



Καινοτόμες λύσεις για τη βιώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική φυτοπροστασία των οπωροκηπευτικών της Ελλάδας, στην Ευρώπη του μέλλοντος

Παραδοτέο Π.5.3.2:

Σύγκριση αποτελεσματικότητας ψεκασμού με drones και συμβατικών μηχανημάτων

Πληροφορίες για το έγγραφο

Αριθμός παραδοτέου: **Π5.3.2**

Ενότητα εργασίας: **ΕΕ5**

Επικεφαλής δικαιούχος: **ΓΠΑ**

Συγγραφείς: **Σπυρίδων Φουντάς, Βασίλειος Ψηρούκης**

Έκδοση: **1.1**

Είδος Παραδοτέου: **Έκθεση**

Ημερομηνία παράδοσης: **10 Δεκεμβρίου 2025**

Στοιχεία Πράξης

Τίτλος: Καινοτόμες λύσεις για τη βιώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική φυτοπροστασία των οπωροκηπευτικών της Ελλάδας, στην Ευρώπη του μέλλοντος

Τίτλος (EN): InnoPP-Innovations in Plant Protection for sustainable and environmentally friendly pest control

Κωδικός πράξης: ΤΑΕDR-0535675

Ακρωνύμιο έργου: InnoPP

Ημερομηνία έναρξης: 15 Μαΐου 2023

Διάρκεια: 28 Μήνες

Συντονιστής Φορέας: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Συντονιστής/ Επιστημονικός Υπεύθυνος: Ιωάννης Βόντας

Πίνακας Περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΤΟΥ ΈΡΓΟΥ	3
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΤΟΧΟΙ	4
2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	7
2.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	7
2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	10
3 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	14
4 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι	16

Περίληψη του Έργου

Το έργο «Καινοτόμες λύσεις για τη βιώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική φυτοπροστασία των οπωροκηπευτικών της Ελλάδας, στην Ευρώπη του μέλλοντος» στοχεύει στην ανάπτυξη σύγχρονων και καινοτόμων μεθόδων για την προστασία των καλλιεργειών όπως τα κηπευτικά, τα εσπεριδοειδή και το επιτραπέζιο σταφύλι. Περιλαμβάνει τη δημιουργία προηγμένων διαγνωστικών εργαλείων για την ανίχνευση εχθρών και παθογόνων με τεχνολογίες αιχμής, όπως ηλεκτρονικές παγίδες και βιοαισθητήρες, καθώς και πλατφόρμες αλληλούχισης για τον πλήρη προσδιορισμό των ιωμάτων. Επιπλέον, θα αναπτυχθούν μοντέλα πρόβλεψης επιδημιών και καινοτόμα βιοφυτοπροστατευτικά προϊόντα, τα οποία θα αξιολογηθούν για την ασφάλεια τους σε μη στόχους οργανισμούς. Τέλος, οι νέες τεχνολογίες θα ενσωματωθούν σε συστήματα ολοκληρωμένης διαχείρισης φυτοπροστασίας και θα δοκιμαστούν σε πραγματικές συνθήκες, ενώ θα αξιολογηθούν οι κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους.

Σύνοψη της ΕΕ5

Η ΕΕ5 εστιάζει στον σχεδιασμό και την ανάπτυξη εφαρμογών φυτοπροστασίας ακριβείας σε συμβατικά και βιολογικά συστήματα, με στόχο τη μείωση της χρήσης γεωργικών φαρμάκων και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας. Συγκεκριμένα, η ΕΕ5 περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση ψεκαστικών μηχανημάτων και παραμέτρων εφαρμογής, την αξιολόγηση της επικινδυνότητας και η περιβαλλοντικής επίπτωσης των εφαρμογών ακριβείας έναντι των συμβατικών, με έμφαση στα υπολείμματα, την ανάπτυξη και δοκιμασία πρωτοκόλλων ψεκασμών με drones σε πραγματικές συνθήκες. Παράλληλα, αποσκοπεί στην αναβάθμιση της Βάση Δεδομένων Γάλανθος για τη διαχείριση της ανθεκτικότητας, τη δημιουργία βάσης δεδομένων και διαδραστικοί χάρτες για την καταγραφή ιολογικών προβλημάτων, όπως και την ανάπτυξη έξυπνης διαδικτυακής πλατφόρμας για τη βέλτιστη διαχείριση της φυτοπροστασίας.

Συνοπτική παρουσίαση του παραδοτέου Π5.3.2

Το παραδοτέο παρουσιάζει πειραματικά αποτελέσματα και δεδομένα δοκιμών πεδίου, ως γενική επισκόπηση της χρήσης ψεκαστικών drones σε επιλεγμένες καλλιέργειες και της συμβολής που δύναται να έχουν στη βελτίωση της ακρίβειας και της αποδοτικότητας εφαρμογών φυτοπροστασίας. Στο συγκεκριμένο παραδοτέο περιγράφεται η αξιολόγηση της κάλυψης και της εναπόθεσης του ψεκαστικού υγρού σε αμπελώνες, ως μέτρο σύγκρισης της απόδοσης μεταξύ ενός ψεκαστικού drone υπό διαφορετικές ρυθμίσεις λειτουργίας (πίεση αντλίας / ταχύτητα και υψόμετρο εφαρμογής) και στρατηγικών εφαρμογής (θέση αεροσκάφους σε σχέση με τις γραμμές φύτευσης), με ενός συμβατικού ψεκαστικού μηχανήματος. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τη σημασία της βελτιστοποίησης των τεχνικών και λειτουργικών παραμέτρων και υπογραμμίζουν τον ρόλο των drones ως καινοτόμων και φιλικών προς το περιβάλλον εργαλείων στη βελτίωση των αγροτικών πρακτικών.

1 Εισαγωγή και Στόχοι

Στη σύγχρονη γεωργία, η ακριβής και αποτελεσματική εφαρμογή αγροχημικών είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της υγείας των καλλιεργειών και την αύξηση της παραγωγικότητας, ενώ παράλληλα μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αν και οι συμβατικές τεχνικές ψεκασμού έχουν αποτελέσει θεμέλιο για την προστασία των καλλιεργειών για πολλά χρόνια, η εισαγωγή μη επανδρωμένων αεροχημάτων (UAV), γνωστών ως drones, έχει οδηγήσει σε μια μεταμορφωτική περίοδο στη γεωργία. Τα UAV προσφέρουν πολλές νέες δυνατότητες για τη βελτίωση των γεωργικών πρακτικών μέσω της ακρίβειας, της αποδοτικότητας και της ασφάλειας στην εφαρμογή χημικών.

Οι εφαρμογές προστασίας των καλλιεργειών παίζουν κρίσιμο ρόλο στην άμυνα των καλλιεργειών από τις συνεχείς απειλές που θέτουν τα έντομα, οι ασθένειες και οι περιβαλλοντικές προκλήσεις. Αυτές οι προσεγγίσεις περιλαμβάνουν πρακτικές θεραπείες και εξειδικευμένες στρατηγικές που στοχεύουν άμεσα στην αποτελεσματική διαχείριση προσβολών από παράσιτα, ασθένειες και περιβαλλοντικές αντιξοότητες (Barzman et al., 2015). Στις καλλιέργειες υψηλής αξίας, όπως τα αμπέλια, η χημική καταπολέμηση παραμένει η κύρια μέθοδος για την προστασία των καλλιεργειών, περιλαμβάνοντας τη χρήση φυτοπροστατευτικών ουσιών όπως τα φυτοφάρμακα και τα ζιζανιοκτόνα, όταν είναι απαραίτητο (Bostanian et al., 2012). Στους αμπελώνες, χρησιμοποιείται συχνά ως προληπτική στρατηγική πριν την εμφάνιση προσβολών, αλλά μπορεί επίσης να εφαρμοστεί στα πρώτα στάδια εμφάνισης συμπτωμάτων, με στόχο την επιλεκτική αντιμετώπιση συγκεκριμένων παρασίτων και ασθενειών, ώστε να αποφευχθεί σημαντική ζημιά στην καλλιέργεια.

Παρόλο που οι συμβατικές τεχνικές έχουν αναμφίβολα θέσει τα θεμέλια για την αμπελουργία, παρουσιάζουν εγγενείς περιορισμούς. Η αποτελεσματικότητα αυτών των μεθόδων μπορεί να διαφέρει και δεν είναι πάντα οι καλύτερες για μεγάλους εμπορικούς αμπελώνες. Καθώς η αμπελουργία επεκτείνεται παγκοσμίως, αυξάνεται η αναγνώριση της ανάγκης για πιο αποτελεσματικές και αξιόπιστες μεθόδους προστασίας των καλλιεργειών (Bramley, 2022). Η ιστορική εξάρτηση από τις παραδοσιακές μεθόδους στους αμπελώνες, αν και σημαντική, υπογραμμίζει την ανάγκη αντιμετώπισης των περιορισμών και των πολυπλοκοτήτων που σχετίζονται με τις εφαρμογές προστατευτικού ψεκασμού. Αυτές οι ανησυχίες συνεχίζουν να διαμορφώνουν το εξελισσόμενο πλαίσιο των αμπελουργικών τεχνικών.

Η σωστή εφαρμογή των φυτοφαρμάκων είναι κρίσιμη για τη διαχείριση των παρασίτων και τη γεωργική αποδοτικότητα. Ωστόσο, η υπερβολική εφαρμογή μπορεί να οδηγήσει σε αρνητικές επιπτώσεις, όπως η μείωση της γονιμότητας του εδάφους και η εμφάνιση ανθεκτικών ειδών εντόμων στα φυτοφάρμακα. Οι παραδοσιακές τεχνικές ψεκασμού υπήρξαν για μεγάλο χρονικό διάστημα απαραίτητες για την προστασία των αμπελιών από τα παράσιτα, αλλά αντιμετωπίζουν συνεχιζόμενες προκλήσεις που καθιστούν αναγκαία την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων. Διάφορες εδραιωμένες μέθοδοι, από ψεκαστήρες πλάτης έως συστήματα τοποθετημένα σε τρακτέρ, υπήρξαν ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση εντόμων, ασθενειών και ζιζανίων στους αμπελώνες. Παρά την αποτελεσματικότητά τους, οι μέθοδοι αυτές παρουσιάζουν εγγενείς περιορισμούς, οδηγώντας στην ανάγκη για πιο αποδοτικές και αποτελεσματικές πρακτικές.

Το κύριο εμπόδιο που αντιμετωπίζεται στις συμβατικές τεχνικές ψεκασμού στους

αμπελώνες είναι η επίτευξη ολοκληρωμένης και ομοιόμορφης κάλυψης ψεκασμού. Οι αμπελώνες χαρακτηρίζονται από πυκνή βλάστηση και ποικιλόμορφη δομή κόμης, δημιουργώντας ένα περιβάλλον που θέτει σημαντικές προκλήσεις για την ομοιόμορφη εφαρμογή αγροχημικών. Η παρουσία πυκνής βλάστησης δημιουργεί συχνά «σκιασμένες» περιοχές που είναι δύσκολο να προσεγγιστούν, οδηγώντας σε ασυνεπή εφαρμογή. Η έλλειψη συνέπειας στη διαμόρφωση του αμπελώνα καθιστά ορισμένες περιοχές πιο ευάλωτες σε προσβολές και ασθένειες, με αρνητικές επιπτώσεις τόσο στην ποσότητα όσο και στην ποιότητα της παραγωγής. Η διατήρηση συνεπούς και ομοιόμορφης κάλυψης ψεκασμού είναι υψίστης σημασίας στους αμπελώνες λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους, όπως το τοπογραφικό ανάγλυφο και η πυκνή διάταξη των αμπέλων (Sarrì et al., 2019). Επιπλέον, στο πλαίσιο των «ειδικών καλλιεργειών», όπως τα οπωροφόρα δέντρα, τα εσπεριδοειδή, οι ελιές και οι αμπελώνες, η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας ψεκασμού εξαρτάται άμεσα από τα μοναδικά χαρακτηριστικά του φυλλώματος. Η αποδοτικότητα της διαδικασίας επηρεάζεται σημαντικά από διάφορους παράγοντες, όπως η δομή του φυλλώματος, οι διαστάσεις και τα συστήματα υποστήριξης (Balsari et al., 2008).

Επιπλέον, η διασπορά του ψεκαστικού νέφους (spray drift) αποτελεί εδώ και καιρό σημαντικό ζήτημα στις συμβατικές τεχνικές ψεκασμού, ιδίως όταν χρησιμοποιούνται ψεκαστήρες αεροβοήθειας τοποθετημένοι σε τρακτέρ. Η εκτροπή ψεκασμού συμβαίνει όταν μικρά σταγονίδια ή αερολύματα παρασύρονται από ρεύματα αέρα πέρα από την προοριζόμενη περιοχή εφαρμογής, δημιουργώντας κίνδυνο περιβαλλοντικής μόλυνσης. Οι συμβατικοί ψεκαστήρες συχνά οδηγούν σε σημαντικές απώλειες φυτοφαρμάκων και περιβαλλοντική μόλυνση. Η αυξανόμενη χρήση φυτοπροστατευτικών προϊόντων (PPP) σε μηχανοποιημένους εμπορικούς αμπελώνες έχει εντείνει τις ανησυχίες σχετικά με τα υπολείμματα φυτοφαρμάκων στα σταφύλια (Magucco et al., 2019). Αν και τα προϊόντα αυτά είναι απαραίτητα για την προστασία των καλλιεργειών, η υπερβολική τους χρήση εγείρει εύλογες ανησυχίες σχετικά με τα επίπεδα υπολειμμάτων. Σύμφωνα με έκθεση της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το ποσοστό υπέρβασης των ανώτατων ορίων υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων στα σταφύλια οινοποιίας έχει αυξηθεί (EFSA, 2021). Η παρουσία υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων στα σταφύλια έχει σημαντικές επιπτώσεις για την ασφάλεια των τροφίμων και τη δημόσια υγεία, υπογραμμίζοντας την ανάγκη μείωσης αυτών των υπολειμμάτων στα γεωργικά προϊόντα.

Τα πολυρότορα UAV προσφέρουν πολυάριθμα πλεονεκτήματα που μπορούν να αντιμετωπίσουν τις παραπάνω προκλήσεις στον τομέα της αμπελουργίας. Τα οφέλη αυτά περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, την υψηλή ευελιξία, την ανεξαρτησία από συγκεκριμένες υποδομές απογείωσης, καθώς και τη δυνατότητα λειτουργίας σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Τα UAV έχουν αποδείξει υψηλή απόδοση στην πλοήγηση σε λοφώδη εδάφη, πυκνές δασικές περιοχές και ταραχώδεις ροές αέρα που δημιουργούνται κάτω από τους ρότορες, όπως αναφέρεται από τους Zhou et al. (2016). Η χρήση UAV για την εφαρμογή φυτοφαρμάκων αυξάνεται σημαντικά, ιδιαίτερα στην Κίνα. Στην Ιαπωνία, όπου κυριαρχούν οι μικρής κλίμακας φάρμες, χρησιμοποιούνται παραδοσιακά από τη δεκαετία του 1990 μη επανδρωμένα ελικόπτερα με βενζινοκινητήρα (Xiongkui et al., 2017). Τα UAV έχουν ξεπεράσει περιορισμούς που σχετίζονται με το έδαφος και έχουν μειώσει τους κινδύνους έκθεσης σε χημικά για τους αγρότες σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους (Pederí & Chernoñuk, 2015).

Επιπλέον, ο ψεκασμός με UAV έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμος σε απότομους αμπελώνες, όπου τα συμβατικά μηχανήματα έχουν περιορισμένες δυνατότητες (Delruech et al., 2022). Οι ψεκαστήρες μικρού όγκου των UAV μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλά ύψη πάνω από τις καλλιέργειες, σε μικρά αγροτεμάχια ή σε δύσβατες περιοχές που δεν είναι εύκολα προσβάσιμες από ανθρώπους ή επίγεια μηχανήματα (Xiongkui et al., 2017). Ο ψεκασμός με UAV έχει καταστεί σημαντικός στη σύγχρονη γεωργία λόγω της αποδοτικής κάλυψης μεγάλων εκτάσεων, της μειωμένης χρήσης φυτοφαρμάκων, της εξοικονόμησης κόστους, της αυτοματοποίησης των εργασιών και της αποφυγής συμπίεσης του εδάφους και ζημιών στις καλλιέργειες (Ozkan, 2023). Επιπλέον, οι ψεκαστήρες UAV έχουν αποδείξει ανώτερη οικονομική αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα (Pederi & Cherogniuk, 2015), καθώς και ακριβέστερη εφαρμογή αγροχημικών, βελτιωμένη κάλυψη ψεκασμού και μειωμένη σπατάλη πόρων (Chen et al., 2022). Η ικανότητά τους να πλοηγούνται με ακρίβεια στις σειρές των καλλιεργειών επιτρέπει στους παραγωγούς να βελτιστοποιούν τη χρήση των πόρων και να μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθιστώντας τα UAV ιδιαίτερα ελκυστικά για τη διαχείριση αμπελώνων (Biglia et al., 2022).

Ο σκοπός του παρόντος εγγράφου είναι η παρουσίαση και ανάλυση πειραματικών δεδομένων από δοκιμές πεδίου, που αφορούν τη χρήση ψεκαστικών μη επανδρωμένο αεροσκάφος (ΣμηΕΑ, κοινώς drones) σε αμπελώνες και τη σύγκρισή τους με συμβατικό ψεκαστικό εξοπλισμό ως προς την κάλυψη και την εναπόθεση του ψεκαστικού υγρού. Μέσω της αξιολόγησης διαφορετικών λειτουργικών ρυθμίσεων και στρατηγικών εφαρμογής, το παραδοτέο στοχεύει στην ανάδειξη της δυναμικής των drones για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας των εφαρμογών φυτοπροστασίας.

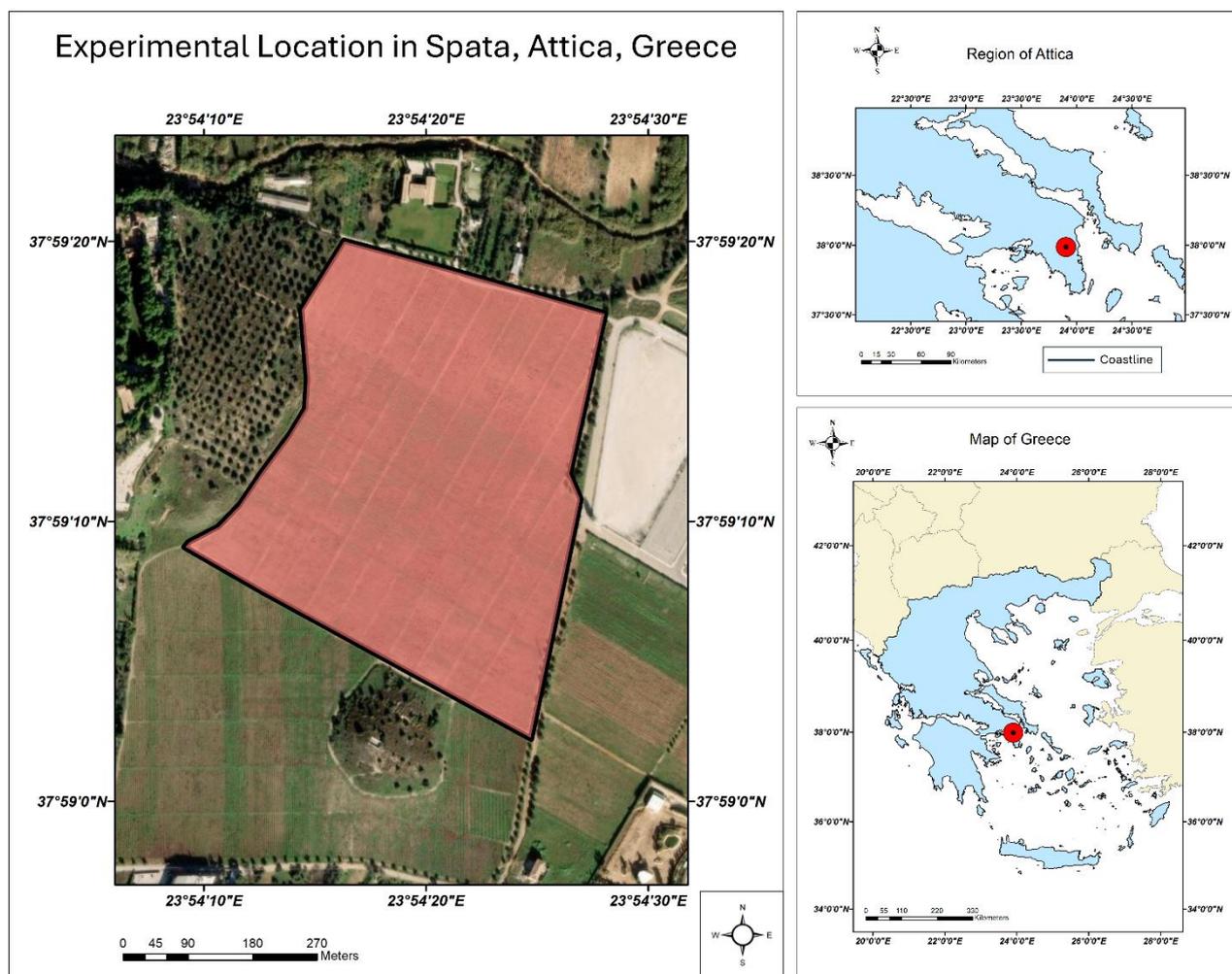
2 Περιγραφή Των Εργασιών

2.1 Υλικά και Μέθοδοι

Πειραματικό Σχέδιο

Το ερευνητικό έργο διεξήχθη στον βιολογικό αμπελώνα του αγροκτήματος του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, ο οποίος βρίσκεται στα Σπάτα, Ελλάδα, στις συντεταγμένες 37°59'04.6"N 23°54'19.6"E (Εικόνα 1). Η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιοχής είναι 17,3°C, ενώ η ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται περίπου στα 450 mm. Ο αμπελώνας διαθέτει αποστάσεις μεταξύ των σειρών 2,0 m και αποστάσεις μεταξύ των φυτών κατά μήκος της σειράς 1,6 m, με αποτέλεσμα πυκνότητα φύτευσης 3.125 φυτών ανά εκτάριο. Αποτελείται κυρίως από την ποικιλία Σαββατιανό (*Vitis vinifera* L.), η οποία είναι η κυρίαρχη ιθαγενής ποικιλία της περιοχής της Αττικής. Το Σαββατιανό αντιπροσωπεύει περίπου το 70% της συνολικής καλλιέργειας αμπέλου στην περιοχή και αποτελεί την πλέον διαδεδομένη ποικιλία σταφυλιών στην Ελλάδα, λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της και της ιστορικής της σημασίας (Despina et al., 2022). Το μέσο ύψος των φυτών είναι περίπου 1,3 m, με τη βλάστηση και τα σταφύλια να καταλαμβάνουν τη ζώνη μεταξύ 0,3 και 1,4 m πάνω από το έδαφος.

Το ψεκαστικό ΣμηΕΑ που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη ήταν το DJI Agras T16. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών επαναλήψεων, οι περιβαλλοντικές συνθήκες ρυθμίστηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ISO 22866:2005, προσαρμοσμένο για εφαρμογές με ΣμηΕΑ. Όλες οι πτήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ελεγχόμενο εύρος θερμοκρασιών από 25 έως 35 °C, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στην εναπόθεση του ψεκαστικού υγρού. Οι ταχύτητες του ανέμου παρακολουθήθηκαν με τη χρήση φορητού υπερηχητικού οργάνου μέτρησης ανέμου, προκειμένου να διασφαλιστεί ότι όλες οι δοκιμές διεξήχθησαν με ταχύτητα ανέμου μικρότερη από 3 m/s και ευνοϊκή κατεύθυνση (κάθετη στις σειρές των αμπέλων ±10° Βορρά). Το όργανο τοποθετήθηκε σε απόσταση 20 m από την περιοχή εφαρμογής, ακριβώς πάνω από τη βλάστηση, σε ύψος 2 m από το έδαφος, ώστε να αποφευχθεί οποιαδήποτε πιθανή παρεμβολή στη διαδικασία ψεκασμού. Τα δεδομένα καταγράφηκαν με συχνότητα 1 Hz και υπολογίστηκε ο μέσος όρος για κάθε επανάληψη.



Εικόνα 1. Η τοποθεσία του πειραματικού αμπελώνα του ΓΠΑ στα Σπάτα, Αττική.

Η μελέτη εξέτασε διάφορους συνδυασμούς των ακόλουθων μεταβλητών: ύψος ψεκασμού (2 και 2,5 m πάνω από το έδαφος), ρυθμό ροής ανά ακροφύσιο (1,4 και 1,8 L/min) σε συνδυασμό με ταχύτητες πτήσης (1 και 1,5 m/s), καθώς και θέσεις ψεκασμού (μεταξύ των σειρών και πάνω από τις σειρές). Όλα τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν με σταθερό ρυθμό εφαρμογής ανά εκτάριο (80 L/ha). Το πειραματικό πρωτόκολλο περιλάμβανε οκτώ διακριτούς συνδυασμούς εφαρμογών, οι οποίοι διερεύνησαν την αλληλεπίδραση μεταξύ ύψους πτήσης (H), ταχύτητας πτήσης (S) και θέσης εφαρμογής σε σχέση με τις σειρές (Over-row / OR για πάνω από τη σειρά και Inter-row / IR για μεταξύ των σειρών). Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τις διαμορφώσεις κάθε εφαρμογής. Κάθε εφαρμογή επαναλήφθηκε τρεις φορές σε σύντομο χρονικό διάστημα, ώστε να περιοριστούν οι μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών.

Πίνακας 1. Οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για το ψεκαστικό ΣμηΕΑ ανά μεταχείριση.

Treatment	Factors	Factor Values
A	H1 – S1 – OR	2.5 (m) – 1 (m/s) – Over Row
B	H1 – S2 – OR	2.5 (m) – 1.5 (m/s) – Over Row
C	H2 – S1 – OR	2.0 (m) – 1 (m/s) – Over Row
D	H2 – S2 – OR	2.0 (m) – 1.5 (m/s) – Over Row

E	H1 – S1 – IR	2.5 (m) – 1 (m/s) – Inter Row
F	H1 – S2 – IR	2.5 (m) – 1.5 (m/s) – Inter Row
G	H2 – S1 – IR	2.0 (m) – 1 (m/s) – Inter Row
H	H2 – S2 – IR	2.0 (m) – 1.5 (m/s) – Inter Row

Δειγματοληψία και ανάλυση WSP

Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν υδατοευαίσθητα χαρτιά (Water Sensitive Papers, WSP) διαστάσεων 0,76 × 26 mm ως συλλέκτες σταγονιδίων. Τα χαρτιά αυτά επιλέχθηκαν λόγω της ικανότητάς τους να παγιδεύουν σταγονίδια ψεκασμού και να μεταβάλλουν άμεσα το χρώμα τους κατά την επαφή με το ψεκαστικό υγρό. Για την αξιολόγηση της κατανομής των σταγονιδίων, τοποθετήθηκαν τρία WSP σε κάθε σειρά του αμπελώνα, σε τρία διαφορετικά ύψη, όλα στερεωμένα στα πρέμνα. Τα ύψη αυτά ορίστηκαν στα 0,3 m (κατώτερα στρώματα φυλλώματος), 0,6 m (μέσα στρώματα φυλλώματος) και 0,9–1,0 m (ανώτερα στρώματα φυλλώματος) (Εικόνα 2).

Μετά τη συλλογή, κάθε δείγμα τοποθετήθηκε σε ξεχωριστές σφραγισμένες σακούλες με ετικέτες που περιλάμβαναν πληροφορίες σχετικά με τη συγκεκριμένη εφαρμογή, την επανάληψη και τη θέση δειγματοληψίας. Οι σακούλες αποθηκεύτηκαν άμεσα σε κλειστό δοχείο για την αποφυγή αλλοιώσεων λόγω υγρασίας και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για ανάλυση.



Εικόνα 2. Γραφικό παράδειγμα της στρατηγικής τοποθέτησης WSP (Αριστερά) και ένα ενδεικτικό δείγμα πεδίου (Δεξιά).

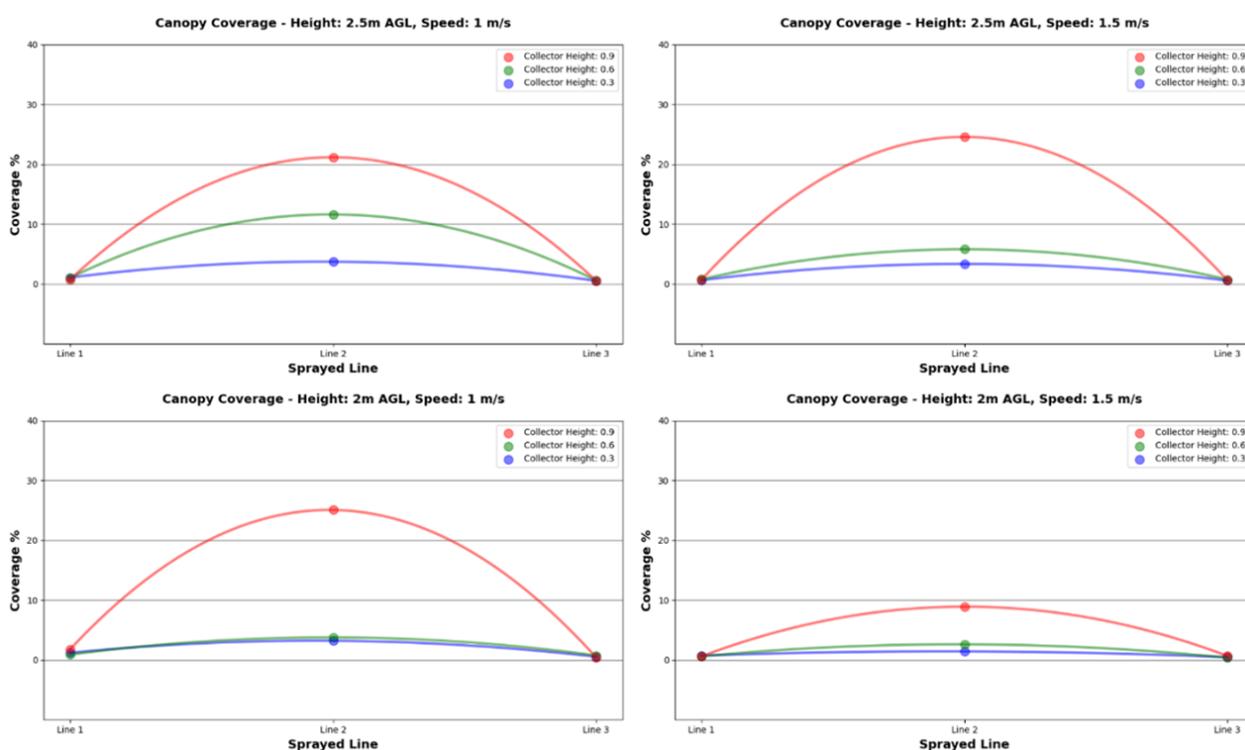
Στο εργαστήριο, τα WSP σαρώθηκαν με σαρωτή υψηλής ανάλυσης 600 dpi και οι ψηφιακές εικόνες αναλύθηκαν με το λογισμικό DepositScan, το οποίο αναπτύχθηκε από

την Υπηρεσία Αγροτικής Έρευνας (ARS) του Υπουργείου Γεωργίας των Ηνωμένων Πολιτειών (USDA). Το DepositScan χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της εναπόθεσης σταγονιδίων και, συγκεκριμένα, του ποσοστού κάλυψης (%), το οποίο αποτέλεσε τον κύριο δείκτη αξιολόγησης της αποδοτικότητας των εφαρμογών ψεκασμού με UAV στους αμπελώνες. Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν με ανάλυση διακύμανσης δύο παραγόντων (two-way ANOVA), ενώ η απεικόνιση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με χρήση των λογισμικών RStudio και Python.

2.2 Αποτελέσματα και Συζήτηση

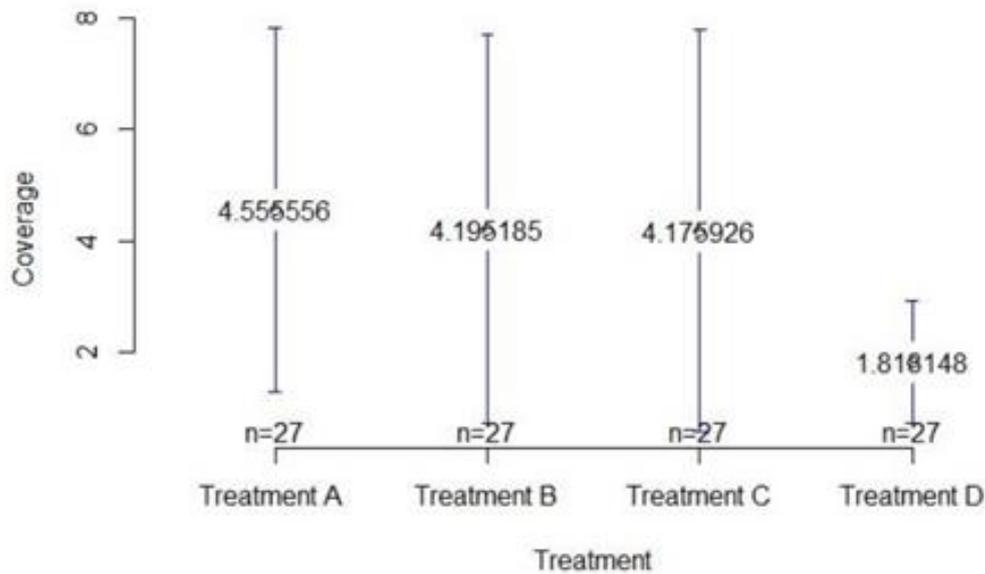
Εφαρμογές πάνω από τις σειρές

Η Εικόνα 3 παρουσιάζει τα συνολικά αποτελέσματα για κάθε μεμονωμένη εφαρμογή. Για την αξιολόγηση των διαφορών στην κάλυψη της βλάστησης, πραγματοποιήθηκαν στατιστικοί έλεγχοι για τους παράγοντες «Ταχύτητα» και «Ύψος» με χρήση δοκιμής Tukey post-hoc. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ταχύτητα πτήσης 1 m/s οδήγησε σε υψηλότερη μέση κάλυψη σε σύγκριση με την ταχύτητα 1,5 m/s. Αντίστοιχα, το ύψος πτήσης των 2,5 m παρουσίασε υψηλότερα ποσοστά κάλυψης σε σχέση με των 2 m.



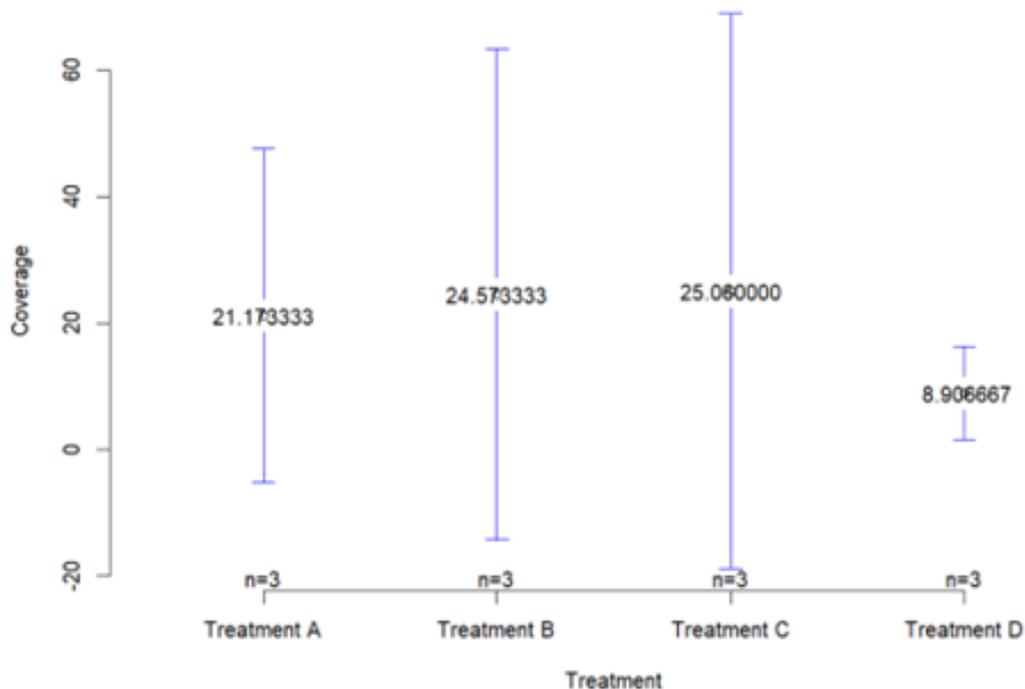
Εικόνα 3. Τα αποτελέσματα κάλυψης των εφαρμογών με το ΣμηΕΑ να πετά πάνω από τη κεντρική γραμμή φύτευσης (OR).

Η ανάλυση διακύμανσης δύο παραγόντων έδειξε ότι ο κύριος παράγοντας «Εφαρμογή» δεν είχε στατιστικά σημαντική επίδραση στην κάλυψη ($p > 0,05$). Η Εφαρμογή A παρουσίασε τις υψηλότερες μέσες τιμές κάλυψης, ακολουθούμενη από τις Εφαρμογές B και C, ενώ η Εφαρμογή D εμφάνισε τη χαμηλότερη απόδοση. Η Εφαρμογή A, με ύψος πτήσης 2,5 m και ταχύτητα 1 m/s, αναδείχθηκε ως η πλέον αποδοτική ρύθμιση για τις εφαρμογές πάνω από τις σειρές (Εικόνα 4).



Εικόνα 4. Το μέσο ποσοστό κάλυψης για κάθε εφαρμογής OR, σε όλες τις επαναλήψεις.

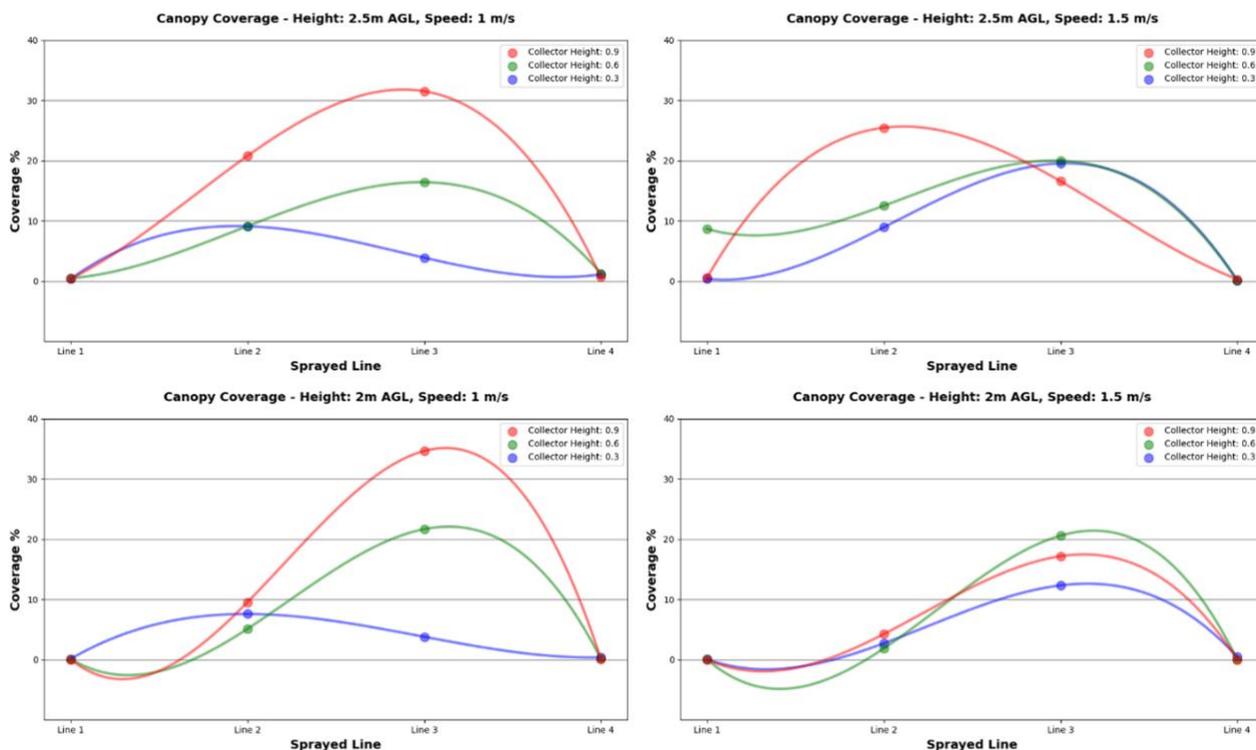
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εφαρμογές πάνω από τις σειρές ήταν πιο αποτελεσματικές στη μεσαία σειρά που βρίσκεται ακριβώς κάτω από το UAV και στα ανώτερα επίπεδα της βλάστησης (Εικόνα 5). Η ανάλυση δύο παραγόντων δεν ανέδειξε στατιστικά σημαντικές επιδράσεις των παραγόντων «Ταχύτητα» και «Ύψος» στην άνω ζώνη της μεσαίας σειράς, αν και παρατηρήθηκαν τάσεις υψηλότερης κάλυψης σε χαμηλότερες ταχύτητες και μεγαλύτερα ύψη πτήσης.



Εικόνα 5. Το ποσοστό κάλυψης της κόμης των εφαρμογών OR, στα ανώτερα στρώματα φυλλώματος.

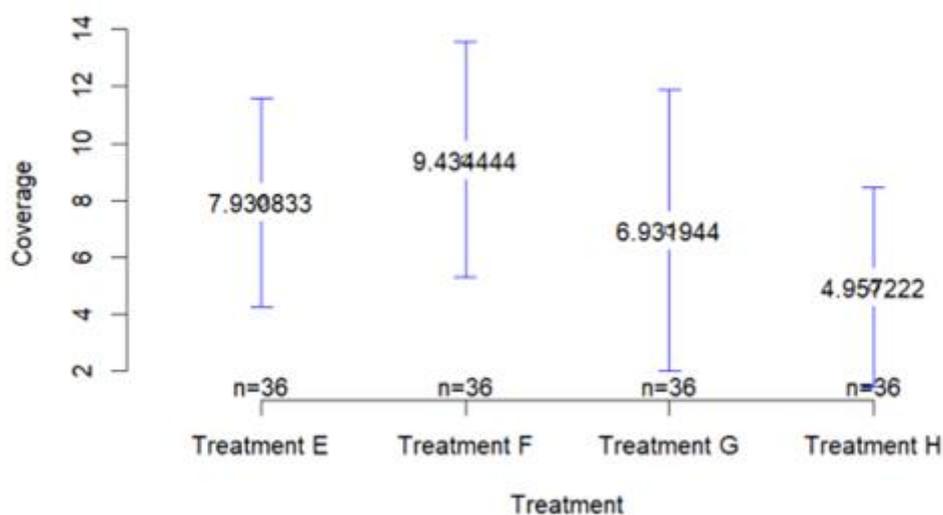
Εφαρμογές μεταξύ των σειρών

Η Εικόνα 6 παρουσιάζει τα συνολικά αποτελέσματα για κάθε εφαρμογή μεταξύ των σειρών. Οι υψηλότερες μέσες καλύψεις καταγράφηκαν στις εσωτερικές σειρές, ενώ τα ανώτερα επίπεδα της βλάστησης εμφάνισαν τη μεγαλύτερη μέση κάλυψη (Εικόνα 8).

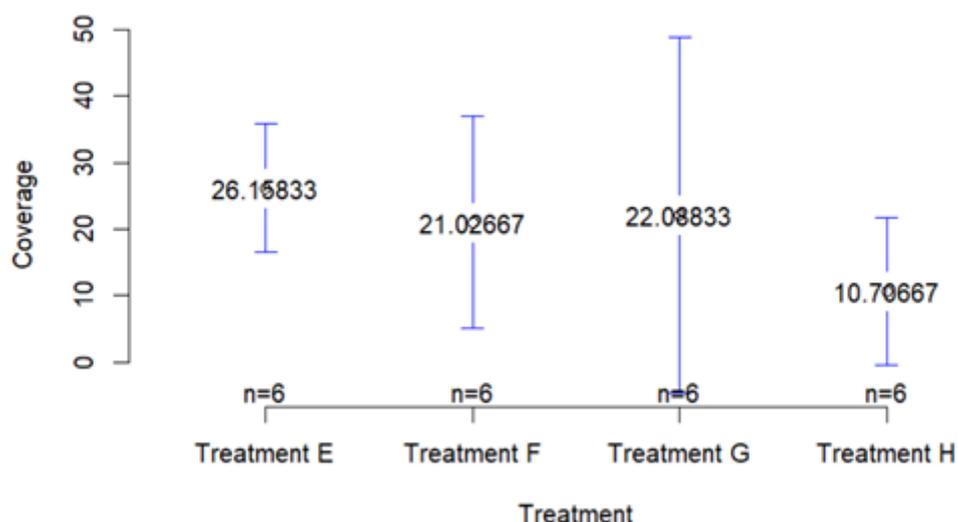


Εικόνα 6. Τα αποτελέσματα κάλυψης των εφαρμογών με το ΣμηΕΑ να πετά μεταξύ των δύο κεντρικών γραμμών φύτευσης (IR).

Η Εφαρμογή F παρουσίασε την υψηλότερη μέση κάλυψη, ακολουθούμενη από τις Εφαρμογές E και G, ενώ η Εφαρμογή H εμφάνισε τη χαμηλότερη απόδοση (Εικόνα 7). Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το ύψος πτήσης των 2,5 m οδήγησε σε υψηλότερη κάλυψη σε σύγκριση με τα 2 m, ενώ η ταχύτητα πτήσης δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντική επίδραση.



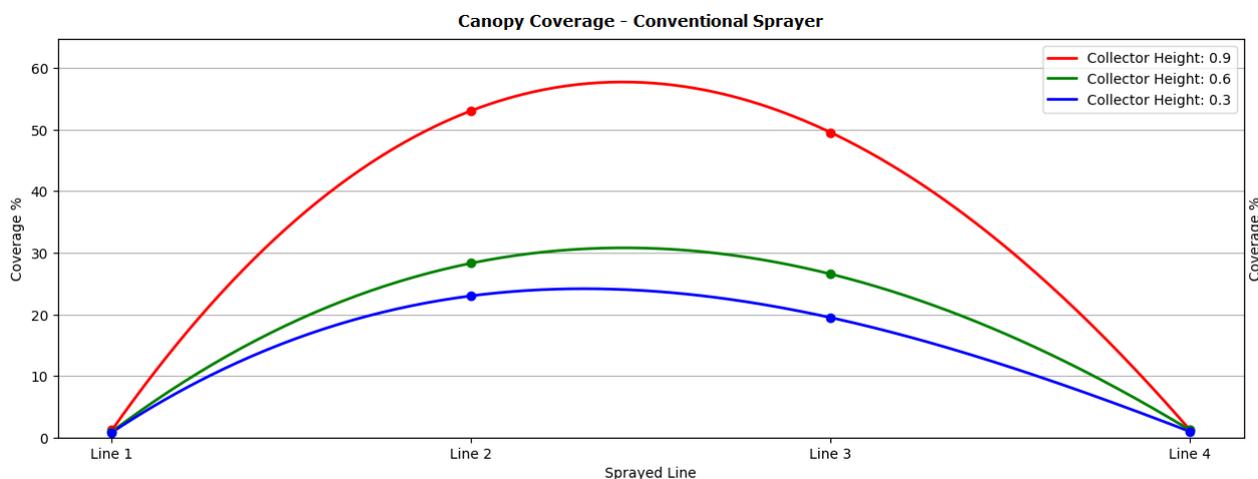
Εικόνα 7. Το μέσο ποσοστό κάλυψης για κάθε εφαρμογής IR, σε όλες τις επαναλήψεις



Εικόνα 8. Το ποσοστό κάλυψης της κόμης των εφαρμογών IR, στα ανώτερα στρώματα φυλλώματος.

Στα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατηρήθηκε ότι το συμβατικό μηχάνημα ψεκασμού πέτυχε ομοιόμορφη κάλυψη σε όλα τα στρώματα του φυλλώματος, με ιδιαίτερα σταθερά αποτελέσματα στα μεσαία και κατώτερα τμήματα των αμπελιών. Η κατανομή του ψεκαστικού υγρού ήταν πιο πλήρης σε σχέση με τα drones, τα οποία παρουσίασαν συγκρίσιμη κάλυψη μόνο στα ανώτερα στρώματα. Τα δεδομένα δείχνουν ότι ο αυξημένος όγκος εφαρμογής του συμβατικού μηχανήματος (στη συγκεκριμένη περίπτωση περίπου 10 φορές μεγαλύτερος) συνέβαλε στη μεγαλύτερη διείσδυση μέσα στο φύλλωμα, ενώ παράλληλα επιτεύχθηκε ικανοποιητική συγκράτηση των σταγονιδίων στην επιφάνεια των φύλλων (Εικόνα 9). Συνολικά, τα αποτελέσματα

αναδεικνύουν διαφοροποιήσεις στην κατανομή του ψεκαστικού μεταξύ των δύο τύπων συστημάτων, χωρίς όμως να αποκλείεται η χρήση των drones σε συνθήκες που απαιτούν κυρίως κάλυψη των ανώτερων στρωμάτων.



Εικόνα 9. Τα αποτελέσματα κάλυψης των εφαρμογών με το συμβατικό μηχάνημα - νεφελοψεκαστήρα.

3 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Οι εφαρμογές μεταξύ των σειρών παρείχαν συνολικά υψηλότερη και πιο ομοιόμορφη κάλυψη της βλάστησης σε σύγκριση με τις εφαρμογές πάνω από τις σειρές. Η Εφαρμογή Ε αναδείχθηκε ως η πλέον αποδοτική ρύθμιση, ακολουθούμενη από τις Εφαρμογές G και F, ενώ η Εφαρμογή Η παρουσίασε τη χαμηλότερη απόδοση. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι μεγαλύτερα ύψη πτήσης και χαμηλότερες ταχύτητες τείνουν να βελτιώνουν την κάλυψη της βλάστησης, ιδιαίτερα στα μεσαία και χαμηλά επίπεδα, υπογραμμίζοντας τη σημασία της βελτιστοποίησης των λειτουργικών παραμέτρων στον ψεκασμό με UAV σε αμπελώνες.

Τα συμβατικά μηχανήματα ψεκασμού τύπου νεφελοψεκαστήρα παρουσιάζουν ανώτερη κάλυψη στα αμπέλια κυρίως λόγω του μεγαλύτερου όγκου εφαρμογής υγρού. Ο αυξημένος όγκος ψεκαστικού υγρού επιτρέπει τη βαθύτερη διείσδυση μέσα στο φύλλωμα, επιτυγχάνοντας ομοιόμορφη κατανομή τόσο στα ανώτερα όσο και στα μεσαία και κατώτερα στρώματα των φυτών. Η υψηλή ροή υγρού δημιουργεί σταγόνες ικανές να παραμένουν στην επιφάνεια των φύλλων, ενώ ταυτόχρονα οι ροές αέρα που παράγονται από τον ανεμιστήρα του νεφελοψεκαστήρα διευκολύνουν την κίνηση των σταγονιδίων μέσα στο πυκνό φύλλωμα, αυξάνοντας τη συνολική κάλυψη και την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής.

Αντίθετα, τα drones ψεκασμού, αν και μπορούν να επιτύχουν ικανοποιητική κάλυψη στα ανώτερα στρώματα του φυλλώματος λόγω της εγγύτητας της πηγής ψεκασμού και της κατευθυνόμενης ροής, παρουσιάζουν περιορισμένη διείσδυση στα μεσαία και κατώτερα στρώματα. Αυτό οφείλεται στον περιορισμένο όγκο υγρού που μπορούν να μεταφέρουν και στην έλλειψη ισχυρής ροής αέρα, που θα μπορούσε να ωθήσει τα σταγονίδια βαθύτερα μέσα στο φύλλωμα. Ως αποτέλεσμα, η κατανομή του ψεκαστικού υγρού είναι άνιση, με μειωμένη κάλυψη σε περιοχές που βρίσκονται χαμηλότερα στο

φυλλικό στρώμα, γεγονός που μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής σε παθογόνους οργανισμούς ή έντομα που βρίσκονται σε αυτά τα στρώματα.

Συνολικά, η διαφορά στην κάλυψη μεταξύ συμβατικών νεφελοψεκαστήρων και drones βασίζεται κυρίως στη φυσική ικανότητα μεταφοράς και διανομής του υγρού μέσα στο φύλλωμα, καθώς και στην αλληλεπίδραση μεταξύ όγκου ψεκαστικού, ροής αέρα και γεωμετρίας του φυλλώματος. Η κατανόηση αυτών των παραμέτρων είναι κρίσιμη για τον σχεδιασμό στρατηγικών ψεκασμού που επιδιώκουν πλήρη και ομοιόμορφη προστασία των αμπελιών.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη σύγκριση της κάλυψης μεταξύ συμβατικών νεφελοψεκαστήρων και drones σε αμπελώνες παρέχουν πολύτιμη γνώση που μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλες δενδρώδεις καλλιέργειες, όπως τα εσπεριδοειδή, αλλά και σε αμπελώνες με διαφορετικά συστήματα ψεκασμού, όπως τα ψεκαστικά με ιστό. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο ο όγκος εφαρμογής, η ροή αέρα και το ύψος ψεκασμού επηρεάζουν τη διείσδυση του ψεκαστικού υγρού μέσα στο φύλλωμα επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των λειτουργικών παραμέτρων και σε άλλες καλλιέργειες. Επιπλέον, η γνώση αυτή μπορεί να καθοδηγήσει τη χρήση ψεκαστικών drones σε ειδικές εφαρμογές (όπως οι δολωματικοί ψεκασμοί σε εσπεριδοειδή και ροδάκινα), όπου η στόχευση στα ανώτερα στρώματα του φυλλώματος και η ομοιόμορφη κατανομή του υγρού είναι κρίσιμη για την αποτελεσματικότητα της προστασίας. Με αυτόν τον τρόπο, τα συμπεράσματα των συγκριτικών μετρήσεων παρέχουν ένα επιστημονικό υπόβαθρο για τη βελτίωση της αποδοτικότητας διαφορετικών συστημάτων ψεκασμού σε ποικίλες καλλιέργειες.

4 Παραρτημα Ι

Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. Balsari, P., Doruchowski, G., Marucco, P., Tamagnone, M., Van de Zande, J., & Wenneker, M. (2008). A system for adjusting the spray application to the target characteristics. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*.
2. Barzman, M., Bàrberi, P., Birch, A. N. E., Boonekamp, P., Dachbrodt-Saaydeh, S., Graf, B., ... & Sattin, M. (2015). Eight principles of integrated pest management. *Agronomy for sustainable development*, 35, 1199-1215.
3. Biglia, A., Grella, M., Bloise, N., Comba, L., Mozzanini, E., Sopegno, A., ... & Gay, P. (2022). UAV-spray application in vineyards: Flight modes and spray system adjustment effects on canopy deposit, coverage, and off-target losses. *Science of the Total Environment*, 845, 157292.
4. Bostanian, N. J., Vincent, C., & Isaacs, R. (Eds.). (2012). *Arthropod Management in Vineyards: Pests, Approaches, and Future Directions*. Springer Science & Business Media.
5. Bramley, R. G. V. (2022). Precision Viticulture: Managing vineyard variability for improved quality outcomes. In *Managing wine quality* (pp. 541-586). Woodhead Publishing.
6. Delpuech, X., Gorioux, H., & Pouxviel, G. (2022). Quality assessment of drone spraying in steeply sloping vineyards. *Phytoma - La santé des végétaux*, 741, [pages]. DOI: <https://doi.org/10.20870/IVES-TR.2022.5402>
7. Lou, Z., Xin, F., Han, X., Lan, Y., Duan, T., & Fu, W. (2018). Effect of unmanned aerial vehicle flight height on droplet distribution, drift and control of cotton aphids and spider mites. *Agronomy*, 8(9), 187.
8. Marucco, P., Balsari, P., Grella, M., Pugliese, M., Eberle, D., Gil, E., ... & Douzals, J. P. (2019). OPTIMA EU project: Main goal and first results of inventory of current spray practices in vineyards and orchards. In *Proceedings of SUPROFRUIT 2019—15th Workshop on Spray Application and Precision Technology in Fruit Growing*, 16–18 July 2019, East Malling—UK (pp. 99-100).
9. Morales-Rodríguez, P. A., Cano Cano, E., Villena, J., & López-Perales, J. A. (2022). A comparison between conventional sprayers and new UAV sprayers: A study case of vineyards and olives in extremadura (Spain). *Agronomy*, 12(6), 1307.
10. Myers, D., Ross, C. M., & Liu, B. (2015). A review of unmanned aircraft system (UAS) applications for agriculture. In *2015 ASABE Annual International Meeting* (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
11. Ozkan, E. (2023, January 24). Drones for Spraying Pesticides—Opportunities and Challenges. *Agriculture and Natural Resources FABE-540*. The Ohio State University. Retrieved from <https://ohioline.osu.edu/factsheet/fabe-540>
12. Pederri, Y. A., & Cheporniuk, H. S. (2015, October). Unmanned aerial vehicles and new technological methods of monitoring and crop protection in precision

- agriculture. In 2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) (pp. 298-301). IEEE.
13. Qin, W., Xue, X., Zhang, S., Gu, W., & Wang, B. (2018). Droplet deposition and efficiency of fungicides sprayed with small UAV against wheat powdery mildew. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2), 27-32
 14. Rasmussen, J., Nielsen, J., Garcia-Ruiz, F., Christensen, S., & Streibig, J. C. (2013). Potential uses of small unmanned aircraft systems (UAS) in weed research. *Weed research*, 53(4), 242-248.
 15. Sarri, D., Martelloni, L., Rimediotti, M., Lisci, R., Lombardo, S., & Vieri, M. (2019). Testing a multi-rotor unmanned aerial vehicle for spray application in high slope terraced vineyard. *Journal of Agricultural Engineering*, 50(1), 38-47.
 16. Shilin, W., Jianli, S., Xiongkui, H., Le, S., Xiaonan, W., Changling, W., ... & Yun, L. (2017). Performances evaluation of four typical unmanned aerial vehicles used for pesticide application in China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(4), 22-31.
 17. Tang, Y., Hou, C. J., Luo, S. M., Lin, J. T., Yang, Z., & Huang, W. F. (2018). Effects of operation height and tree shape on droplet deposition in citrus trees using an unmanned aerial vehicle. *Computers and Electronics in Agriculture*, 148, 1-7.
 - Thiery, D., Mazzoni, V., & Nieri, R. (2023). Disrupting pest reproduction techniques can replace pesticides in vineyards. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 43(5), 69.
 18. Valavanis, K. P., & Vachtsevanos, G. J. (Eds.). (2015). *Handbook of unmanned aerial vehicles (Vol. 1)*. Dordrecht: Springer Netherlands
 19. Xiongkui, H., Bonds, J., Herbst, A., & Langenakens, J. (2017). Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10(3), 18-30.
 20. Zhan, Y., Chen, P., Xu, W., Chen, S., Han, Y., Lan, Y., & Wang, G. (2022). Influence of the downwash airflow distribution characteristics of a plant protection UAV on spray deposit distribution. *Biosystems Engineering*, 216, 32-45.
 21. Zhou, L. P., & He, Y. (2016). Simulation and optimization of multi spray factors in UAV. In 2016 ASABE Annual International Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.