν. Βέβαια η εικόνα των μη υγιών φυτών στον αγρό μπορεί να δώσει ορισμένες πληροφορίες σχετικά με το εάν πρόκειται για βιοτικό ή αβιοτικό στρεσογόνο παράγοντα. Έτσι, η επιθεώρηση στον αγρό από Γεωπόνο κρίνεται απαραίτητη προκειμένου να πραγματοποιηθεί διάγνωση (*lost Filho et al.*, 2020).

1.3.2 Είδη χρησιμοποιούμενων αισθητήρων

Τα είδη των αισθητήρων που χρησιμοποιούνται στην τηλεπισκόπηση για τον εντοπισμό της καταπόνησης των φυτών είναι οι οπτικοί, θερμικοί, πολυφασματικοί και υπερφασματικοί αισθητήρες (Maes & Steppe, 2019• *lost Filho et al.*, 2020).

Οπτικοί αισθητήρες (RGB)

Συλλέγει πληροφορίες στο ορατό φάσμα της ακτινοβολίας (400-700 nm : blue (455-495 nm), green (540-580 nm), red (658-678 nm) bands). Οι οπτικοί αισθητήρες είναι χαμηλού κόστους και μπορούν να έχουν υψηλή διακριτική ικανότητα αλλά συνήθως διαθέτουν χαμηλής ποιότητας φασματική ανάλυση δίνοντας περιορισμένες φασματικές πληροφορίες. Εξαιτίας της υψηλής διακριτικής ικανότητας που δύναται να έχουν (12 MP ή και παραπάνω), είναι εφικτή η οπτική αναγνώριση προσβολών, ασθενειών και εχθρών (Blankenship, 2010• Dash *et al.*, 2017• Maes *et al.*, 2017• Maes & Steppe, 2019• *lost Filho et al.*, 2020).

Θερμικοί αισθητήρες

Συλλέγουν πληροφορίες από ένα μόνο φάσμα της ακτινοβολίας και από αυτές τις φωτογραφίες μπορεί να εξαχθεί η τιμή της θερμοκρασίας της φυλλικής επιφάνειας. Οι θερμικοί αισθητήρες χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλή ανάλυση στη φωτογραφία που τραβάνε (από 0,077 MP (320x240 pixels) έως και 0,33 MP (640x512 pixels)) (Maes *et al.*, 2017• Maes & Steppe, 2019• *lost Filho et al.*, 2020).

Πολυφασματικοί αισθητήρες

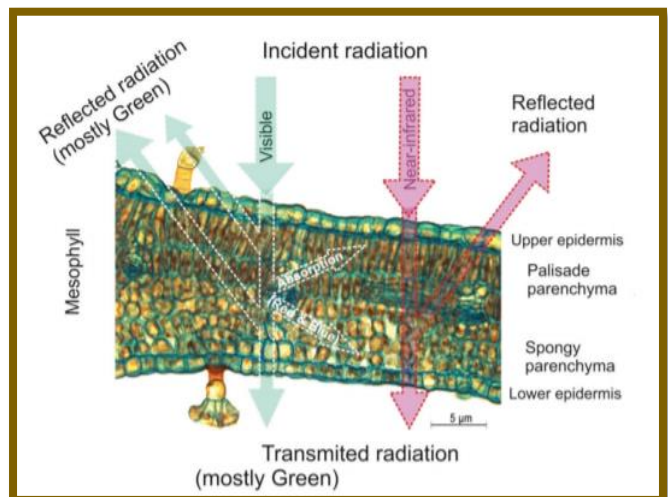
Αποτελούνται από ένα σετ αισθητήρων και διαφορετικών φακών, με κάθε αισθητήρα να είναι ευαίσθητος σε μία μόνο φασματική περιοχή. Ο αριθμός των φασμάτων που αιχμαλωτίζει ένας τέτοιος αισθητήρας ποικίλλουν μεταξύ 3 και 12. Οι πολυφασματικοί αισθητήρες διαθέτουν καλύτερη φασματική ανάλυση από τους οπτικούς αισθητήρες επομένως είναι σε θέση να δώσουν περισσότερες φασματικές πληροφορίες για το υπό εξέταση αντικείμενο και γι' αυτόν τον λόγο, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση προσβολών από εχθρούς και παθογόνα σε πρωταρχικά στάδια (Maes & Steppe, 2019• Iost Filho *et al.*, 2020).

Υπερφασματικοί αισθητήρες

Οι υπερφασματικοί αισθητήρες είναι ακόμα πιο λεπτομερείς στις πληροφορίες που παρέχουν αφού καλύπτουν μία αρκετά μεγάλη φασματική ζώνη (400-1000 nm) η οποία χωρίζεται σε στενότερες ζώνες που καθεμία από αυτές έχει μήκος κύματος μικρότερο των 10 nm συνήθως. Επομένως οι πληροφορίες που λαμβάνονται από αυτού του είδους τους αισθητήρες είναι ακόμα πιο λεπτομερείς και καλύτερης ανάλυσης. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα που παρέχουν οι υπερφασματικοί αισθητήρες είναι το γεγονός ότι είναι σε θέση να αιχμαλωτίσουν και να απεικονίσουν ανεπαίσθητες διαφορές στην ανάκλαση του φωτός της βλάστησης παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο τη δυνατότητα για πρόωρη ανίχνευση της καταπόνησης στα φυτά, ακόμα και πριν τα ορατά συμπτώματα. Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα που παρέχουν αυτοί οι αισθητήρες, όμως, τα τρία βασικά μειονεκτήματά τους είναι το βάρος τους, το οποίο συνήθως είναι μεγάλο και απαιτούν ΣμηΕΑ με μεγαλύτερο ωφέλιμο φορτίο, το υψηλό τους κόστος και το γεγονός ότι τα δεδομένα που λαμβάνουν απαιτούν περισσότερο χρόνο και εμπειρία για να αναλυθούν (Maes & Steppe, 2019• Iost Filho *et al.*, 2020).

1.3.3 Δείκτες φυτούγείας (Vegetation indices, VIs)

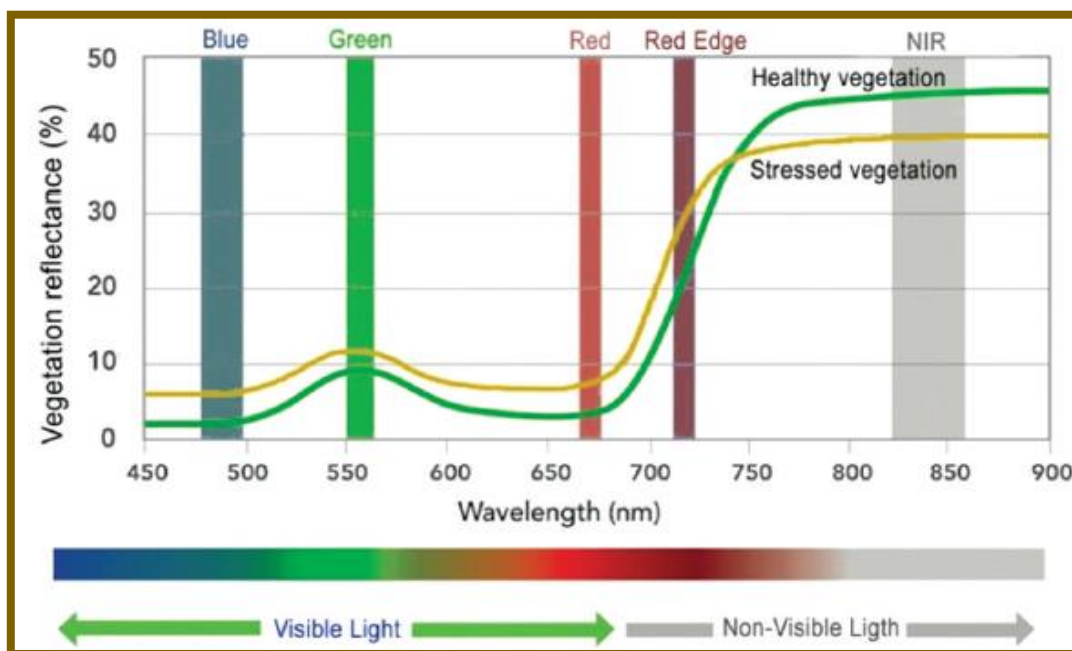
Η απορρόφηση και ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας σε διαφορετικά μήκη κύματος του φωτός είναι συνέπεια της κυτταρικής δομής του φύλλου. Όπως έχει αναφερθεί στην υποενότητα 2.2.2.1, τα υγιή φύλλα απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό της ακτινοβολίας της μπλε και κόκκινης ζώνης του ορατού φάσματος (450 nm και 670 nm αντίστοιχα) και ανακλούν αυτή της πράσινης ζώνης (533 nm), κάτι που αποτελεί την βασική αιτία για την οποία τα φύλλα φαίνονται πράσινα στον ανθρώπινο οφθαλμό (Εικόνα 39). Το φως του μπλε και κόκκινου φάσματος χρησιμοποιείται για φωτοσύνθεση από το φυτό, όπως έχει περιγραφεί εκτενώς στην υποενότητα 2.2.2, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό της πράσινης ακτινοβολίας ανακλάται κυρίως χάρη στις χρωστικές που βρίσκονται εντός των χλωροπλαστών του πασσαλώδους παρεγχύματος των φύλλων (Roman & Ursu, 2016). Μία άλλη περιοχή στην οποία τα υγιή φύλλα ανακλούν έντονα την ακτινοβολία είναι αυτή κοντά στο υπέρυθρο (NIR, near-infrared) η οποία περιλαμβάνει φως μήκους κύματος



Εικόνα 39 : Η δομή ενός υγιούς φύλλου και το μέρος της ακτινοβολίας που απορροφά και ανακλά (Roman & Ursu, 2016)

700-1400 nm αλλά δεν αποτελεί μέρος του ορατού φάσματος και γι' αυτό δε γίνεται αντιληπτό από τον άνθρωπο. Η υψηλή ανάκλαση σε αυτή την περιοχή είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης του σπογγώδους παρεγχύματος στο μεσόφυλλο (Roman & Ursu, 2016· Dash *et al.*, 2017· lost Filho *et al.*, 2020).

Η απορρόφηση και ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, όμως, εξαρτώνται από την δομή του φύλλου επομένως όταν αυτή αλλάξει εξαιτίας προσβολής από παθογόνα, εχθρούς ή μιας αβιοτικής καταπόνησης (ξηρασία, υψηλές θερμοκρασίες κ.ά.) τότε αλλάζει και η φασματική εικόνα του φύλλου και κατ' επέκταση, του φυτού. Στην **Εικόνα 40** φαίνονται οι καμπύλες ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας της υγιούς και της καταπονημένης βλάστησης (**Εικόνα 40**) (Roman & Ursu, 2016).



Εικόνα 40 : Οι καταπονήσεις προκαλούν βλάβες στις χρωστικές με αποτέλεσμα να χάνουν τις απορροφητικές τους ιδιότητες κι έτσι, ανακλούν μεγαλύτερο ποσοστό φωτός της μπλέ και κόκκινης ζώνης (κίτρινη γραμμή στο διάγραμμα), απ' ότι θα συνέβαινε φυσιολογικά (πράσινη γραμμή στο διάγραμμα), ενώ παράλληλα αυξάνεται το ποσοστό ανάκλασης της πράσινης ακτινοβολίας και μειώνεται η ανάκλαση της ακτινοβολίας NIR (αυξημένη απορρόφηση) αφού συνήθως το σπογγώδες παρέγχυμα που είναι υπεύθυνο για την ανάκλασή της βλάπτεται υπό συνθήκες καταπόνησης με αποτέλεσμα να συρρικνώνεται (Roman & Ursu, 2016)

Ως δείκτη ορίζουμε ένα νούμερο που ποσοτικοποιεί την ένταση ενός φαινομένου το οποίο είναι πολύ σύνθετο για να αναλυθεί σε γνωστές παραμέτρους (Bannari *et al.*, 1995). Οι δείκτες φυτοϋγείας υπολογίζονται με μαθηματικές εκφράσεις οι οποίες χρησιμοποιούν τις ανακλάσεις σε διάφορες ζώνες του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας προκειμένου να τονίσουν χαρακτηριστικά της υγείας των φυτών κι έτσι, χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την ερμηνεία των φωτογραφιών που προέρχονται από την τηλεπισκόπηση (Bannari *et al.*, 1995· Roman & Ursu, 2016). Μάλιστα, σε πολλές περιπτώσεις, αυτοί οι δείκτες συμβάλλουν στο να γίνουν αντιληπτές από τον άνθρωπο ανεπαίσθητες αλλαγές που συμβαίνουν εντός του φυτού, πριν ακόμα εμφανιστούν τα συμπτώματα που προκαλεί ο στρεσογόνος παράγοντας σε αυτό (Roman & Ursu, 2016).

Μέχρι σήμερα, έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί πάρα πολλοί δείκτες που βοηθούν τους ερευνητές να ερμηνεύσουν την κατάσταση της υγείας των φυτών. Οι δείκτες φυτοϋγείας διακρίνονται σε αυτούς που συνδυάζουν δύο ζώνες του φάσματος της ακτινοβολίας και σε εκείνους που συνδυάζουν περισσότερες από δύο ζώνες του φάσματος σε πιο σύνθετες

μαθηματικές εκφράσεις. Ο πιο διαδεδομένος δείκτης που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση του αποχρωματισμού των φύλλων που προκαλείται από κάποιου είδους καταπόνηση από παράγοντες σχετιζόμενους με την φυσιολογία του φυτού είναι ο δείκτης NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) ο οποίος συνδυάζει την ανάκλαση στο NIR και στο κόκκινο φάσμα της ακτινοβολίας (Lum *et al.*, 2016· Dash *et al.*, 2017· Maes & Steppe, 2019· Iost Filho *et al.*, 2020). Ο δείκτης αυτός συνδυάζει την ανάκλαση στο NIR και στην κόκκινη ζώνη του φάσματος αλλά παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Για παράδειγμα, σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης, αυτός ο δείκτης κορρένεται με αποτέλεσμα να μην αλλάζει η τιμή του σε ανεπαίσθητες αλλαγές της συγκέντρωσής της. Επιπρόσθετα, πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές ορισμένων δεικτών, όπως για παράδειγμα του NDVI, είναι λογικό να μειώνονται καθώς το φύλλωμα του φυτού γερνάει εξαιτίας της ολοένα και μειωμένης φωτοσυνθετικής ικανότητας των γηρασμένων φύλλων η οποία συνοδεύεται με αυξημένα ανάκλαση στην κόκκινη ζώνη του φάσματος (Dash *et al.*, 2017). Ένας άλλος σημαντικός δείκτης είναι ο RENDVI (Red Edge Normalized Difference Vegetation Index) ο οποίος συνδυάζει την ανάκλαση στο NIR και στην περιοχή red edge του φάσματος. Η περιοχή red edge είναι μια ιδιαίτερα σημαντική περιοχή του φάσματος γύρω στα 700 nm (690-740 nm), μεταξύ της κόκκινης ζώνης του φάσματος (660-680 nm) και της ζώνης του NIR (700-1400 nm), η οποία σχετίζεται με την συγκέντρωση της χλωροφύλλης (Dash *et al.*, 2017· Iost Filho *et al.*, 2020). Πιο συγκεκριμένα, αποτελεί την ζώνη υψηλού ενδιαφέροντος για την ανίχνευση της καταπόνησης των φυτών σε πρώιμο στάδιο επειδή αποτελεί το τμήμα του φάσματος όπου η ανάκλαση αυξάνεται απότομα από την ζώνη έντονης απορρόφησης της κόκκινης ακτινοβολίας στην ζώνη έντονης ανάκλασης κοντά στο υπέρυθρο φάσμα (NIR). Γι' αυτό τον λόγο, ο δείκτης RENDVI είναι πολύ ευαίσθητος σε αλλαγές που συμβαίνουν στην συγκέντρωση της χλωροφύλλης (Dash *et al.*, 2017). Άλλοι δείκτες που χρησιμοποιούνται είναι ο GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index), ο οποίος συνδυάζει τις ανακλάσεις στη ζώνη NIR και στην πράσινη ζώνη, ο MCARI (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index), ο οποίος χρησιμοποιεί τις ανακλάσεις σε NIR, κόκκινη και πράσινη ζώνη του φάσματος προκειμένου να ποσοτικοποιήσει την απορρόφηση της ακτινοβολίας από τις χλωροφύλλες (ο πλέον ευαίσθητος δείκτης σε αλλαγές στην συγκέντρωση των χλωροφυλλών και στον δείκτη LAI (Leaf Area Index, φυλλική επιφάνεια ανά μονάδα εδάφους)), ο MSI (Moisture Stress Index), ο οποίος συνδυάζει την περιοχή NIR με την περιοχή φωτός SWIR (Short-wave Infrared), και πολλοί ακόμα (Dash *et al.*, 2017· Otsu *et al.*, 2018· Vanegas *et al.*, 2018· Iost Filho *et al.*, 2020).

Οι δείκτες φυτοϋγείας λαμβάνουν τιμές καθαρού αριθμού από (-1) έως και 1. Όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η τιμή του δείκτη για το εκάστοτε φυτό τόσο πιο υγιές είναι (Εικόνα 41) (United States Geological Survey).



Εικόνα 41 : Οι τιμές που λαμβάνει ο δείκτης NDVI. Τιμή NDVI<0 υποδεικνύει έδαφος, ανθρώπινες κατασκευές ή νεκρούς οργανισμούς (π.χ. νεκρά φυτά). Τιμή NDVI 0-0,33 υποδεικνύει έντονα καταπονημένο φυτό ή αραιή βλάστηση. Τιμή NDVI 0,33-0,66 υποδεικνύει ελαφρώς καταπονημένο φυτό ή μέτρια πυκνή βλάστηση. Τιμή NDVI 0,66-1 υποδεικνύει υγιές φυτό ή πυκνή βλάστηση (United States Geological Survey, www.sentera.com)

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι δείκτες φυτοϋγείας που έχουν εφαρμοστεί σε έρευνες όπου εξετάζαν την ανίχνευση εντόμων – εχθρών με την χρήση της τηλεπισκόπησης ενώ στον πίνακα αναγράφονται ορισμένοι δείκτες φυτοϋγείας και οι μαθηματικές τους εκφράσεις (Εικόνα 42) (Πίνακας 1).

UAV Type	Crop	Pest	Sensor	Model Input	Model Output	Model Type
Rotary	Potato	Colorado potato beetle	Multispectral	NDVI, GNDVI	Damage detection	Linear regression
Rotary	Oak	Oak splendour beetle	Multispectral (CIR)	NDVI	Damage quantification	PCA
Fixed wing	onion	Thrips	Multispectral, NIR	NDVI	Damage detection	Visual inspection
Rotary	Pine forest	Pine processionary moth	RGB	Moisture stress index	Damage quantification	Logistic regression
Rotary	Canola	Green peach aphid	Multispectral, hyperspectral	NDVI	Potassium content (indirect)	Discriminant analysis
Fixed wing	Sorghum	Sugarcane aphid	Multispectral	NDVI	Aphid density	Linear regression
Rotary	Vineyard	Grapes Phylloxera	Multispectral, hyperspectral, RGB	Vegetation indices, DVM	Plant vigor	Linear regression
Rotary	Vineyard	Grapes Phylloxera	Multispectral, hyperspectral, RGB	Vegetation indices, DVM	Plant vigor	Linear regression
?	forest	N/A	RGB	Texture features	Damage detection	Random forest
Rotary	Chinese pine	Chinese pine caterpillar	Hyperspectral	Selected bands	Defoliation quantification	Piecewise PLSR

Εικόνα 42 : Έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί σε έντομα – εχθρούς σε διάφορες καλλιέργειες και οι δείκτες φυτοϋγείας που έχουν εφαρμοστεί για την ανίχνευσή της καταπόνησης που αυτοί προκαλούν (Barbedo, 2019)

Πίνακας 1 : Ορισμένοι από τους πιο συνηθισμένους δείκτες φυτοϋγείας και οι μαθηματικές τους εκφράσεις (Lum *et al.*, 2016· Dash *et al.*, 2017· Otsu *et al.*, 2018· Vanegas *et al.*, 2018)

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$\frac{NIR - Red}{NIR + Red}$
Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI)	$\frac{NIR - Red\ Edge}{NIR + Red\ Edge}$
Green Normalized Vegetation Index (GNDVI)	$\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$
Chlorophyll Index (CI)	$\frac{NIR}{Red\ Edge} - 1$
Normalized Difference Moisture Index (NDMI)	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$
Moisture Stress Index (MSI)	$\frac{SWIR}{NIR}$
Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI)	$(Red\ Edge - Red) * 0,2 (Red\ Edge - Green) \left(\frac{Red\ Edge}{Red} \right)$

Σκοπός της μελέτης

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής μελέτης είναι η χρήση της τηλεπισκόπησης για την δημιουργία χαρτών οι οποίοι θα καταδείξουν πιθανά σημεία προσβολής από έντομα – εχθρούς σε καλλιέργειες πυρηνοκάρπων και γιγαρτοκάρπων στο Δενδροκομείο του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών συγκριτικά με την επιτόπια παρατήρηση και διάγνωση στο χωράφι.

Στα αρχικά στάδια μιας προσβολής, δεν είναι ορατά τα συμπτώματα που ένας εχθρός προκαλεί στο ξενιστή του αλλά εντός του φυτού ενεργοποιούνται και λαμβάνουν χώρα μία σειρά από βιοχημικές αντιδράσεις που σκοπό έχουν να απωθήσουν ή ακόμα και να θανατώσουν τον εχθρό προκειμένου το φυτό να προστατευτεί, όπως περιγράφεται στην υποενότητα 2.2.3. Οι διαφορετικοί αισθητήρες που προσαρτήθηκαν σε ΣμηΕΑ και χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη δεδομένων από το δενδροκομείο είχαν ως σκοπό να ανιχνευθούν όχι μόνο τα δένδρα που παρουσιάζουν εικόνα καταπόνησης στο χωράφι αλλά πολύ περισσότερο, αυτά που εμφανίζονται υγιή αλλά στην πραγματικότητα, δεν είναι. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται μπορούν να ανιχνεύσουν την ανάκλαση πολλών ζωνών του φάσματος κι έτσι, αποτυπώνουν τις διαφορές στην ανάκλαση ενός φυτού που δημιουργούνται ως απόρροια των ανεπαισθητων αλλαγών που συμβαίνουν εντός των κυτταρικών δομών του εξαιτίας καταπόνησης από βιοτικό ή αβιοτικό παράγοντα. Μετά από κατάλληλη επεξεργασία των ανακλαστικών δεδομένων των φυτών και τη δημιουργία χάρτη στον οποίο έχει υπολογιστεί ο δείκτης φυτοϋγείας NDVI, τα φυτά τα οποία θα επισημαίνονταν ως «καταπονημένα», με βάση τη τιμή του συγκεκριμένου δείκτη, θα συγκρίνονταν με τα αποτελέσματα από την επιτόπια παρατήρηση στο δενδροκομείο προκειμένου να διαπιστωθεί εάν πράγματι δεδομένα από τέτοιου είδους αισθητήρες μπορούν να ανιχνεύσουν πρόωρα την καταπόνηση των φυτών.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες στις οποίες γινόταν συσχέτιση μεταξύ του δείκτη NDVI και της προσβολής από έντομα αλλά σε καμία από αυτές τις έρευνες δεν έχει γίνει αναφορά στη τιμή του δείκτη που θα πρέπει να λαμβάνεται ως οριακή προκειμένου ένα φυτό να θεωρείται υγιές (όταν η τιμή του δείκτη ξεπερνά αυτή την οριακή τιμή) ή όχι. Γι' αυτόν τον λόγο, κρίθηκε αναγκαίο να πραγματοποιηθούν πέντε συγκρίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων από την επιτόπια παρατήρηση και από την παρατήρηση μέσω τηλεπισκόπησης (αποτελέσματα δείκτη NDVI) και σε κάθε σύγκριση, τα αποτελέσματα από τη μέθοδο της τηλεπισκόπησης αλλάζουν καθώς αλλάζει η οριακή τιμή του δείκτη NDVI, πάνω από την οποία ένα φυτό θεωρείται υγιές.

Η χρήση αυτών των αισθητήρων στη τηλεπισκόπηση παρέχει τη δυνατότητα ανίχνευσης της φυτικής καταπόνησης αλλά όχι τη δυνατότητα εξακρίβωσης του παράγοντα καταπόνησης γι' αυτό και δεν μπορεί να αντικαταστήσει το ρόλο του Γεωπόνου στο πεδίο αλλά στόχος της είναι να καταστήσει τη δουλειά του ευκολότερη, γρηγορότερη και κατ' επέκταση, πιο αποτελεσματική.

Υλικά και Μέθοδοι

3.1 Πτήση

Για την πραγματοποίηση τηλεπισκόπησης πραγματοποιήθηκε πτήση στις 24 Σεπτεμβρίου 2021 με το ΣμηΕΑ Mera (μοντέλο MERA, έτος κατασκευής 2021, εταιρεία κατασκευής UcanDrone) στο Δενδροκομείο του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Το

συγκεκριμένο ΣμηΕΑ είναι τετρακόπτερο, κατηγορίας EASA C3, κατασκευασμένο από ανθρακόνημα, αλουμίνιο και πλαστικό, διαθέτει τέσσερα στροφέια, έχει μέγιστη εμβέλεια τηλεχειρισμού τα 12 km και μέγιστο βάρος κατά την απογείωση τα 5 κιλά (Εικόνα 43). Πάνω σε αυτό, προσαρτήθηκε η πολυφασματική κάμερα RedEdge MX (έτος κατασκευής 2018, εταιρεία κατασκευής MicaSense) η οποία ζυγίζει 231,9 γραμμάρια. Η συγκεκριμένη κάμερα διαθέτει πέντε ζώνες του φάσματος (blue – κέντρο στα 475 nm και 32 nm πλάτος της ζώνης, green – κέντρο στα 560 nm και 27 nm πλάτος της ζώνης, red – κέντρο στα 668 nm και 14 nm πλάτος της ζώνης, red edge – κέντρο στα 717 nm και 12 nm πλάτος της ζώνης,



Εικόνα 43 : Το ΣμηΕΑ Mera που χρησιμοποιήθηκε στην πτήση για την συλλογή δεδομένων (Φωτογραφία από Κάρελλα Κωνσταντίνο)

NIR – κέντρο στα 842 nm και 57 nm πλάτος της ζώνης), global shutter για τις RGB φωτογραφίες (που σημαίνει ότι κάθε ρικελ της φωτογραφίας λαμβάνεται κατά την ίδια χρονική στιγμή), μπορεί να πραγματοποιήσει λήψη μίας φωτογραφίας ανά δευτερόλεπτο (για όλες τις ζώνες του φάσματος που διαθέτει). Τέλος, η πλευρά του κάθε ρικελ που αιχμαλωτίζει ο φακός αντιστοιχεί σε 8 cm εδάφους (ground, sample distance, GSD) σε ύψος 120 μέτρων (Εικόνα 44). Επίσης, διαθέτει ενσωματωμένο GPS και δεν χρειάζεται βαθμονόμηση πριν την χρήση, κάτι το οποίο απλοποιεί αρκετά την διαδικασία λήψης και επεξεργασίας των φωτογραφιών.



Εικόνα 44 : Η πολυφασματική κάμερα MicaSense RedEdge MX που χρησιμοποιήθηκε στην πτήση για την λήψη των φωτογραφιών (www.geosense.gr)

Η αποστολή της πτήσης σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Mission Planner, ένα ανοιχτό λογισμικό της εταιρείας ArduPilot. Το ΣμηΕΑ επικοινωνεί με τον υπολογιστή μέσω αυτού του λογισμικού. Η σύνδεση γίνεται μέσω τηλεμετρίας, με κεραία που συνδέεται μέσω USB με τον υπολογιστή και επικοινωνεί ασύρματα με την κεντρική

μονάδα επεξεργασίας δεδομένων του ΣμηΕΑ (πιλότος) στην συχνότητα 57.600 baud (57,6 KHz) (Εικόνα 45). Έτσι, υπάρχει η δυνατότητα αμφίδρομης μεταφοράς δεδομένων ασύρματα. Σχεδιάστηκε, λοιπόν, η αποστολή στο Mission Planner, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 46, ορίστηκαν οι παράμετροι της ταχύτητας (5 m/sec), του ύψους πτήσης (70 m), του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο η πολυφασματική κάμερα θα πραγματοποιούσε λήψεις



Εικόνα 45 : Πάνω αριστερά, το καλώδιο τηλεμετρίας που χρησιμοποιείται στην «επικοινωνία» υπολογιστή – ΣμηΕΑ. Κάτω αριστερά, ο πιλότος του ΣμηΕΑ που δέχεται και στέλνει δεδομένα στον υπολογιστή. Δεξιά, ο υπολογιστής συνδεδεμένος με το καλώδιο τηλεμετρίας (Φωτογραφία από Αραποστάθη Ευαγγελία)

(1 λήψη ανά 2 seconds), η αλληλοεπικάλυψη που θα υπήρχε στις φωτογραφίες (60% εμπρόσθια και 60% οπίσθια αλληλοεπικάλυψη ώστε να επιτυγχάνονται όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες πληροφοριών) καθώς και ο τρόπος κάλυψης της περιοχής (cross grid) και στη συνέχεια, φορτώθηκαν στον αυτόματο πιλότο του ΣμηΕΑ.

Η πτήση πραγματοποιήθηκε στις 13:00, ώρα κατά την οποία ο ήλιος βρισκόταν ακριβώς πάνω από τα δένδρα κι έτσι δεν υπήρχε σκιά να αλλοιώνει το αποτέλεσμα της ανάκλασης της ηλιακής ακτινοβολίας. Την πτήση πραγματοποίησε ο διπλωματούχος χειριστής ΣμηΕΑ κατηγορίας A2 Κάρελλας Κωνσταντίνος, μεταπτυχιακός φοιτητής του εργαστηρίου Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας, σύμφωνα με ό, τι ορίζεται από την ισχύουσα νομοθεσία.

Οι φωτογραφίες που λήφθηκαν με την πολυφασματική κάμερα εξήχθησαν και επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα φωτογραμμετρίας Metashape της εταιρείας Agisoft και το γεωπληροφοριακό πρόγραμμα QGIS.



Εικόνα 46 : Η αποστολή που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα Mission Planner. Οι αριθμημένες πράσινες θέσεις είναι τα λεγόμενα waypoints, δηλαδή τα σημεία συγκεκριμένης γεωγραφικής αναφοράς τα οποία ορίζουν την περιοχή πλοήγησης του ΣμηΕΑ (Φωτογραφία του προγράμματος Mission Planner από Αραποστάθη Ευαγγελία)

Παράλληλα, την ημέρα της πτήσης έγινε επιτόπια παρατήρηση στον οπωρώνα και καταγραφή της θέσης των καταπονημένων δένδρων με τοπογραφικό GPS χειρός (μοντέλο 60CSx, εταιρεία Garmin). Τα δένδρα που καταγράφηκαν είχαν συμπτωματολογική εικόνα προσβολής από καπνώδη και παρατηρήθηκαν ενήλικα καπνώδη πάνω στα δένδρα (Εικόνα 47). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δειγματοληπτικά εκριζώσεις και διαπιστώθηκε η

προσβολή από το συγκεκριμένο έντομο. Γι' αυτόν τον λόγο, δόθηκε έμφαση στα πυρηνόκαρπα και μηλοειδή δέντρα του δενδροκομείου που αποτελούν και τους κύριους ξενιστές του εντόμου.

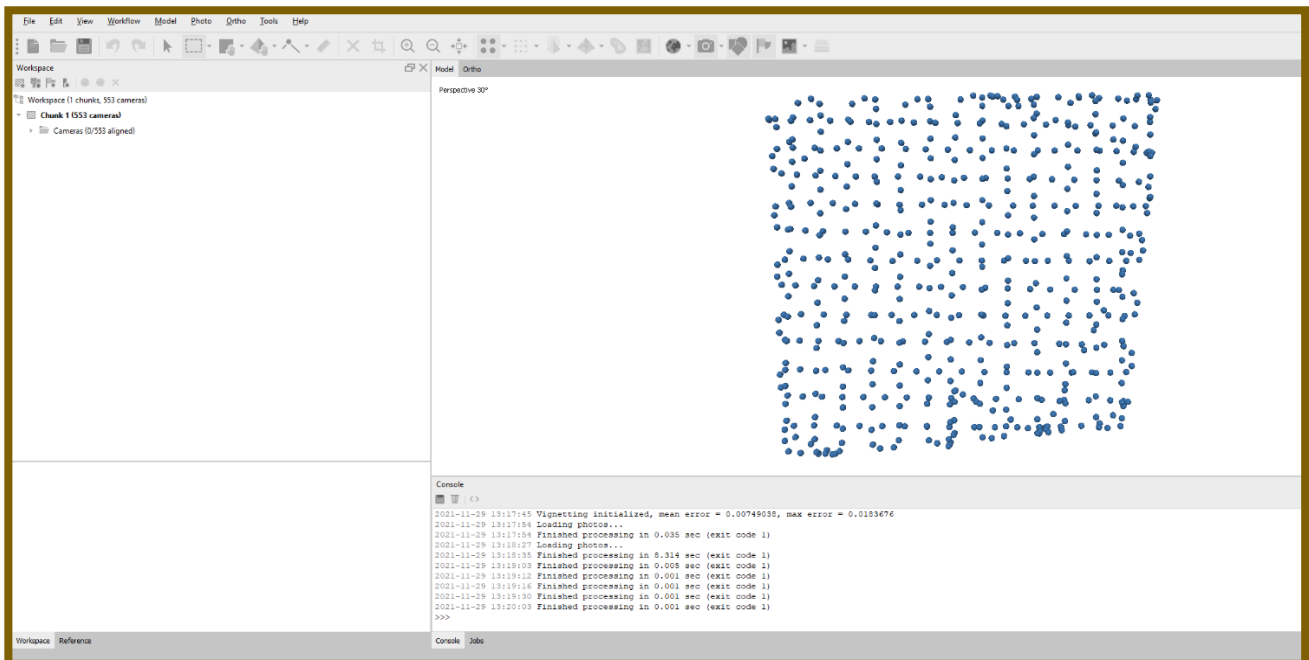


Εικόνα 47 : Ενήλικο άτομο καπνώδη πάνω σε κορμό πυρηνόκαρπου δένδρου (Φωτογραφία από Ράϊδου Ελένη)

3.2 Προγράμματα φωτογραμμετρίας και GIS

3.2.1 Πρόγραμμα Metashape

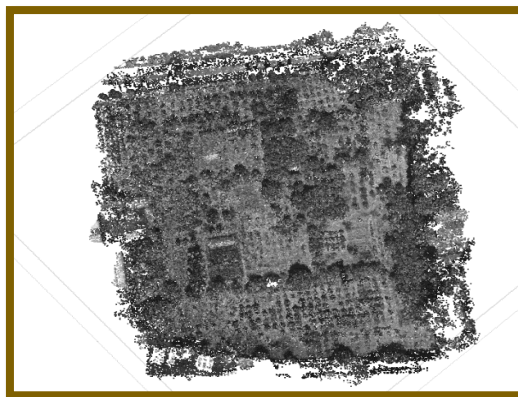
Οι φωτογραφίες εξήχθησαν από την πολυφασματική κάμερα και μεταφέρθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή όπου και μεταφορτώθηκαν στο πρόγραμμα φωτογραμμετρίας Metashape. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας τέτοιων δεδομένων και δημιουργίας χαρτών που δίνουν πληροφορίες σχετικά με την ηλιακή ακτινοβολία, την τοπογραφία του εδάφους, τα υδάτινα στοιχεία που υπάρχουν (ποτάμια, λίμνες, λεκάνες απορροής κλπ), τα φυτά στην επιφάνεια του εδάφους και για άλλα.



Εικόνα 48 : Το περιβάλλον του προγράμματος Metashape. Κάθε μπλε τελεία αποτελεί μία λήψη. Το πρόγραμμα τοποθετεί τις φωτογραφίες, που έχουν μεταφορτωθεί, στον χώρο με βάση τη γεωαναφορά τους (Φωτογραφία από Αραποστάθη Ευαγγελία)

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το περιβάλλον του προγράμματος Metashape έχοντας μεταφορτώσει τις φωτογραφίες από τον πολυφασματικό αισθητήρα RedEdge MX (Εικόνα

48). Ο συγκεκριμένος αισθητήρας διαθέτει ενσωματωμένο GPS επομένως κάθε φωτογραφία που λαμβάνει διαθέτει γεωαναφορά. Έτσι, το πρόγραμμα τοποθετεί τις φωτογραφίες αυτόματα με βάση τις συντεταγμένες της κάθε φωτογραφίας. Στη συνέχεια, θα πρέπει να γίνει ευθυγράμμιση αυτών των φωτογραφιών (alignment), μια διαδικασία κατά την οποία το πρόγραμμα βρίσκει κοινά σημεία μεταξύ των φωτογραφιών αντιστοιχίζοντάς τα και παράλληλα βρίσκει την σωστή θέση της κάθε φωτογραφίας επακριβώς. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η δημιουργία ενός αραιού νέφους σημείων (sparse point cloud) (Εικόνα 49). Στο επόμενο στάδιο της επεξεργασίας των δεδομένων, το πρόγραμμα χτίζει το πυκνό νέφος σημείων (dense point cloud) βασισμένο στις συντεταγμένες των φωτογραφιών (X,Y,Z) και στο περιεχόμενο των ίδιων των φωτογραφιών (Εικόνα 50).



Εικόνα 49 : Το αραιό νέφος σημείων (sparse point cloud) το οποίο δημιουργείται μετά από την ευθυγράμμιση (alignment) των φωτογραφιών (Φωτογραφία του προγράμματος Metashape από Αραποστάθη Ευαγγελία)



Εικόνα 50 : Το πυκνό νέφος σημείων (dense point cloud) σύμφωνα με το οποίο κατασκευάζεται έπειτα το 3D μοντέλο (Φωτογραφία του προγράμματος Metashape από Αραποστάθη Ευαγγελία)

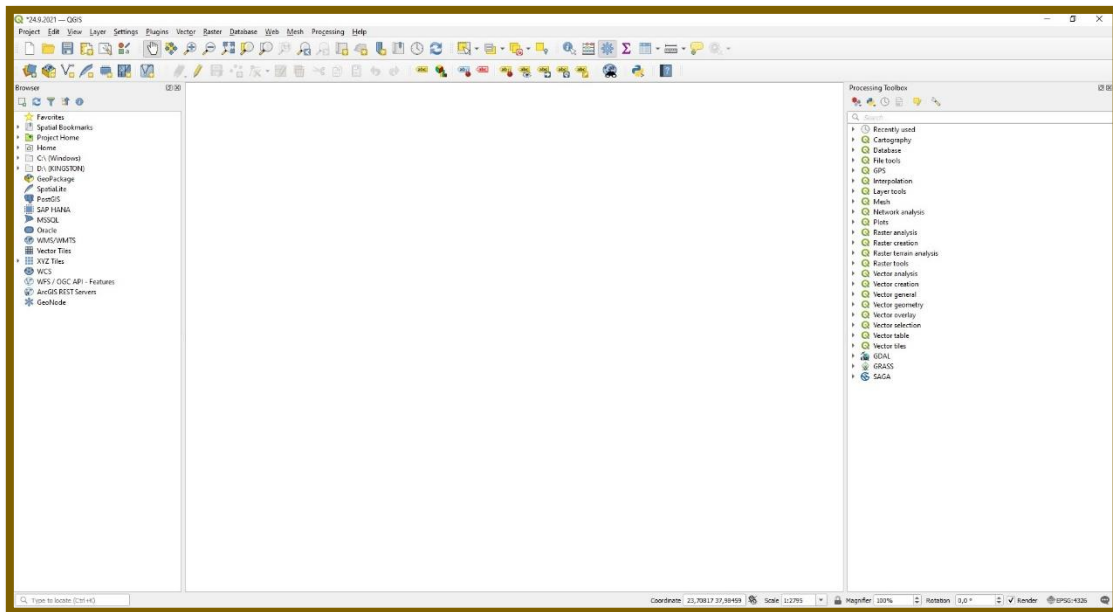
Με τη δημιουργία του πυκνού νέφους σημείων (dense point cloud), κατασκευάστηκαν στη συνέχεια τα 3D μοντέλα DTM (digital terrain model) και DSM (digital surface model). Το DTM αντιπροσωπεύει την επιφάνεια του γυμνού εδάφους χωρίς άλλα αντικείμενα, όπως φυτά, κτίρια, δρόμους, αφού δημιουργείται συνδέοντας μόνο τα σημεία του πυκνού νέφους που αντιπροσωπεύουν έδαφος κι έτσι, παράγεται ένα μοντέλο τριών διαστάσεων το οποίο αποτελεί ψηφιακή αναπαράσταση μεταβλητών σχετιζόμενων με τοπογραφικά γνωρίσματα της προς εξέταση περιοχής (κλίση, προσανατολισμός, οριζόντια και κάθετη καμπυλότητα της επιφάνειας του εδάφους και άλλα). Αντιθέτως, το DSM απεικονίζει το ύψος των ανακλαστικών επιφανειών, όπως τα κτίρια, η βλάστηση, οι δρόμοι, αφού το πρόγραμμα συνδέει

όλα τα σημεία του πυκνού νέφους για τη δημιουργία του συγκεκριμένου μοντέλου επομένως αποδίδει τόσο τα φυσικά όσο και τα τεχνητά χαρακτηριστικά μιας περιοχής. Τελευταίο στάδιο της επεξεργασίας των φωτογραφιών στο πρόγραμμα Metashape είναι η δημιουργία του ορθομωσαϊκού χάρτη. Αυτός ο χάρτης αποτελείται από πολλές ορθοφωτογραφίες και είναι μια ακριβής και λεπτομερής φωτογραφική αναπαράσταση μιας περιοχής που δίνει πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία της ή τα κτίρια, τους δρόμους και οποιαδήποτε άλλη ανθρώπινη κατασκευή περιλαμβάνει. Για την δημιουργία του ορθομωσαϊκού, το πρόγραμμα στηρίζεται στον χάρτη του ανάγλυφου του εδάφους (DTM) ή της επιφάνειας (DSM) που έχει παραχθεί κατά το προηγούμενο στάδιο και περιλαμβάνει τις ζώνες φωτός του ορατού φάσματος (Red – Green – Blue, RGB χάρτης). Οι χάρτες του ανάγλυφου του εδάφους (DTM), της επιφάνειας του οπωρώνα (DSM) και το ορθομωσαϊκό του οπωρώνα εξήχθησαν από το

πρόγραμμα σε αρχείο της μορφής .tiff για ανάλυση στο πρόγραμμα γεωπληροφοριακού συστήματος QGIS.

3.2.2 Πρόγραμμα QGIS

Τα αρχεία των χαρτών που εξήχθησαν από το πρόγραμμα Metashape μεταφορτώθηκαν στο πρόγραμμα QGIS προκειμένου να πραγματοποιηθεί επιπλέον ανάλυση (Εικόνα 51).



Εικόνα 51 : Το περιβάλλον του προγράμματος QGIS (Φωτογραφία από Αραποστάθη Ευαγγελία)

Από αυτό το πρόγραμμα εξήχθησαν οι τελικοί χάρτες του ανάγλυφου του εδάφους και της επιφάνειας του οπωρώνα (DTM και DSM αντίστοιχα).

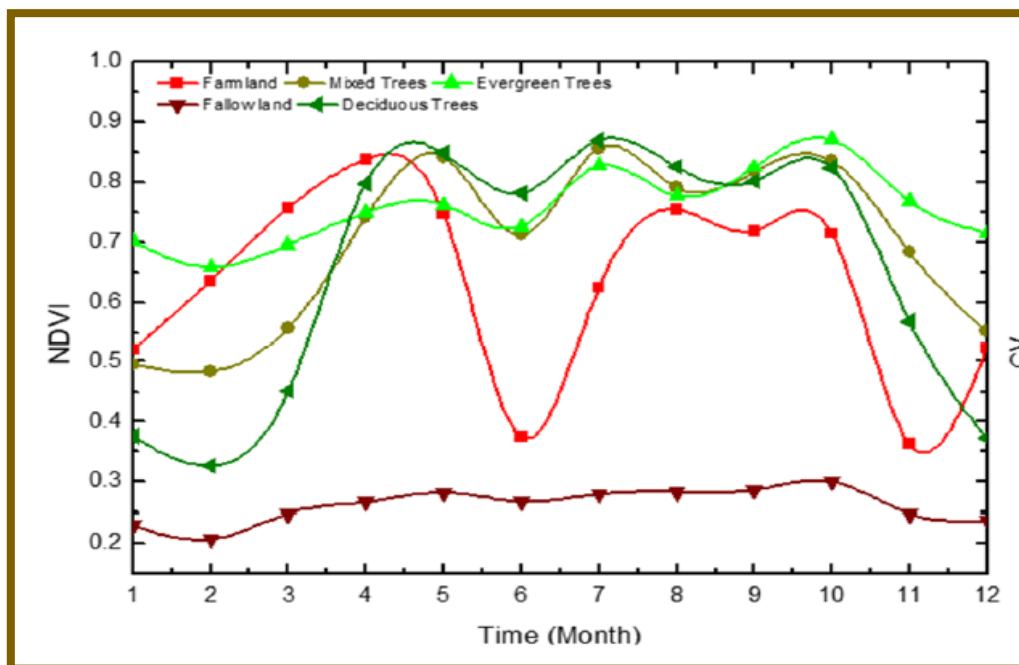
Με βάση το ορθομωσαϊκό που εισήχθη στο πρόγραμμα QGIS υπολογίστηκε ο δείκτης Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) σύμφωνα με την παρακάτω μαθηματική σχέση :

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

όπου το NIR αντιπροσωπεύει την ανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας κοντά στο εγγύς υπέρυθρο (842 nm) και το Red αντιπροσωπεύει την ανάκλαση στην κόκκινη ζώνη του φωτός (668 nm). Στον ορθοφωτοχάρτη προστέθηκαν επίσης οι συντεταγμένες των πυρηνοκάρπων και των μηλοειδών δένδρων που σύμφωνα με την επιτόπια παρατήρηση η οποία πραγματοποιήθηκε στον οπωρώνα παρουσίαζαν συμπτωματολογική εικόνα προσβολής από καπνώδη αλλά και αυτών που θεωρήθηκαν υγιή. Εν συνεχεία, υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος QGIS οι ακριβείς τιμές του δείκτη NDVI για κάθε δέντρο.

Ακολούθησε στατιστική ανάλυση με το τεστ McNemar για κατηγοριοποιημένα δεδομένα ώστε να διαπιστωθούν αν υπήρχαν τυχόν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ της εκτιμώμενης (μέσω remote sensing) και παρατηρούμενης (μέσω επιτόπιας παρατήρησης) διάγνωσης των δέντρων σε επίπεδο σημαντικότητας 5% ($\alpha=0,05$). Επειδή βιβλιογραφικά υπάρχει έλλειμα πληροφορίας για συγκεκριμένη τιμή του δείκτη NDVI πάνω από την οποία ένα φυτό θα πρέπει να θεωρείται υγιές, η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπ' όψιν ως οριακή τιμή διάφορες τιμές του δείκτη (0,60, 0,65, 0,70, 0,75 και

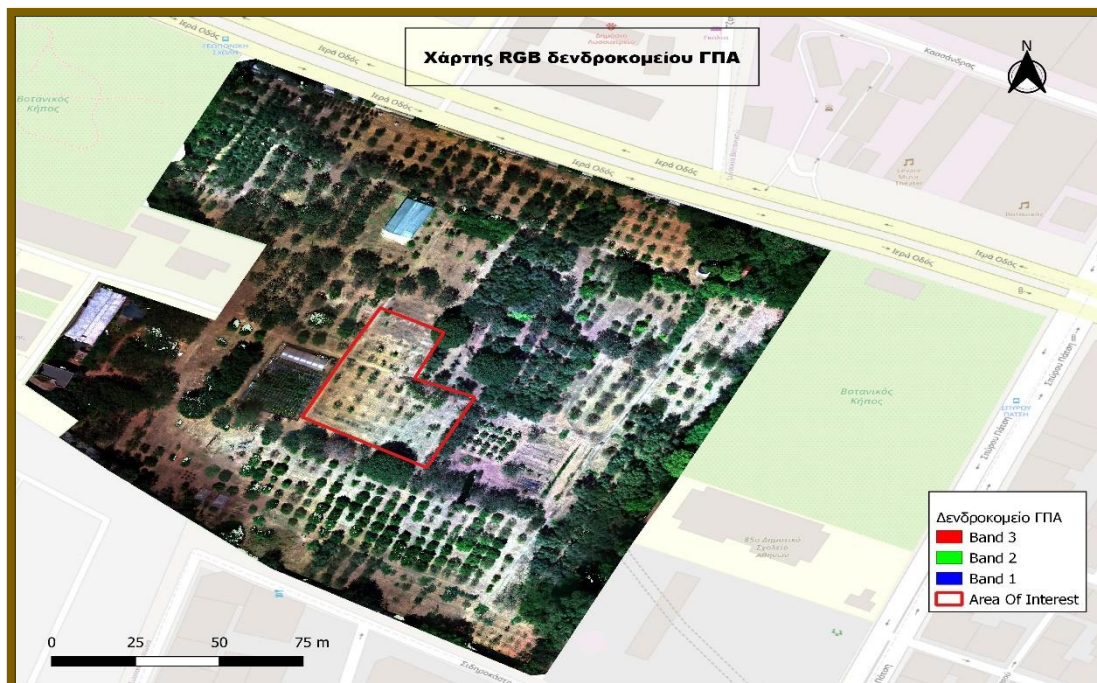
0,80). Οι τιμές αυτές πάρθηκαν σύμφωνα με την έρευνα των *Yang et al. (2019)*, όπου αναφέρεται ότι η μέση τιμή του δείκτη NDVI ενός υγιούς φυλλοβόλου δένδρου τον Σεπτέμβριο κυμαίνεται στο 0,80 (Διάγραμμα 6). Η στατιστική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα JMP 16.



Διάγραμμα 6 : Διάγραμμα που δείχνει πώς κυμαίνεται ο δείκτης NDVI στη διάρκεια της χρονιάς σε αειθαλή, φυλλοβόλα δένδρα, σε δενδρώνα με φυλλοβόλα και αειθαλή δένδρα, σε εκτάσεις που βρίσκονται σε αγρανάπαυση και σε εκτάσεις αγροτικής γης. Η σκούρα πράσινη γραμμή είναι οι τιμές του δείκτη για τα φυλλοβόλα δένδρα, πάνω στις οποίες βασίστηκαν οι αναλύσεις της τρέχουσας μελέτης (Yang et al., 2019)

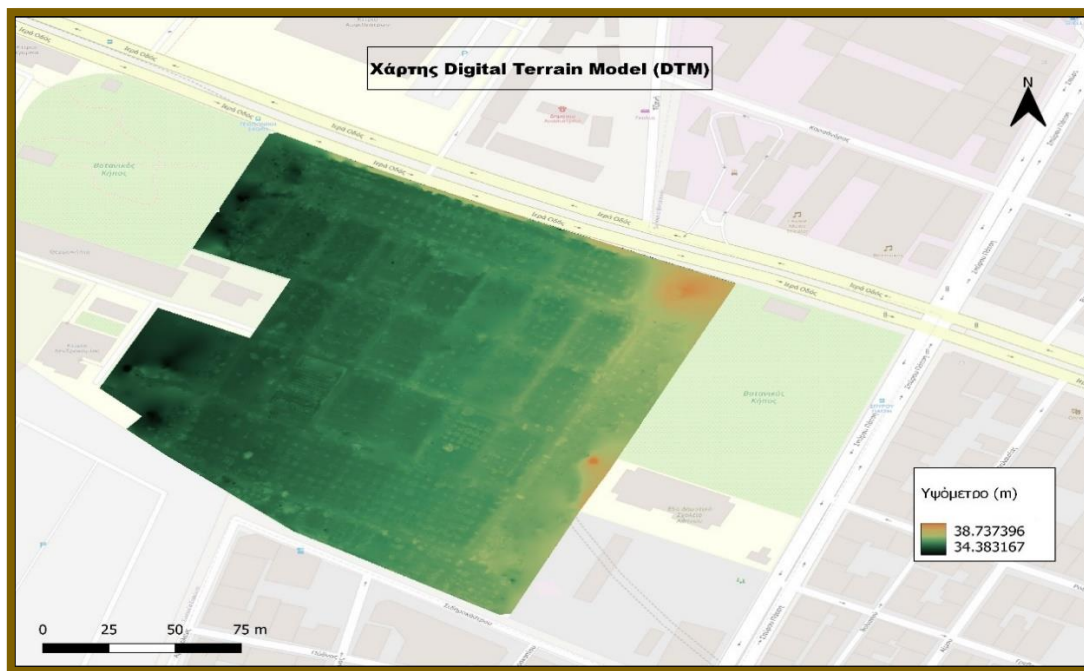
Αποτελέσματα

Ο ορθοφωτοχάρτης του δενδροκομείου του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα Metashape φαίνεται παρακάτω (Χάρτης 1).

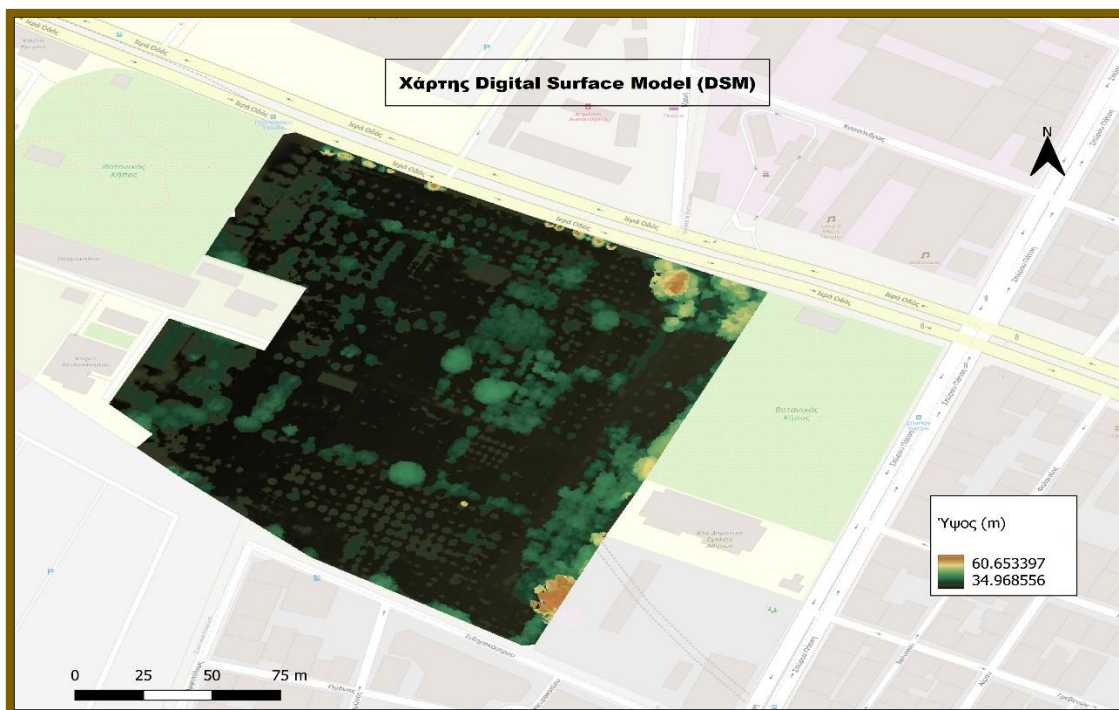


Χάρτης 1 : Ο ορθοφωτοχάρτης RGB που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα Metashape και οπτικοποιήθηκε στο πρόγραμμα QGIS. Στο κόκκινο πλαίσιο έχει σημειωθεί η περιοχή ενδιαφέροντος του πειράματος η οποία περιλαμβάνει τα πυρηνόκαρπα και μηλοειδή δένδρα του δενδροκομείου του ΓΠΑ.

Το ανάγλυφο του εδάφους του δενδροκομείου (DEM) δεν παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις από σημείο σε σημείο, αν και φαίνεται να υπάρχει μια ελαφρώς ανοδική κλίση από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά (Χάρτης 2). Επίσης, στον Χάρτη 3, φαίνεται ο χάρτης της επιφάνειας του οπωρώνα (DSM) ο οποίος επίσης παράχθηκε από το πρόγραμμα Metashape και οπτικοποιήθηκε στο πρόγραμμα QGIS, όπως δηλαδή και ο χάρτης DEM (Χάρτης 3).



Χάρτης 2 : Χάρτης της κλίσης του εδάφους (Digital Terrain Model, DTM) του δεικτοκομείου του ΓΠΑ, ο οποίος κατασκευάστηκε στο πρόγραμμα Metashape και οπτικοποιήθηκε στο πρόγραμμα QGIS. Η υψομετρική διαφορά μεταξύ των χαμηλότερων και των υψηλότερων σημείων του δεικτοκομείου είναι ανεπαίσθητη.



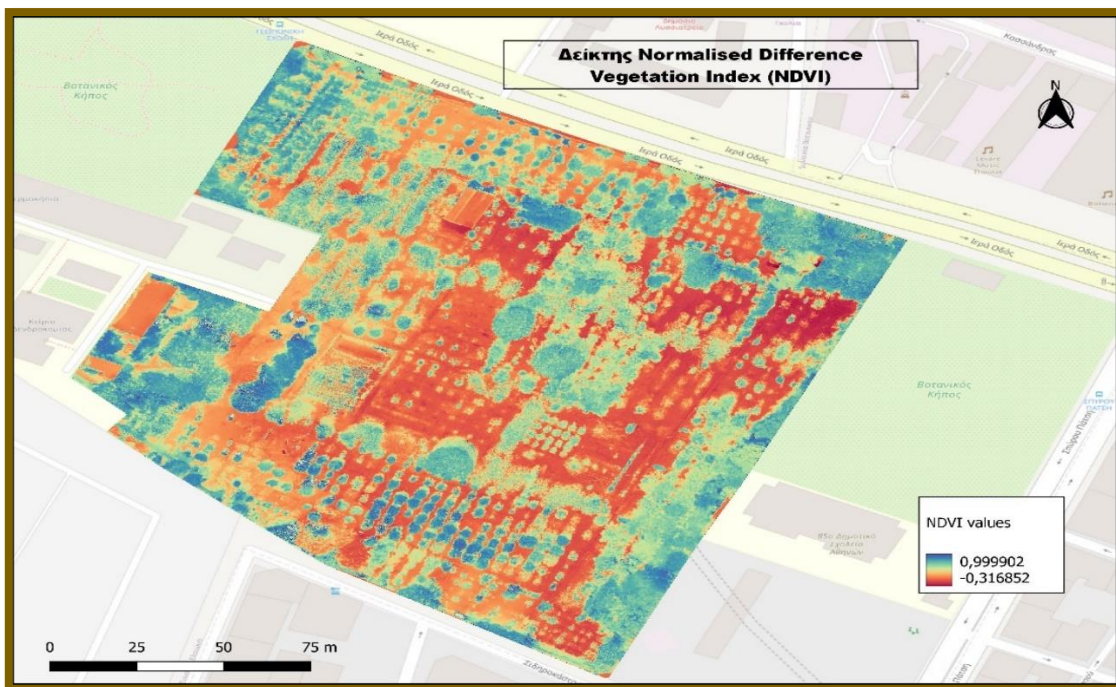
Χάρτης 3 : Χάρτης της επιφάνειας του οπρωώνα (Digital Surface Model, DSM) του δεικτοκομείου του ΓΠΑ ο οποίος κατασκευάστηκε στο πρόγραμμα Metashape και οπτικοποιήθηκε στο πρόγραμμα QGIS.

Στον **Χάρτη 4** φαίνονται τα σημεία των ασθενών και υγιών δένδρων που πάρθηκαν με το GPS χειρός κατά την επιτόπια παρατήρηση στον οπρωώνα (**Χάρτης 4**).



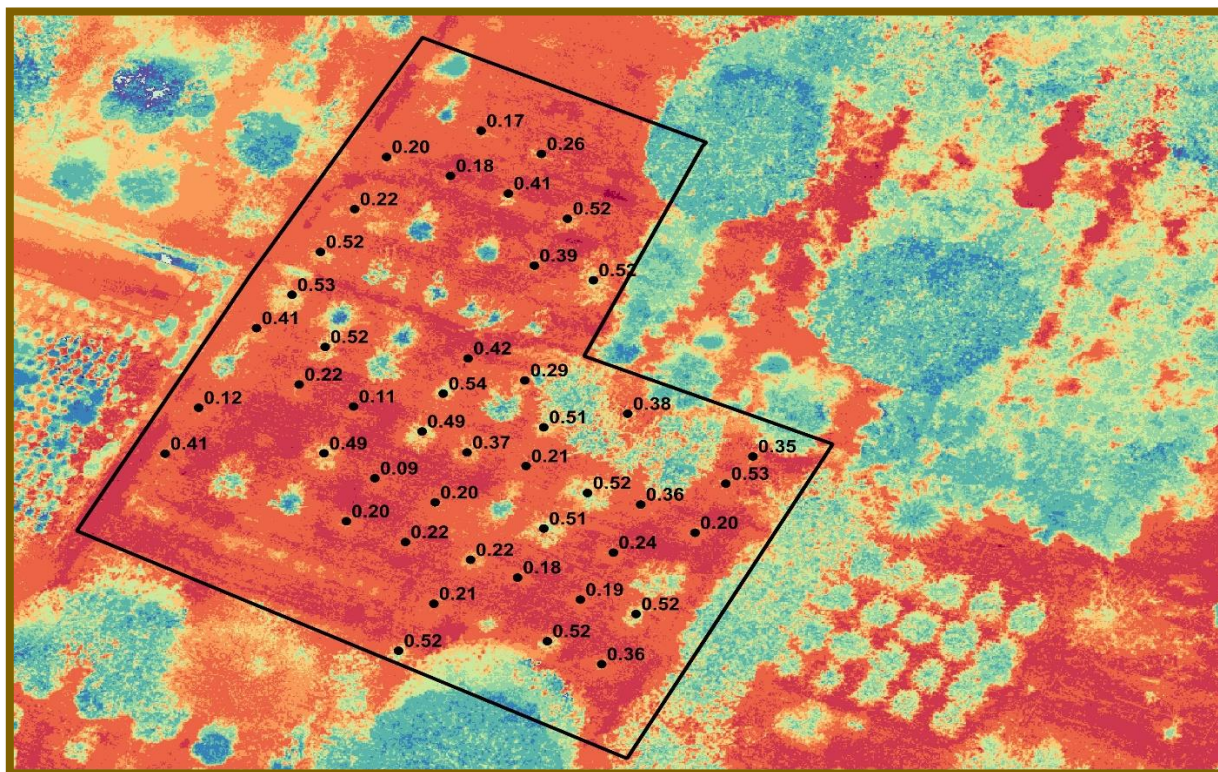
Χάρτης 4 : Οι κόκκινες κουκκίδες αντιστοιχούν στα δένδρα (πυρηνόκαρπα και μηλοειδή) τα οποία είχαν συμπτωματολογική εικόνα προσβολής από καπνώδη ενώ οι λευκές αντιστοιχούν στα υγιή δένδρα.

Μετά την εφαρμογή της μαθηματικής σχέσης για τον υπολογισμό του δείκτη βλάστησης NDVI, εξήχθη ο παρακάτω χάρτης από το πρόγραμμα QGIS, με τον δείκτη να παίρνει τιμές από -0,316 έως και 0,999. (Χάρτης 5).

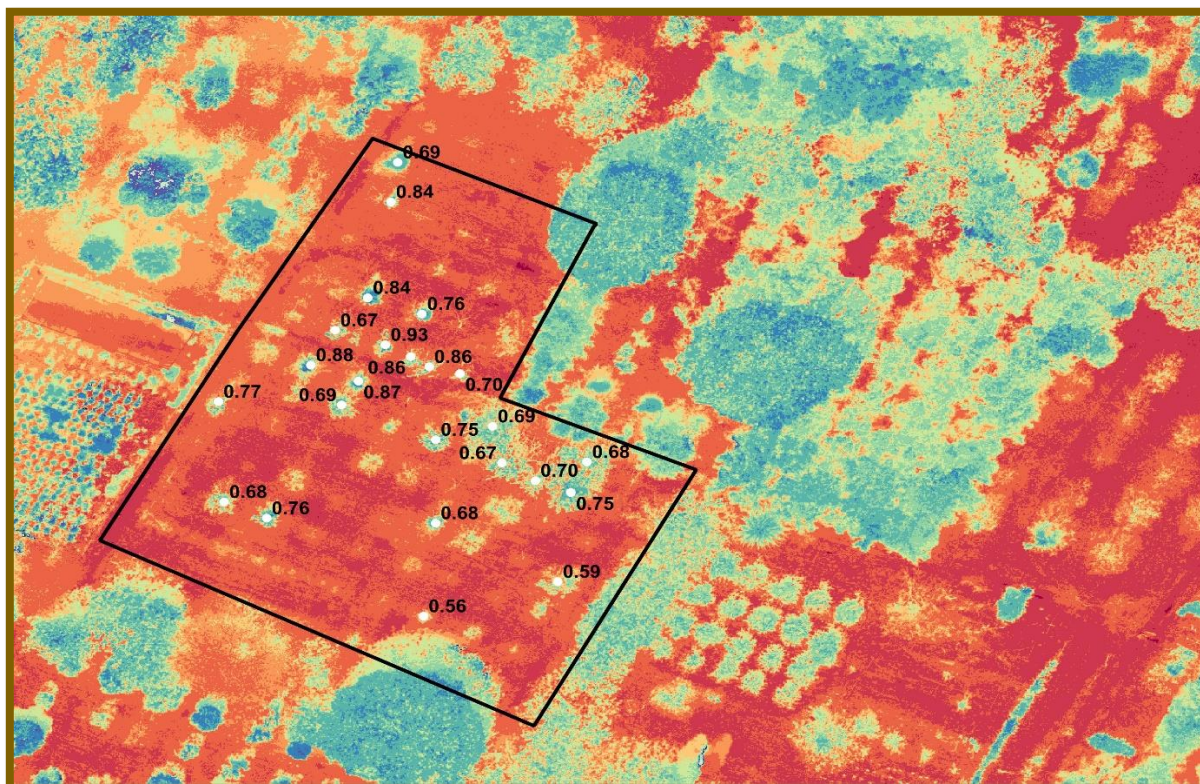


Χάρτης 5 : Ο χάρτης του δενδροκομείου του ΓΠΑ έχοντας εφαρμόσει τον δείκτη Normalized Difference Vegetation Index (NDVI).

Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές του δείκτη για τα δένδρα που κρίθηκαν, μετά την οπτική παρατήρηση στο δενδροκομείο, προσβεβλημένα από καπνώδη εμφανίζονται στον Χάρτη 6 ενώ για αυτά που κρίθηκαν υγιή, εμφανίζονται στον Χάρτη 7 (Χάρτης 6, Χάρτης 7).



Χάρτης 6 : Οι τιμές του δείκτη NDVI για τα δέντρα που καταγράφηκαν ως προσβεβλημένα κατά την επιτόπια παρατήρηση στο δενδροκομείο.



Χάρτης 7 : Οι τιμές του δείκτη NDVI για τα δέντρα που καταγράφηκαν ως υγιή κατά την επιτόπια παρατήρηση στο δενδροκομείο.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης του τεστ McNemar για διάφορες οριακές τιμές του δείκτη NDVI, κάτω από τις οποίες το δένδρο θεωρείται μη υγιές, και επίπεδο σημαντικότητας 5% ($\alpha=0,05$) ήταν τα παρακάτω:

❖ οριακή τιμή NDVI = 0,60 (>0,60 υγιές):

$\chi^2=7,45$ $df=1$ $P<0,006$ – υπήρξαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ της διάγνωσης μέσω επιτόπιας παρατήρησης των δένδρων και τηλεπισκόπησης

❖ οριακή τιμή NDVI = 0,65 (>0,65 υγιές):

$\chi^2=7,45$ $df=1$ $P<0,006$ – υπήρξαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ της διάγνωσης μέσω επιτόπιας παρατήρησης των δένδρων και τηλεπισκόπησης

❖ οριακή τιμή NDVI = 0,70 (>0,70 υγιές):

$\chi^2=12,16$ $df=1$ $P<0,0005$ – υπήρξαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ της διάγνωσης μέσω επιτόπιας παρατήρησης των δένδρων και τηλεπισκόπησης

❖ οριακή τιμή NDVI = 0,75 (>0,75 υγιές):

$\chi^2=13,44$ $df=1$ $P<0,0002$ – υπήρξαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ της διάγνωσης μέσω επιτόπιας παρατήρησης των δένδρων και τηλεπισκόπησης

❖ οριακή τιμή NDVI = 0,80 (>0,80 υγιές):

$\chi^2=16,79$ $df=1$ $P<0,0001$ – υπήρξαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ της διάγνωσης μέσω επιτόπιας παρατήρησης των δένδρων και τηλεπισκόπησης

Συζήτηση

5.1 Υπάρχουσα πρακτική ανίχνευσης καπνώδη και συμβολή της τηλεπισκόπησης

Η ανίχνευση της προσβολής από ξυλοφάγα έντομα είναι ιδιαίτερα επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία για τον Γεωπόνο διότι απαιτείται λεπτομερής παρατήρηση του δένδρου προκειμένου η προσβολή να γίνει αντιληπτή από τον ειδικό καθώς τα συμπτώματα μιας τέτοιας προσβολής μπορεί να παραπέμπουν σε διάφορους εχθρούς (κόσσος, ζευζέρα) και ασθένειες του ριζικού συστήματος και του λαιμού του δένδρου (*Phytophthora* spp.). Για τη διάγνωση προσβολής από καπνώδη σε δένδρα σημαντικό ρόλο παίζει η παρουσία των ενήλικων ατόμων πάνω στα δένδρα, η οποία παρατηρείται κυρίως την άνοιξη ή το φθινόπωρο, ή οι πτήσεις των ενήλικων. Επίσης, συχνά μπορεί να γίνει αντιληπτή και η οπή της προνυμφικής στοάς.

Αντίθετα, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα είναι εφικτό μέσω της τηλεπισκόπησης να παραχθούν χάρτες, ακόμα και μεγάλων εκτάσεων γης, οι οποίοι μπορούν να δώσουν πληροφορίες στον Γεωπόνο για την τοπογραφία του εδάφους αλλά και για τον σχεδιασμό στρατηγικών αντιμετώπισης στο πεδίο. Επιπλέον, αυτοί οι χάρτες αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό δεικτών βλάστησης οι οποίοι με τη σειρά τους παρέχουν διάφορες πληροφορίες σχετικά με την υγεία των φυτών, τη φωτοσυνθετική τους ικανότητα, την ευρωστία τους, τη συγκέντρωση της χλωροφύλλης, τα νερό που περιέχουν στους ιστούς τους και άλλα. Με αυτόν τον τρόπο, ο Γεωπόνος θα χρειαστεί να παρατηρήσει λεπτομερώς στο πεδίο μόνο τα φυτά τα οποία έχει υποδείξει η τηλεπισκόπηση ως πιθανώς καταπονημένα.

Τις περισσότερες φορές, οι προσβολές από ξυλοφάγα έντομα γίνονται αντιληπτές αφότου το έντομο έχει προκαλέσει σοβαρές ζημιές στον αγωγό ιστό του δένδρου ή ακόμα και νεκρώσεις. Ιδιαίτερα κατά την έναρξη της προσβολής, οι προνύμφες έχουν πολύ μικρό μέγεθος και είναι αδύνατον να γίνουν αντιληπτές καθώς εισέρχονται εντός του δένδρου. Όμως, με την είσοδό τους εντός του φυτού ξεκινά μια σειρά αντιδράσεων μεταξύ του εχθρού και του ξενιστή που στόχο έχει την επικράτηση ενός από τους δύο. Αυτές οι αντιδράσεις προκαλούν διαφορές στην ανακλαστική εικόνα του φυτού, κάτι το οποίο μπορεί να ανιχνευθεί μέσω ειδικών αισθητήρων. Η τηλεπισκόπηση χρησιμοποιεί αυτούς τους αισθητήρες, όπως πολυφασματικές και υπερφασματικές κάμερες, προκειμένου να αιχμαλωτίσει αυτές τις διαφορές στην απορροφούμενη και εκπεμπόμενη ακτινοβολία και να αξιοποιηθούν μετέπειτα στον υπολογισμό δεικτών φυτούγείας. Έτσι, χάρη στην τηλεπισκόπηση είναι εφικτό να εντοπιστούν φυτά τα οποία βρίσκονται σε πρωταρχικά στάδια καταπόνησης χωρίς ακόμα να έχουν εκδηλωθεί ορατά, στον ανθρώπινο οφθαλμό, συμπτώματα. Χάρη σε αυτή την πρόωρη διάγνωση, μπορεί να επιτευχθεί αντίστοιχα πρόωρη θεραπευτική αγωγή η οποία έχει ως αποτέλεσμα μειωμένο κόστος για τον αγρότη αλλά και μειωμένες εισροές φυτοπροστατευτικών προϊόντων για το περιβάλλον.

5.2 Σύγκριση με την υπάρχουσα βιβλιογραφία

Το παρόν πείραμα στόχευε στην ανίχνευση καταπονημένων φυτών σε οπωρώνα με τη βοήθεια της τηλεπισκόπησης. Στο παρελθόν, έχουν πραγματοποιηθεί έρευνες που συσχέτιζαν τις τιμές του δείκτη NDVI με προσβολές από έντομα ή ποσοστό ζημιάς ως αποτέλεσμα της προσβολής. Μία τέτοια έρευνα είναι αυτή των [Lehman et al. \(2015\)](#) η οποία πραγματοποιήθηκε σε δάσος βελανιδιάς στη Γερμανία με σκοπό την ανίχνευση προσβολής από το ξυλοφάγο κολεόπτερο *Agilus biguttatus* (Coleoptera: Buprestidae) και την

κατηγοριοποίηση κλάδων των δένδρων σε υγιείς, προσβεβλημένους ή νεκρούς. Οι πολύ υψηλής ανάλυσης φωτογραφίες που πάρθηκαν με ΣμηΕΑ και ο μετέπειτα υπολογισμός μιας παραλλαγής του δείκτη NDVI ($NDVI_{mod}$, ο οποίος στη θέση της ανάκλασης της κόκκινης ζώνης του φωτός χρησιμοποιεί την ανάκλαση της μπλε ζώνης), επέτρεψε στους αναλυτές να διακρίνουν πιθανούς προσβεβλημένους ή και νεκρούς κλάδους των δένδρων με τις τελικές κατηγοριοποιήσεις σε κλάσεις που είχαν γίνει από Γεωπόνους στο πεδίο να συμφωνούν με την κατάταξη μέσω του δείκτη NDVI σε γενικές γραμμές, με μικρές διαφοροποιήσεις οι οποίες μπορούν να αποφευχθούν με διόρθωση ορισμένων παραμέτρων κατά την πτήση όπως είναι οι καιρικές συνθήκες κατά τις οποίες εκτελείται η πτήση (Lehman *et al.*, 2015). Παρόμοια αποτελέσματα είχαν και οι Vanegas *et al.* (2018) οι οποίοι διερεύνησαν το κατά πόσο είναι εφικτό να γίνεται παρακολούθηση μιας καλλιέργειας για την ανίχνευση εχθρών. Σε αυτή την περίπτωση, όμως, χρησιμοποιήθηκαν τόσο δεδομένα από πολυφασματικούς αισθητήρες όσο και δεδομένα από υπερφασματικούς αισθητήρες, τα οποία παρέχουν πιο λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση της φυσιολογίας ενός φυτού. Τα αποτελέσματα συμφωνούσαν με την εκτίμηση του ειδικού σε γενικές γραμμές αλλά οι υπερφασματικοί αισθητήρες έδιναν πολύ καλύτερα αποτελέσματα από αυτά που έδωσαν οι πολυφασματικοί αισθητήρες (Vanegas *et al.*, 2018). Οι υπερφασματικοί αισθητήρες προτιμώνται για την ανίχνευση πρόωρης προσβολής διότι ανχνεύουν περισσότερες φασματικές ζώνες του φωτός αλλά είναι ακριβοί και ταυτόχρονα παρέχουν μεγάλο όγκο δεδομένα τα οποία είναι δύσκολο να επεξεργαστούν γι' αυτό και ήταν αδύνατο να χρησιμοποιηθούν τέτοιου είδους αισθητήρες στην παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη.

Σύμφωνα με τους Severtson *et al.* (2016), η διακριτική ικανότητα είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που μπορεί να καθορίσει τα αποτελέσματα της τηλεπισκόπησης. Σε πείραμα που διεξήχθη σε καλλιέργεια ελαιοκράμβης αποδείχθηκε ότι η έλλειψη καλίου στα φυτά είχε ως αποτέλεσμα την εμφάνιση χαμηλών τιμών του δείκτη NDVI, την αύξηση του αζώτου στα νεαρότερα ώριμα φύλλα και τέλος, τον αυξημένο αριθμό αφίδων του είδους *Myzus persicae* (Hemiptera: Aphididae). Φαίνεται πως η διακριτική ικανότητα κατείχε σημαντικό ρόλο στην ανίχνευση αυτής της καταπόνησης καθώς τα δεδομένα που λήφθηκαν από ύψος πτήσης 120 μέτρων (διακριτική ικανότητα 65 mm, δηλαδή η μια πλευρά του pixel αντιστοιχούσε σε 65 mm εδάφους) είχαν μεγαλύτερη ακρίβεια κατηγοριοποίησης (classification accuracy) των φυτών από αυτά που λήφθηκαν από ύψος πτήσης 15 μέτρων (διακριτική ικανότητα 8,1 mm). Μάλιστα, η ακρίβεια κατηγοριοποίησης στην περίπτωση δεδομένων με διακριτική ικανότητα 65 mm κυμαινόταν μεταξύ 72 και 100%, δηλαδή σε κάποιες περιπτώσεις βρισκόταν ακόμα και σε απόλυτη συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρατήρησης στο πεδίο (Severtson *et al.*, 2016).

5.3 Το βασικό μειονέκτημα της τηλεπισκόπησης και αντιμετώπιση του προβλήματος

Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου της τηλεπισκόπησης για την επιτήρηση ενός αγρού αποτελεί το γεγονός ότι δεν μπορεί να γίνει διάγνωση του παράγοντα καταπόνησης παρά μόνο να υποδειχθούν οι θέσεις του αγρού στις οποίες υπάρχουν φυτά με εξασθενημένη υγεία. Πολλές φορές, όμως, αυτό μπορεί να συμβεί και με την οπτική παρατήρηση καθώς υπάρχουν εχθροί και παθογόνα φυτών τα οποία μπορεί να δημιουργήσουν μια παρεμφερή συμπτωματολογία στο φυτό.

Παρ' όλα αυτά, το παραπάνω πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με τη χρήση φερομονικών παγίδων, είτε συμβατικών είτε απομακρυσμένης παρακολούθησης, ώστε να γίνει έπειτα συσχέτιση μεταξύ του πληθυσμού στις παγίδες και των τιμών του δείκτη NDVI.

Επίσης, σε παραγωγικούς οπωρώνες μπορεί να γίνει συνδυαστική χρήση των χαρτών DEM (DTM και DSM) οι οποίοι μπορούν να παράσχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με το μικροκλίμα της περιοχής.

Η παρατήρηση στο πεδίο είχε ως αποτέλεσμα την ανίχνευση προσβολής από το έντομο *Carpodis tenebrionis* (Coleoptera: Buprestidae) σε ορισμένα πυρηνόκαρπα και μηλοειδή δένδρα. Σχετικά με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μέσω επιτόπιας παρατήρησης και τηλεπισκόπησης, αυτά διέφεραν στατιστικώς σημαντικά σε όλες τις περιπτώσεις που ελέγχθηκαν. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί κάτι τέτοιο, όμως, θα πρέπει να γίνει παρατήρηση αυτών των δένδρων και καταγραφή της υγείας τους την άνοιξη όπου πια τα συμπτώματα μιας πιθανής προσβολής από το έντομο *Carpodis tenebrionis* θα είναι ορατά.

5.4 Συμπεράσματα

Η παρούσα μεταπτυχιακή μελέτη είχε ως στόχο την εξοικείωση με την τεχνολογία της τηλεπισκόπησης και τη χρήση της για τον εντοπισμό δένδρων στον οπωρώνα του ΓΠΑ τα οποία εμφανίζουν ή επρόκειτο να εμφανίσουν συμπτώματα καταπόνησης. Μέσω αυτής της διαδικασίας, η παρακολούθηση των φυτών ενός αγρού από τον υπεύθυνο Γεωπόνο καθίσταται λιγότερο χρονοβόρα αλλά και λιγότερο κουραστική. Όπως έχει τονιστεί παραπάνω, οι δείκτες φυτοϋγείας μπορούν να αποτελέσουν μια πρώτη εικόνα της υγείας των φυτών ενός αγρού επισημαίνοντας στον Γεωπόνο τα φυτά αυτά τα οποία θα πρέπει να ελέγξει στο πεδίο προκειμένου να γίνει η διάγνωση του παράγοντα καταπόνησης ενώ σε καμία περίπτωση, δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τον ρόλο του ειδικού στο πεδίο.

Οι χάρτες που παράχθηκαν από τα προγράμματα φωτογραμμετρίας και GIS μπορούν να προσφέρουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την τοπογραφία μιας περιοχής, το μικροκλίμα της, την προσπίπτουσα ακτινοβολία και άλλα τα οποία μπορούν να συμβάλλουν σε συνδυασμό με κλιματολογικά δεδομένα στην πρόβλεψη προσβολής από εχθρούς ή εμφάνισης του επιζήμιου σταδίου του εντόμου.

Όσον αφορά την κλίση του εδάφους, αυτή θα μπορούσε υπό άλλες συνθήκες να επηρεάζει την προσβολή μέσω της δημιουργίας μικροκλίματος. Στην προκειμένη περίπτωση, όμως, το χαμηλότερο σημείο του οπωρώνα είναι τα 34,4 μέτρα ενώ το υψηλότερο τα 38,7 μέτρα επομένως, η κλίση του εδάφους είναι ανεπαίσθητη για να επηρεάζει το μικροκλίμα της περιοχής και κατ' επέκταση την προσβολή του εντόμου.

Τα αποτελέσματα της τρέχουσας εργασίας έδειξαν ότι μέσω της τηλεπισκόπησης ανιχνεύθηκαν επιτυχώς τα καταπονημένα φυτά αλλά υπήρξαν στατιστικώς σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεθόδων. Πιο συγκεκριμένα, τα φυτά που σύμφωνα με τις οριακές τιμές του δείκτη NDVI κρίθηκαν καταπονημένα, επιβεβαιώθηκαν και από τα αποτελέσματα της επιτόπιας παρατήρησης. Στο πεδίο, λοιπόν, ανιχνεύθηκε προσβολή από καπνώδη (*Carpodis tenebrionis*), μετά από δειγματοληπτική εκρίζωση δένδρων, η οποία πιθανώς σχετίζεται με τις χαμηλές τιμές του δείκτη NDVI αλλά δεν μπορεί να κριθεί ως η μοναδική αιτία καταπόνησης αυτών των δένδρων επειδή μπορεί να συνυπάρχουν παραπάνω από ένας παράγοντες που να προκαλούν καταπόνηση στα δένδρα χωρίς να υπάρχουν απαραίτητα τα αντίστοιχα ορατά συμπτώματα. Όσο αυξανόταν η οριακή τιμή του δείκτη NDVI τόσο αυξάνονταν τα δένδρα τα οποία είχαν κριθεί ως υγιή στον αγρό αλλά η τιμή του δείκτη ήταν χαμηλότερη από την τιμή που τέθηκε ως οριακή και γι' αυτό χαρακτηρίστηκαν ως καταπονημένα μέσω της τηλεπισκόπησης. Σε αυτή την περίπτωση, θα σημαίνει ότι μέσω της τηλεπισκόπησης μπορεί να γίνει επιτυχώς ανίχνευση εντομολογικών προσβολών, όπως η προσβολή από καπνώδη, πριν την εμφάνιση των ορατών συμπτωμάτων. Η επιτόπια

παρατήρηση την άνοιξη θα είναι αυτή που θα επιβεβαιώσει ή θα απορρίψει το κατά πόσο μέσω του δείκτη NDVI έγινε έγκαιρη πρόβλεψη και ανίχνευση της μειωμένης φυτικής υγείας ενός δένδρου.

Αναφορικά με άλλες παρεμφερείς έρευνες που χρησιμοποιούσαν την τηλεπισκόπηση για την εύρεση αδύναμων, από άποψη υγείας, φυτών, σε αυτές έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα του πεδίου προκειμένου να φανεί εάν υπήρχε συσχέτιση των χαμηλών τιμών με τους παράγοντες καταπόνησης. Αντίθετα, στόχος της παρούσας έρευνας ήταν κυρίως η εύρεση δένδρων τα οποία δεν παρουσίαζαν συμπτώματα καταπόνησης στο χωράφι αλλά είχαν χαμηλό δείκτη NDVI ώστε να επιβεβαιωθεί εάν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την εύρεση πιθανών προσβολών σε πρωταρχικά στάδια.

Η τηλεπισκόπηση προσφέρει πολλές δυνατότητες για βελτιστοποίηση πολλών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο χωράφι και μέχρι σήμερα έπρεπε να γίνονταν απαραίτητα από ειδικούς στο πεδίο. Οι δυνατότητες αυτού του ταχέως αναπτυσσόμενου κλάδου είναι ανεξάντλητες και ο ολοένα αυξανόμενος πληθυσμός της γης ο οποίος δημιουργεί αυξημένες ανάγκες για παραγωγή προϊόντων καθώς και η αυξημένη ζήτηση για παραγωγή ποιοτικών προϊόντων απαιτεί την εκμετάλλευση όσο περισσότερων δυνατοτήτων μπορεί να παρέχει η τηλεπισκόπηση στον γεωργικό τομέα, κάτι το οποίο θα επιτευχθεί μόνο μέσω συνεχούς έρευνας.

Βιβλιογραφία

Επιστημονικές δημοσιεύσεις:

Bannari, A., Morin, D., Bonn, F., & Huete, A. (1995). A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews*, 13(1-2), 95-120.

Barbedo, J. G. A. (2019). A review on the use of unmanned aerial vehicles and imaging sensors for monitoring and assessing plant stresses. *Drones*, 3(2), 40.

Bari, G., Scala, A., Garzone, V., Salvia, R., Yalcin, C., Vernile, P., Aresta, Am M., Facini, O., Baraldi, R., Bufo, S. A., Vogel, H., De Lillo, E., Rapparini, F., & Falabella, P. (2019). Chemical ecology of *Capnodis tenebrionis* (L.)(Coleoptera: Buprestidae): Behavioral and biochemical strategies for intraspecific and host interactions. *Frontiers in physiology*, 10, 604.

Dash, J. P., Watt, M. S., Pearse, G. D., Heaphy, M., & Dungey, H. S. (2017). Assessing very high-resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 131, 1-14.

Ehleringer, J.R., and D.R. Sandquist. 2010. Photosynthesis: Physiological and ecological considerations, pages . In: L. Taiz and E. Zeiger (eds.), *Plant physiology*, 5th edition, Sinauer Associates, Sunderland, MA.

Iost Filho, F. H., Heldens, W. B., Kong, Z., & de Lange, E. S. (2020). Drones: innovative technology for use in precision pest management. *Journal of economic entomology*, 113(1), 1-25.

Johnson M. P. (2016). Photosynthesis. *Essays in biochemistry*, 60(3), 255–273.

Lichtenthaler, H. K. (1996). Vegetation stress: An introduction to the stress concept in plants. *Journal of plant physiology*, 148(1-2), 4-14.

Lum, C., Mackenzie, M., Shaw-Feather, C., Luker, E., & Dunbabin, M. (2016, August). Multi-spectral imaging and elevation mapping from an unmanned aerial system for precision agriculture applications. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture* (pp. 4-10).

Maes, W. H., & Steppe, K. (2019). Perspectives for remote sensing with unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Trends in plant science*, 24(2), 152-164.

Maes, W. H., Huete, A. R., & Steppe, K. (2017). Optimizing the processing of UAV-based thermal imagery. *Remote Sensing*, 9(5), 476.

Mendel, Z., Assael, F., & Ben-Yehuda, S. (2003). Host selection and root colonization of cyanogenic stonefruit species by *Capnodis* spp.(Coleoptera: Buprestidae). *Annals of the entomological Society of America*, 96(2), 127-134.

Mfarrej, M. F. B., & Sharaf, N. (2010). Life cycle of Peach Rootborer *Capnodis tenebrionis* L.(Coleoptera: Buprestidae) on stone-fruit trees.

Milošević, T., & Milošević, N. (2020). Soil fertility: Plant nutrition vis-à-vis fruit yield and quality of stone fruits. *Fruit Crops*, 583-606.

Noma, T., Colunga-Garcia, M., Brewer, M., Landis, J., & Gooch, A. (2010). Michigan State University's invasive species factsheets: Red-belted clearwing, *Synanthedon myopaeformis*. Ανακτήθηκε 25 Αυγούστου, 2021, από την ιστοσελίδα, www.canr.msu.edu/ipm

Otsu, K., Pla, M., Vayreda, J., & Brotons, L. (2018). Calibrating the severity of forest defoliation by pine processionary moth with Landsat and UAV imagery. *Sensors*, 18(10), 3278.

Potter, D., Eriksson, T., Evans, R. C., Oh, S., Smedmark, J. E. E., Morgan, D. R., Kerr, M., Robertson, K. R., Arsenault, M., Dickinson, D. A. & Campbell, C. S. (2007). Phylogeny and classification of Rosaceae. *Plant systematics and evolution*, 266(1), 5-43.

Raymond, J., & Blankenship, R. E. (2008). The origin of the oxygen-evolving complex. *Coordination chemistry reviews*, 252(3-4), 377-383.

Roman, A., & Ursu, T. (2016). Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks. *Landscape archaeology on the northern frontier of the roman empire at porolissum: an interdisciplinary research project. Cluj-Napoca: Mega Publishing House*, 141-152.

Severtson, D., Callow, N., Flower, K., Neuhaus, A., Olejnik, M., & Nansen, C. (2016). Unmanned aerial vehicle canopy reflectance data detects potassium deficiency and green peach aphid susceptibility in canola. *Precision Agriculture*, 17(6), 659-677.

Vanegas, F., Bratanov, D., Powell, K., Weiss, J., & Gonzalez, F. (2018). A novel methodology for improving plant pest surveillance in vineyards and crops using UAV-based hyperspectral and spatial data. *Sensors*, 18(1), 260.

Yang, Y., Wu, T., Wang, S., Li, J., & Muhammmad, F. (2019). The NDVI-CV method for mapping evergreen trees in complex urban areas using reconstructed landsat 8 time-series data. *Forests*, 10(2), 139.

Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision agriculture*, 13(6), 693-712.

Βιβλία:

Bell, R. L., & Leitão, J. M. (2011). Cydonia. In: *Wild crop relatives: Genomic and breeding resources* (pp. 1-16). Springer, Berlin, Heidelberg.

Blankenship, R. E. (2010). Φωτοσύνθεση: Οι φωτεινές αντιδράσεις (μτφ. Γ. Πετροπούλου). Στο: Κ. Θάνος (Επιμ.), *Φυσιολογία Φυτών* (σελ. 197-238) (1^η ελλ. Εκδ.). Αθήνα: Εκδόσεις Υτοπία.

Blattný C (2003). Pears. In: Caballero B, Trugo LC, Finglas PM (eds). *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*. Academic Press, London, pp. 4428-4433.

Skog, L. & C.L. Chu. 2003. Apples. In: *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*. Academic Press. Elsevier Science Ltd. 290-294.

Θεριός, Ι., & Δημάση – Θεριού, Κ. (2013). *Ειδική Δενδροκομία: Φυλλοβόλα Οπωροφόρα Δένδρα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γαρταγάνη.

Καραμπουρνιώτης, Γ. Α., Λιακόπουλος, Γ., & Νικολόπουλος, Δ. (2012). *Φυσιολογία καταπονήσεων των φυτών: οι λειτουργίες των φυτών κάτω από αντίξοες συνθήκες του περιβάλλοντος* (3^η εκδ.). Αθήνα: Εκδόσεις Έμβρυο.

Κατσόγιαννος, Μ. Ε., & Τζανακάκης, Β. Ι. (2003). *Έντομα καρποφόρων δένδρων και αμπέλου*. Αθήνα: Εκδόσεις ΑγροΤύπος.

Ιστοσελίδες:

United States Geological Survey. Ανακτήθηκε 4 Νοεμβρίου, 2021, από την ιστοσελίδα του USGS, <https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used>

United States Geological Survey. Ανακτήθηκε 4 Νοεμβρίου, 2021, από την ιστοσελίδα του USGS, <https://www.usgs.gov/faqs/what-geographic-information-system-gis>

Δελτίο Τύπου: Ετήσια Γεωργική Στατιστική Έρευνα, έτος 2019. Ανακτήθηκε 12 Αυγούστου, 2021, από την ιστοσελίδα της ΕΛΣΤΑΤ, <https://www.statistics.gr/documents/20181/96929c5c-54d8-ccca-22fe-1c7af02f8bf3>

Ιστοσελίδες εικόνων:

www.stutterstock.com

www.cydiapomonella.eu

www.bladmineers.nl

www.treefruit.wsu.edu

www.wiki.bugwood.org

www.naturepl.com

www.phototheque-fl.ctifl.fr

www.gd.eppo.int

www.stuff.co.nz

www.bctfpg.ca

www.invasive.org

www.observation.org

www.insecta.pro

www.irishmoths.net

www.extension.usu.edu

www.differencebetween.com

www.byjus.com

www.patch.com

www.flex-photosyn.ca

www.reasonandscience.catsboard.com

www.accessscience.com

www.commonswikimedia.org

www.pobonline.com

www.sentera.com

www.geosense.gr