



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

Παραδοτέο Π.5.1.1:

Βέλτιστη ρύθμιση ψεκαστικών μηχανημάτων για ψεκασμό ακριβείας

Πληροφορίες για το έγγραφο

Αριθμός παραδοτέου: **Π5.1.1**

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: ΤΑΕΔΡ-0535675

Ακρωνύμιο έργου: InnoPP

Ημερομηνία έναρξης: 15 Μαΐου 2023

Διάρκεια: 28 Μήνες

Συντονιστής Φορέας: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών

Συντονιστής/ Επιστημονικός Υπεύθυνος: Ιωάννης Βόντας

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη Του Έργου.....	3
1 Εισαγωγή Και Στοιχοι	4
2 Περιγραφή Των Εργασιων.....	8
2.1 ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	8
ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ.....	13
3 Αποτελεσματα	16
ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	16
ΔΟΚΙΜΕΣ ΠΕΔΙΟΥ.....	26
4 Συνοψη Και Συμπερασματα.....	31
5 Παραρτημα Ι.....	33

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 αλληλούχησης 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 Π5.1.1

Το παραδοτέο παρουσιάζει τόσο κάποια στάδια ανάπτυξης, όσο και πειραματικά αποτελέσματα και δεδομένα δοκιμών πεδίου, από δυο (2) τεχνολογίες διαφοροποιημένης εφαρμογής φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Συγκεκριμένα, το παραδοτέο αφορά το βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων (ρυθμίσεων) για ένα αυτόνομο και επίγειο ψεκαστικό μη επανδρωμένο όχημα (Unmanned Ground Vehicle – UGV, κοινώς ψεκαστικό ρομπότ) το οποίο φέρει μια ηλεκτροστατική διάταξη ψεκασμού, όσο και ένα σύστημα νεφελοψεκαστήρα διαφοροποιημένης δόσης με χρήση υπερηχητικών αισθητήρων.

1 Εισαγωγή και Στόχοι

Εφαρμογές Ψεκασμού Διαφοροποιημένης Δόσης

Οι υπερηχητικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως για μετρήσεις απόστασης σε εξωτερικά περιβάλλοντα, παρέχοντας αξιόπιστες και ακριβείς εκτιμήσεις. Όπως αναφέρεται από τον Salas et al. (2025), οι αισθητήρες αυτοί λειτουργούν μέσω εκπομπής υπερηχητικών κυμάτων και καταγραφής της αντανάκλασής τους από αντικείμενα, επιτρέποντας την ακριβή μέτρηση αποστάσεων. Παρά την αξιοπιστία τους, η ακρίβεια των μετρήσεων μπορεί να επηρεαστεί από περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως θερμοκρασία και υγρασία, καθώς και από χαρακτηριστικά της επιφάνειας στόχου και τον προσανατολισμό της. Για τη διασφάλιση υψηλής ακρίβειας σε εξωτερικές συνθήκες, συνιστάται η τακτική βαθμονόμηση και η προσαρμογή των αισθητήρων στις επικρατούσες περιβαλλοντικές συνθήκες (Salas et al., 2025).

Η συνδυαστική χρήση υπερηχητικών αισθητήρων και GPS έχει μελετηθεί εκτενώς για εφαρμογές μεταβλητής δόσης ψεκασμού (Variable Rate Application - VRA). Σύμφωνα με τον Araújo et al. (2021), οι υπερηχητικοί αισθητήρες παρέχουν ακριβή μέτρηση της απόστασης για τον προσδιορισμό των διαστάσεων και της πυκνότητας της βλάστησης, ενώ η ενσωμάτωση GPS επιτρέπει τη γεωαναφορά των δεδομένων και την προσαρμογή της ταχύτητας και της δόσης ψεκασμού σε πραγματικό χρόνο. Όπως σημειώνεται από τον Salas et al. (2025), η καταγραφή χαρακτηριστικών της κόμης, όπως το πλάτος και η πυκνότητα, δίνει τη δυνατότητα δυναμικής ρύθμισης της δόσης, μεγιστοποιώντας την αποδοτικότητα του ψεκασμού.

Στο πλαίσιο ενός Ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου (OPTIMA-H2020), η εφαρμογή συστημάτων VRA κατέγραψε εξοικονόμηση φυτοπροστατευτικών προϊόντων έως και 35%, διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερή κάλυψη ψεκασμού (Salas et al., 2025). Η παρατεταμένη έκθεση των αγροτών σε φυτοχημικά, ιδιαίτερα όταν δεν χρησιμοποιούνται κλειστές καμπίνες με συστήματα φιλτραρίσματος, σχετίζεται με σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία. Σύμφωνα με τον Tsakiris et al. (2023), η εισπνοή ή η επαφή με εκλυόμενα αερολύματα μπορεί να προκαλέσει οξείες και χρόνιες παθήσεις, όπως αναπνευστικές διαταραχές, δερματίτιδες, νευρολογικές βλάβες και αυξημένο κίνδυνο καρκίνου (Alarcón et al., 2023). Επιπλέον, η συσσώρευση χημικών στο περιβάλλον, όπως σε έδαφος και υπόγεια ύδατα, επηρεάζει αρνητικά τη βιοποικιλότητα και την ασφάλεια τροφίμων (Félix Da Graça Silva, 2022).

Η εφαρμογή συστημάτων VRA, με στόχο τη μείωση τόσο του συνολικού όγκου των χημικών όσο και της εκπομπής νεφών, προσφέρει πολλαπλά οφέλη. Πρώτον, περιορίζει την άμεση έκθεση των αγροτών σε τοξικές ουσίες, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ανοιχτού ψεκασμού χωρίς προστατευτική καμπίνα. Η τεχνολογία μεταβλητής δόσης διασφαλίζει ότι η εφαρμογή γίνεται μόνο στις απαραίτητες ζώνες, μειώνοντας την υπερβολική δημιουργία διάχυτων αερολυμάτων, τα οποία αποτελούν κύρια πηγή έκθεσης (Wei et al., 2022). Δεύτερον, η ακριβής εφαρμογή των φυτοφαρμάκων συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος, περιορίζοντας τις εκροές σε υδάτινους πόρους και τη συσσώρευση τοξικών υπολειμμάτων στο έδαφος, διατηρώντας τη βιοποικιλότητα και την ασφάλεια των αγρο-συστημάτων.

Η αξιοποίηση υπερηχητικών αισθητήρων σε συνδυασμό με κατάλληλους αλγόριθμους

ελέγχου έχει επίσης δείξει βελτίωση στην απόδοση του ψεκασμού. Σύμφωνα με τον Salas et al. (2025), η δυναμική καταγραφή του πλάτους και της πυκνότητας της κόμης, σε συνδυασμό με μοντέλα ροής μεταβλητής δόσης, οδηγεί σε πιο ομοιόμορφη κατανομή του ψεκαστικού διαλύματος και σημαντική μείωση απωλειών στο έδαφος, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των εφαρμογών φυτοπροστασίας.

Ρομποτικό Σύστημα με Ηλεκτροστατική Διάταξη

Τα ακροφύσια είναι τα στοιχεία από όπου εξέρχεται το ψεκαστικό διάλυμα και διανέμεται στα φυτά. Έχουν μικρού μεγέθους οπές εξόδου, για να εμποδίζουν την ελεύθερη ροή του υγρού, να αυξάνουν την πίεση του και να γίνεται η διάσπαση σε σταγόνες, διαδικασία που ονομάζεται νεφελοποίηση. Ο ρόλος τους είναι τριπλός. Να ρυθμίζουν την παροχή, να επιτυγχάνουν τη διάσπαση του υγρού σε σταγονίδια και να καθορίζουν τον τρόπο με τον οποίο τα σταγονίδια θα διασπαρθούν στην επιφάνεια ψεκασμού (μορφή του σχήματος του υγρού κατά την έξοδο από το ακροφύσιο). Η μορφή που παίρνει το υγρό κατά την έξοδο του από το ακροφύσιο, καθορίζεται από τον τύπο του ακροφυσίου και τη γωνία ψεκασμού. Το σχήμα του στομίου στα ακροφύσια μέσης και υψηλής πίεσης είναι κυκλικό αλλά ο εσωτερικός χώρος των ακροφυσίων έχει ελικώσεις, έτσι ώστε το υγρό που εξέρχεται να αποκτά περιστροφική κίνηση, που διευκολύνει σημαντικά το σχηματισμό των σταγονιδίων. Η ταχύτητα της περιστροφικής αυτής κίνησης είναι συνάρτηση του μεγέθους της πίεσης (Γαβριηλίδης, 1969). Η αύξηση της πίεσης μειώνει το μέγεθος των σταγόνων και η μείωση προκαλεί το αντίθετο.

Ο ηλεκτροστατικός ψεκασμός εφευρέθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1930 με σκοπό να βελτιώσει την εναπόθεση του ψεκασμού στην κόμη των φυτών. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο φορτίζει τα σωματίδια του ψεκαστικού υγρού καθώς αυτά εξέρχονται από το ακροφύσιο του ψεκαστικού μηχανήματος. Σε αντίθεση με τα συμβατικά σταγονίδια ψεκασμού, στον ηλεκτροστατικό ψεκασμό εκπέμπονται σταγονίδια λαμβάνοντας θετικό ή αρνητικό φορτίο από ηλεκτρόδια που βρίσκονται στο εσωτερικό του κάθε ακροφυσίου ή εξωτερικά αυτού σε κοντινή απόσταση από την έξοδο του. Τα φορτισμένα σωματίδια έλκονται από την επιφάνεια των φυτών, με αποτέλεσμα να προσκολλώνται σε αυτά και να αυξάνουν έτσι την αποτελεσματικότητα του ψεκασμού, ακόμα και σε περιοχές που είναι δύσκολο να επιτευχθεί κάλυψη με συμβατικό ψεκασμό (π.χ. στα εσωτερικά μέρη του φυλλώματος ή στην υποκείμενη επιφάνεια των φύλλων). Παράλληλα, ο ηλεκτροστατικός ψεκασμός θεωρείται πως μειώνει τη διάμετρο των σταγονιδίων και ταυτόχρονα αυξάνει την ομαλή κίνηση και εναπόθεσή τους πάνω στο στόχο (He et al., 2016).

Υπάρχουν τρεις (3) διαδεδομένοι τρόποι φόρτισης των σταγονιδίων:

- **Επαγωγική:** Τα σταγονίδια φορτίζονται όταν περάσουν μέσα από ένα ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται από ηλεκτρικά φορτισμένο σώμα τοποθετημένο κοντά στο ακροφύσιο.
- **Ιονισμένου πεδίου:** Τα σταγονίδια φορτίζονται όταν προσκολλώνται επάνω τους τα ιόντα του αέρα, καθώς αυτά περνούν μέσα από ένα ιονισμένο πεδίο, το οποίο προκαλείται από ένα ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης.
- **Άμεση φόρτιση:** Τα σταγονίδια φορτίζονται μέσω άμεσης επαφής με ένα ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει την ακριβή και

ελεγχόμενη φόρτιση των σταγονιδίων (Urkan, 2016).

Η επαγωγική φόρτιση προσφέρει ασφάλεια και απλότητα, γιατί δεν απαιτεί άμεση επαφή με ηλεκτρόδιο, αλλά έχει μικρότερη αποτελεσματικότητα φόρτισης και είναι λιγότερο αποτελεσματική με διαλύματα μικρότερης αγωγιμότητας. Η φόρτιση ιονισμένου πεδίου είναι μια ευέλικτη τεχνική που μειώνει τις απαιτήσεις συντήρησης, ωστόσο η απόδοσή της μειώνεται ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που επικρατούν (π.χ. υψηλή υγρασία). Η άμεση φόρτιση θεωρείται πως παρέχει την πιο αποτελεσματική φόρτιση και βελτιώνει την εναπόθεση των σταγονιδίων, αλλά αυξάνει σημαντικά το κόστος κατασκευής και τη περιπλοκότητα του συστήματος, ενώ παράλληλα έχει περιορισμούς με μη αγωγή υγρά και αυξημένο κίνδυνο ηλεκτρικού ατυχήματος (τα περισσότερα ψεκαστικά διαλύματα είναι αγωγή).

Οι ηλεκτροστατικοί ψεκαστήρες δύνανται να προσφέρουν πολλαπλά οφέλη καθώς εξοικονομούν χρόνο, νερό και φυτοφάρμακα λόγω του μεγέθους των σταγονιδίων και της καλύτερης κάλυψης του φυτού σε σχέση με το εφαρμοζόμενο ψεκαστικό διάλυμα. Από την άλλη, το κόστος απόκτησης των ηλεκτροστατικών ψεκαστήρων είναι υψηλό, αφού περιλαμβάνει ειδικό εξοπλισμό και η αποτελεσματικότητα του ψεκασμού εξαρτάται από τις συνθήκες ψεκασμού και την ίδια την καλλιέργεια. Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτητα του ελκυστήρα, η τάση του ηλεκτροστατικού ψεκαστικού, το μέγεθος, το σχήμα και η πυκνότητα των φυτών αλλά και οι καιρικές συνθήκες, είναι οι βασικότεροι παράγοντες που επηρεάζουν τον ψεκασμό. Επίσης, υπάρχουν και ζητήματα ασφάλειας όπου ο εξοπλισμός πρέπει να είναι κατάλληλα ρυθμισμένος και συντηρημένος, για να μην συμβεί κάποιο ατύχημα. Σε κάθε περίπτωση όμως, όπως γίνεται και στις συμβατικές πρακτικές ψεκασμού, πρέπει να γίνεται βαθμονόμηση του ψεκαστήρα με ακρίβεια και οι χειριστές να έχουν ορισμένες γνώσεις πάνω σε αυτό το είδος ψεκασμού.

Πολλές μελέτες έχουν γίνει για τον ηλεκτροστατικό ψεκασμό εδώ και πολλά χρόνια με ποικίλα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, μία από τις πρώτες προσπάθειες ήταν των Wampler et al., (1939), οι οποίοι δοκίμασαν τάσεις $\pm 150V$ DC απευθείας στα ακροφύσια, χωρίς καμία επίδραση στην εναπόθεση του ψεκαστικού στο στόχο. Θεωρητικές και πειραματικές αναλύσεις που έγιναν από τους Bowen et al., (1964) προσδιόρισαν πολύ σημαντικές επιπτώσεις των φορτισμένων σωματιδίων κατά την εναπόθεση σκόνης φυτοφαρμάκων. Οι Law et al., (1966), ανέπτυξαν μια μέθοδο φόρτισης πληρώντας και απαιτήσεις μηχανικού σχεδιασμού για ανθεκτικότητα, απλότητα, αξιοπιστία, εξοικονόμηση ενέργειας και ασφάλεια για εργασία στο χωράφι με τάση 3-8 kV.

Οι Giles et al., (1991) χρησιμοποίησαν ένα ηλεκτροστατικό ψεκαστικό μειωμένου όγκου και βρήκαν σημαντική αύξηση στην αρχική εναπόθεση και στο χρόνο διάσπασης των υπολειμμάτων μυκητοκτόνου, συγκριτικά με τις συμβατικές πρακτικές. Οι Patel et al., (2015) σχεδίασαν ένα ηλεκτροστατικό ακροφύσιο του οποίου η λειτουργία είναι υποβοηθούμενη με αέρα, βασισμένο στον επαγωγικό ψεκασμό. Το συγκεκριμένο ακροφύσιο είναι χαμηλού βάρους, υψηλής απόδοσης, συνεισφέρει στη μείωση των εντομοκτόνων και των προβλημάτων υγείας στους ανθρώπους και παράλληλα είναι και φιλικό προς το περιβάλλον. Τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά, καθώς η εναπόθεση ενισχύθηκε 2-3 φορές με την ηλεκτροστατική εφαρμογή, υπό τις ίδιες συνθήκες κατά τη χρήση με συμβατικό ψεκασμό.

Οι Maynagh et al., (2009) ανέφεραν ότι μεταξύ των πλεονεκτημάτων του ηλεκτροστατικού ψεκασμού είναι η αύξηση της αποτελεσματικότητας, τόσο στην εναπόθεση του ψεκαστικού όσο και στη μείωση της διασποράς του. Οι Maski & Durairaj (2006) παρατήρησαν αύξηση της τάξης του 42% στον έλεγχο των αφίδων με τη χρήση ηλεκτροστατικού ψεκασμού σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο. Οι Xiongkui et al., (2011) ανέφεραν αύξηση στο στόχο εναπόθεσης έως και 50% σε σύγκριση με το συμβατικό σύστημα ψεκασμού. Τέλος, οι Laryea & No (2005) βρήκαν αύξηση έως και 2,5 φορές στην εναπόθεση χρησιμοποιώντας τον ηλεκτροστατικό ψεκασμό σε σύγκριση με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με τη χρήση του συμβατικού συστήματος.

Ο σκοπός του παρόντος εγγράφου είναι η παρουσίαση των διαδικασιών ανάπτυξης και των αποτελεσμάτων πεδίου που προέκυψαν από τη μελέτη δύο τεχνολογιών διαφοροποιημένης εφαρμογής φυτοπροστατευτικών προϊόντων. Το έγγραφο εστιάζει στον καθορισμό του βέλτιστου συνδυασμού παραμέτρων για ένα αυτόνομο επίγειο ψεκαστικό όχημα (Unmanned Ground Vehicle – UGV) εξοπλισμένο με ηλεκτροστατική διάταξη ψεκασμού, καθώς και για ένα σύστημα νεφελοψεκαστήρα με μεταβλητή δόση που χρησιμοποιεί υπερηχητικούς αισθητήρες.

2 Περιγραφή Των Εργασιών

2.1 Υλικά και Μέθοδοι

Σύστημα VRA

Το σύστημα μεταβλητής δόσης ψεκασμού βασίζεται σε έναν Raspberry Pi 4, πάνω στον οποίο έχουν εγκατασταθεί διάφορα modules και HATs για τον έλεγχο των λειτουργιών του ψεκαστικού. Συγκεκριμένα, ένα 3-relay HAT χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των ηλεκτροβάνων, επιτρέποντας στον αλγόριθμο να χειρίζεται το σύστημα σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να απαιτείται περαιτέρω παρέμβαση από τον αγρότη κατά την εκκίνηση με το κουμπί ενεργοποίησης.

Για τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τη βλάστηση, το σύστημα διαθέτει τέσσερις υπερηχητικούς αισθητήρες (Εικόνα 1), οι οποίοι είναι ανθεκτικοί σε καιρικές συνθήκες και διαβρωτικά περιβάλλοντα. Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε δύο ζεύγη, δύο αριστερά και δύο δεξιά του ψεκαστικού, στο ύψος που αντιστοιχεί στην κόμη ή στην περιοχή εφαρμογής του φυτοπροστατευτικού προϊόντος. Κάθε ζεύγος λειτουργεί ανεξάρτητα, ώστε να ενεργοποιείται μόνο η πλευρά των ακροφυσίων που απαιτείται, περιορίζοντας την αχρείαση χρήση χημικών.



Εικόνα 1. Οι αισθητήρες που έχουν ενσωματωθεί πάνω στο γεωργικό ελκυστήρα που μεταφέρει το νεφελοψεκαστήρα.

Οι υπερηχητικοί αισθητήρες παράγουν αναλογικά σήματα, τα οποία απαιτούν κατάλληλη επεξεργασία ώστε η ψηφιακή μονάδα του Raspberry Pi να τα διαχειριστεί.

Για αυτό χρησιμοποιείται ένα HAT που μειώνει την υψηλή τάση, ενώ το ολοκληρωμένο MCP3008 μετατρέπει τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά, επιτρέποντας την ακριβή επεξεργασία των δεδομένων. Τέλος, το σύστημα ενσωματώνει ένα εξωτερικό USB GPS module που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο NMEA, παρέχοντας δεδομένα ταχύτητας του παρελκόμενου, ώστε η εφαρμογή του ψεκασμού να παραμένει ακριβής ακόμα και σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ταχύτητας του τρακτέρ (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Ο νεφελοψεκαστήρας που έχει συνδεθεί με το έξυπνο σύστημα υπερήχων που αναπτύχθηκε.

Ρομποτικό Όχημα

Το ρομποτικό μη επανδρωμένο όχημα εδάφους (UGV) που χρησιμοποιήθηκε για την ενσωμάτωση του ψεκαστικού module και την εφαρμογή αυτόματου ψεκασμού με τεχνητή νοημοσύνη είναι ένα Husky A200 της εταιρείας Clearpath (παρουσιάζεται στην Εικόνα 5 της επόμενης θεματικής ενότητας). Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει αναβαθμιστεί τόσο σε υπολογιστική ισχύ, καθώς ενσωματώνει ένα ASUS Nuke 15 Pro με 32 GB RAM, όσο και σε επίπεδο αισθητήρων. Η διάταξη περιλαμβάνει έναν τρισδιάστατο Lidar VLP 16, μία IMU 9 DOF, ένα GPS Duro Inertial με ενσωματωμένο IMU, καθώς και wheel encoders, τα οποία είναι απαραίτητα για την επιτυχή αυτόματη πλοήγηση του UGV μέσα στο χωράφι.

Για τον σχεδιασμό μιας αυτόνομης διαδρομής και την αυτόματη πλοήγηση του ρομποτικού συστήματος εντός του χωραφιού χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος Theta Star

Planner, ο οποίος ενσωματώνεται στο πλαίσιο Nav2 του ROS2. Ο Theta Star Planner αποτελεί μια εξελιγμένη εκδοχή του γνωστού αλγορίθμου A*, προσφέροντας τη δυνατότητα εύρεσης πιο ευθύγραμμων και ομαλών διαδρομών σε σχέση με τον παραδοσιακό A*. Η κύρια καινοτομία του έγκειται στην ικανότητά του να επιτρέπει τη δημιουργία διαδρομών που ακολουθούν πιο φυσικά μονοπάτια, αποφεύγοντας τις απότομες στροφές. Στο περιβάλλον του Nav2, ο Theta Star Planner αξιοποιεί τα δεδομένα των αισθητήρων του ρομπότ για να υπολογίζει δυναμικά το βέλτιστο μονοπάτι σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τα εμπόδια που εντοπίζονται κατά την κίνηση. Με αυτόν τον τρόπο, το ρομποτικό σύστημα επιτυγχάνει μεγαλύτερη ευελιξία και ασφάλεια κατά την πλοήγηση μέσα στο χωράφι, καθώς μπορεί να προσαρμόζει τη διαδρομή του ανάλογα με τις εκάστοτε περιβαλλοντικές συνθήκες.

Δοκιμές Ελεγχόμενων Συνθηκών

Το πειραματικό σχέδιο που εφαρμόστηκε αφορούσε την μελέτη της επίδρασης διαφορετικών παραμέτρων στα χαρακτηριστικά του ψεκασμού, προκειμένου να επιλεγούν τα βέλτιστα για το εκάστοτε μηχάνημα ψεκασμού ακριβείας. Οι δοκιμές έλαβαν χώρα σε ελεγχόμενες συνθήκες, απουσία εξωτερικών παρεμβάσεων από φαινόμενα όπως ο άνεμος, σε χώρους του εργαστηρίου Γεωργικής Μηχανολογίας του ΓΠΑ. Το σύστημα ψεκασμού και η ηλεκτροστατική διάταξη που το συνοδεύει αναπτύχθηκαν από την εταιρία Arcadia Terra, και τοποθετήθηκαν σε σταθεροποιημένο πάγκο εργασίας, ενώ μπροστά από την έξοδο του ακροφυσίου τοποθετήθηκε 1) ένας ενεργητικός αισθητήρας laser υψηλής ακρίβειας με σκοπό την αποτύπωση του προφίλ ψεκασμού της κάθε δοκιμής και 2) μια μεταλλική πλάκα συνδεδεμένη με ένα βολτόμετρο με σκοπό τη μέτρηση της μεταφοράς τάσης από τη στεφάνη προς το στόχο, μέσω των σταγονιδίων που φορτίζονται από αυτή κατά την έξοδό τους από την οπή του ακροφυσίου (Εικόνα 3).

Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν είχαν ως σκοπό τη μέτρηση της διαμέτρου των σταγονιδίων για τα ακροφύσια που εξετάστηκαν, ανά διαφορετικές τιμές πίεσης λειτουργίας, και με διαφορετικές τάσεις στην στεφάνη της ηλεκτρικής διάταξης. Συγκεκριμένα, οι παράμετροι που μελετήθηκαν παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 1).

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, όλες οι επαναλήψεις έλαβαν χώρα τέσσερις (4) διαδοχικές φορές, προς αποφυγή σφαλμάτων. Παράλληλα, σε συγκεκριμένες περιπτώσεις, υπήρξε η απαίτηση για μικρές παρεμβάσεις στο σύστημα, όπως η κάλυψη της βάσης της στεφάνης με μονωτική ταινία ώστε να μην δημιουργεί παρεμβολές στη μέτρηση της τάσης, και η αλλαγή της θέσης της στεφάνης στη βέλτιστη απόσταση από το ακροφύσιο, ώστε να μην έχουμε πρόσκρουση των σταγονιδίων πάνω στην επιφάνεια της στεφάνης (Εικόνα 3). Συγκεκριμένα, η βέλτιστη θέση της στεφάνης διαμέτρου που επιλέχθηκε ήταν 8 cm από την έξοδο του ακροφυσίου για ακροφύσια 80°, και αντίστοιχα 10 cm για ακροφύσια 60° και 40°.



Εικόνα 3. Οι παρεμβάσεις στο σύστημα: ο ορισμός της βέλτιστης απόστασης της στεφάνης από το ακροφύσιο (αριστερά) και η κάλυψη της βάσης της στεφάνης με μονωτική ταινία (δεξιά).



Εικόνα 4. Οι παρεμβάσεις στο σύστημα: ο ορισμός της βέλτιστης απόστασης της στεφάνης από το ακροφύσιο (αριστερά) και η κάλυψη της βάσης της στεφάνης με μονωτική ταινία (δεξιά).

Πίνακας 1. Το πειραματικό σχέδιο και οι παράμετροι που μελετήθηκαν στο πείραμα.

Παράμετρος	Δοκιμές	Έλεγχος Παραμέτρου
Πίεση Λειτουργίας	4 bar	Ρύθμιση Συστήματος
	10 bar	
	16 bar	
Ακροφύσιο	'ASJ 40 HCL'	Προσαρμογή στο Σύστημα
	'ASJ 80 HCC'	
	'ALBUZ 60 ATR'	
	'ALBUZ 80 ATR'	
Ηλεκτρική Τάση στη Στεφάνη	Συμβατικό (OFF / 0 Volt)	Ρύθμιση Συστήματος (+ μέτρηση για επαλήθευση)
	(-) 2,000 Volt	
	(-) 4,000 Volt	
	(-) 6,000 Volt	
	(-) 8,000 Volt	
Διάμετρος Σταγονιδίων	Μέτρηση	
Τάση στο Στόχο	Μέτρηση	

Δοκιμές Πεδίου

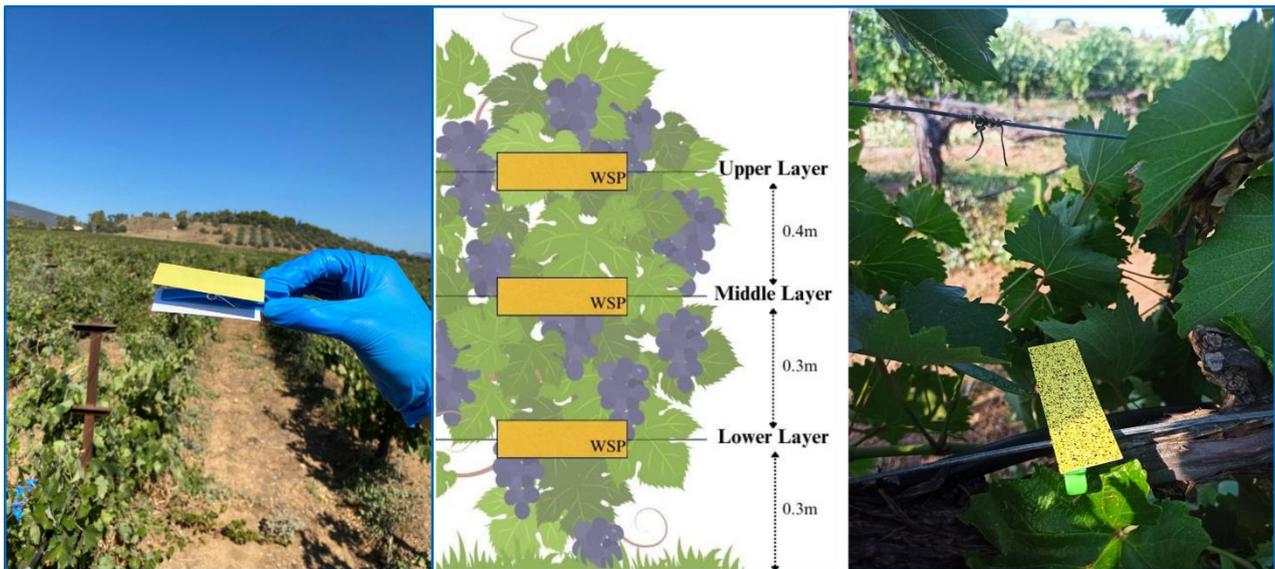
Μετά την ολοκλήρωση των εργαστηριακών δοκιμών, και σε συνδυασμό με τις εργασίες υπό το Παραδοτέο 5.2.1 της Ενότητας Εργασία 5 του έργου, το ηλεκτροστατικό σύστημα ενσωματώθηκε σε μια τηλεχειριζόμενη ρομποτική πλατφόρμα. Ο στόχος αυτής της διαδικασίας ήταν η πραγματοποίηση αρχικών δοκιμών σε πραγματικές συνθήκες πεδίου (Εικόνα 5). Αυτές οι δοκιμές διεξήχθησαν τόσο με την ηλεκτροστατική διάταξη ενεργοποιημένη (επιλέχθηκε 6,000 Volt) όσο και χωρίς αυτήν, στα 10 bar πίεση αντλίας, προκειμένου να γίνει μια αρχική σύγκριση της επίδοσης του συστήματος. Κατά την εφαρμογή αυτή χρησιμοποιήθηκε ένα εντομοκτόνο (Lamda-Cyhalothrin - Εμπορικό σκεύασμα: Karate Zeon 10 CS) και ένα μυκητοκτόνο (Metalaxyl - Εμπορικό σκεύασμα: Metix 25 WP) ακολουθώντας το πρόγραμμα φυτοπροστασίας του πειραματικού αμπελώνα του ΓΠΑ. Η ανάλυση της αποτελεσματικότητας της διάταξης σε πραγματικές συνθήκες πεδίου παρείχε πολύτιμα δεδομένα για τη λειτουργία του ηλεκτροστατικού συστήματος, συμβάλλοντας στην κατανόηση των χαρακτηριστικών του και των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόδοσή των ηλεκτροστατικών εφαρμογών.

Παράλληλα, επιτράπηκε ο εντοπισμός τυχόν προβλημάτων ή περιορισμών που προέκυψαν κατά τη λειτουργία της σε εξωτερικό περιβάλλον / συνθήκες αγρού, ενώ εξετάστηκε η γενική λειτουργικότητα του συστήματος, προκειμένου να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα σε μελλοντικές εφαρμογές. Η ηλεκτροστατική διάταξη τοποθετήθηκε στο μεσαίο ακροφύσιο, και για το λόγο αυτό στη σχετική ενότητα των Αποτελεσμάτων αυτό το ύψος φυλλώματος εξετάζεται και μεμονωμένο.



Εικόνα 5. Η ρομποτική πλατφόρμα κατά της δοκιμές πεδίου.

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του ηλεκτροστατικού συστήματος, χρησιμοποιήθηκαν υδατοευαίσθητα χαρτιά (Water Sensitive Papers - WSP) διαστάσεων 76 x 26 mm. Συγκεκριμένα, τοποθετήθηκαν WSPs σε τρία (3) διαφορετικά επίπεδα φυλλώματος (0.3, 0.6 και 1 m από το έδαφος) σταθεροποιημένα πάνω στα στηρίγματα των πρέμνων, και με φορά προς τα πάνω και προς τα κάτω, ώστε να προσομοιάζουν την φυλλική επιφάνεια (Εικόνα 6). Κάθε επανάληψη πραγματοποιήθηκε για τρεις (3) επαναλήψεις (τοποθεσίες), με κάθε τοποθεσία να μελετά την επικάλυψη σε τρεις (3) διαδοχικές σειρές πρέμνων (Εικόνα 7).



Εικόνα 6. Τα δείγματα WSP που τοποθετήθηκαν εντός των πρέμων.

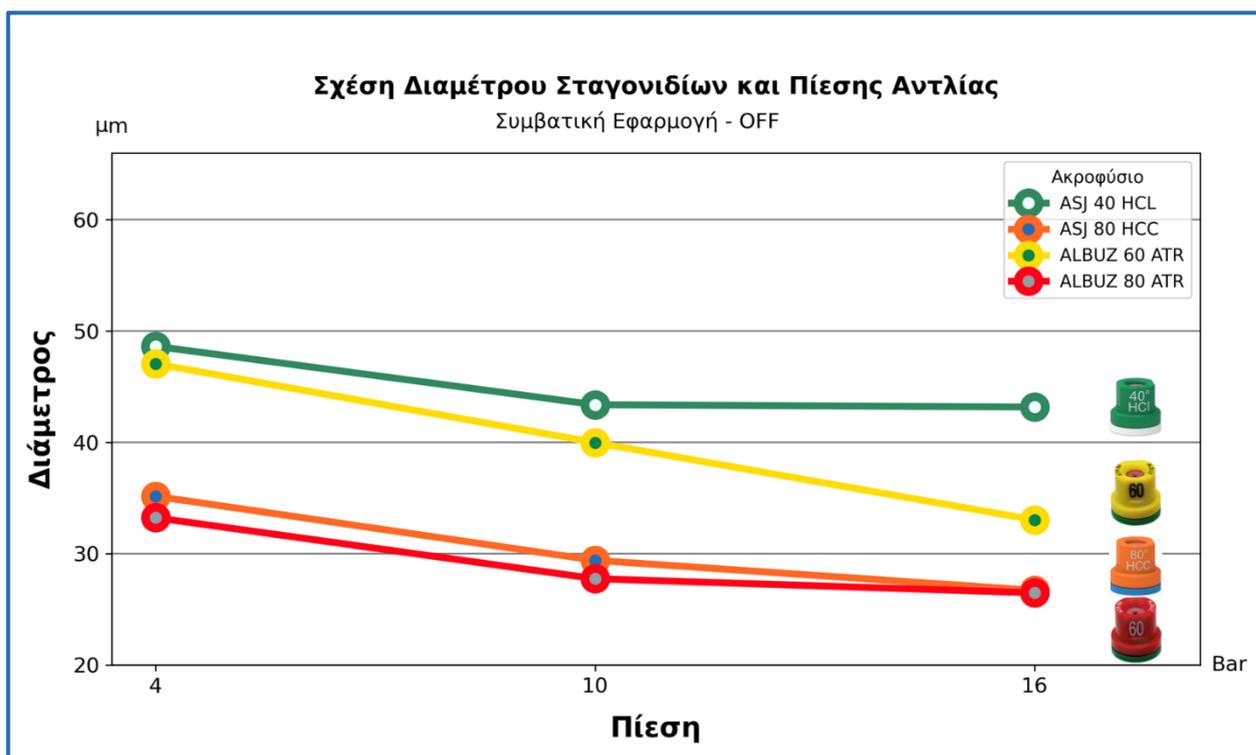


Εικόνα 7. Οι θέσεις των WSP κατά τις δοκιμές πεδίου στον αμπελώνα του ΓΠΑ στα Σπάτα.

3 Αποτελέσματα

Δοκιμές Ελεγχόμενων Συνθηκών

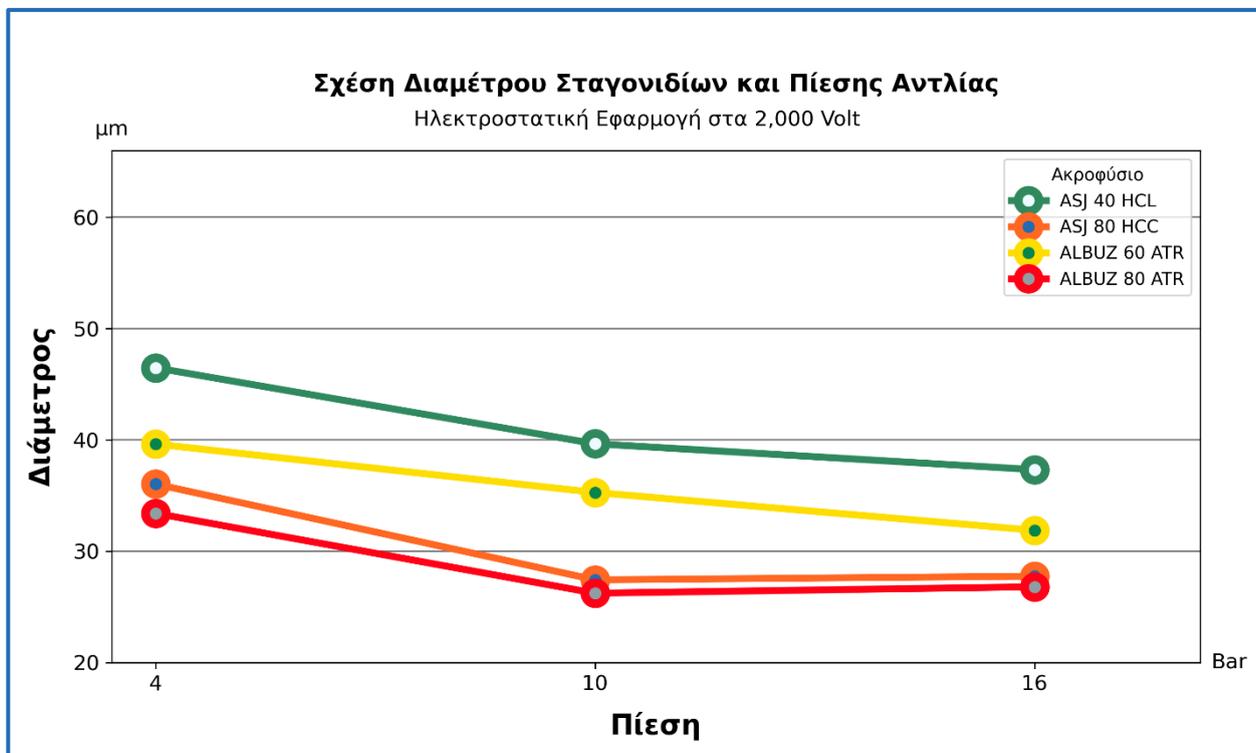
Στη παρούσα ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα συσχέτισης των παραμέτρων που αναλύθηκαν. Σύμφωνα με το πρώτο διάγραμμα πίεσης – διαμέτρου σταγονιδίων στη συμβατική εφαρμογή με μηδενική τάση, παρατηρούμε για κάθε ακροφύσιο την αντίστροφη αναλογία μεταξύ πίεσης και διαμέτρου των σταγονιδίων καθώς η αυξημένη πίεση ροής προκαλεί διαχωρισμό των σταγονιδίων ψεκασμού σε μικρότερα τμήματα. Η μεγαλύτερη μεταβολή της διαμέτρου παρατηρείται στη διαφορά πίεσης μεταξύ 4 bar και 10 bar ενώ μεταξύ 10 και 16 bar πίεσης η μεταβολή διαμέτρου είναι μικρότερη. Εξάιρεση αποτελεί το ακροφύσιο ALBUZ 60 ATR στο οποίο παρατηρείται αντίστοιχη μεταβολή διαμέτρου και στις δύο περιπτώσεις (4 - 10 και 10 - 16), ενώ στα υπόλοιπα 3 ακροφύσια η διάμετρος από 10 σε 16 bar παρουσιάζει μικρότερη μείωση. Επιπλέον επαληθεύεται ότι τα ακροφύσια μικρότερης γωνίας ψεκασμού (ASJ 40 HCL και ALBUZ 60 ATR) παρέχουν σταγονίδια μεγαλύτερης διαμέτρου σε σύγκριση με τα ακροφύσια μεγαλύτερης γωνίας ψεκασμού (ASJ 80 HCC και ALBUZ 80 ATR) (Εικόνα 8).



Εικόνα 8. Η μεταβολή της διαμέτρου ανά τις διαφορετικές πιέσεις και ανά ακροφύσιο σε συμβατική εφαρμογή.

Στην πρώτη ηλεκτροστατική εφαρμογή ψεκασμού ρυθμισμένη στα 2,000 Volt, παρατηρούμε μια γενική μείωση διαμέτρου για τα ακροφύσια ASJ 40 HCL και ALBUZ 60 ATR που χρησιμοποιήθηκαν και για τις 3 πιέσεις που αναλύθηκαν. Αντιθέτως, από το ψεκασμό από τη χρήση του ALBUZ 80 ATR δεν παρατηρείται αισθητή διαφορά στη διάμετρο σταγονιδίων με εξαίρεση τη διάμετρο που μετρήθηκε στα 10 bar η οποία είναι μικρότερη σε σύγκριση της μέτρησης των ίδιων παραμέτρων για την συμβατική

εφαρμογή. Τέλος, για το ακροφύσιο ASJ 80 HCC παρατηρείται αυξημένη διάμετρο στις πιέσεις των 4 και 16 bar ενώ στα 10 bar η διάμετρος είναι μικρότερη (Εικόνα 9 & Πίνακας 2).



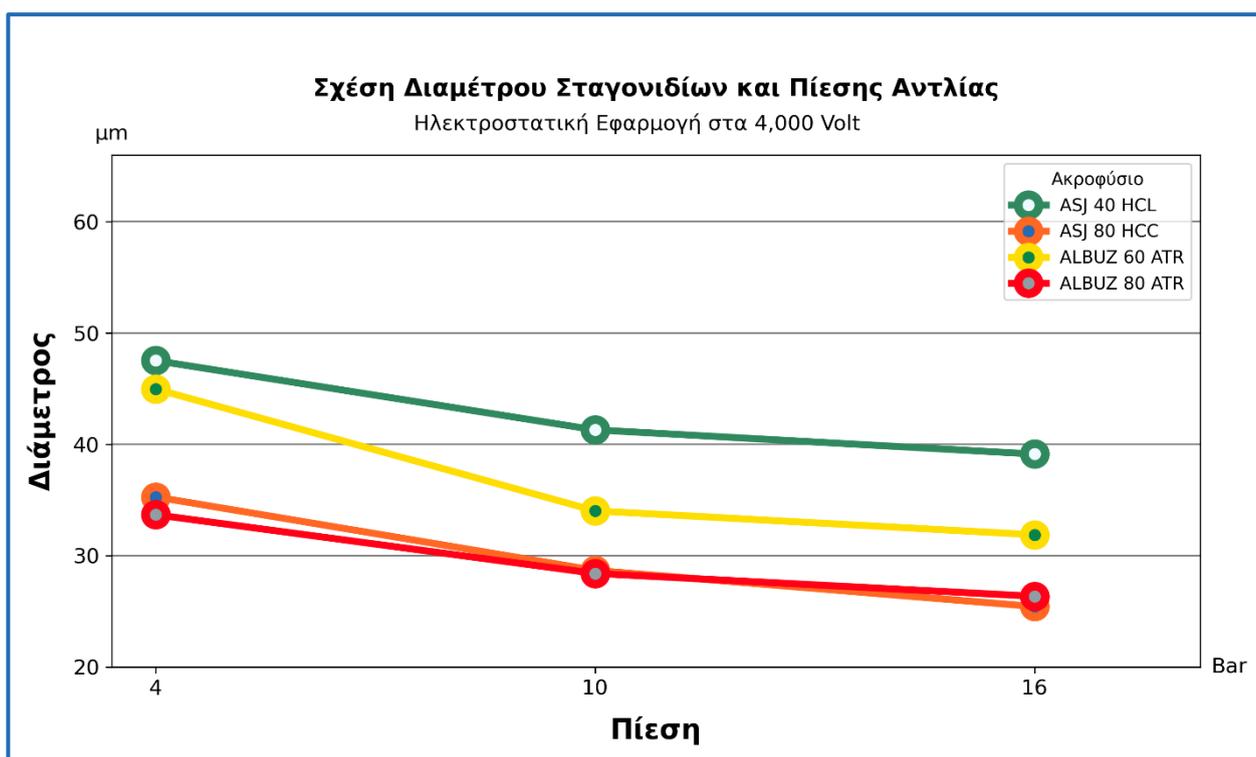
Εικόνα 9. Η μεταβολή της διαμέτρου ανά τις διαφορετικές πιέσεις και ανά ακροφύσιο σε τάση 2,000 Volt.

Πίνακας 2. Τα κυριότερα ευρήματα από τις εργαστηριακές δοκιμές σχετικά με τη διάμετρο σταγονιδίων στα 2,000 Volt.

Σύνοψη αποτελεσμάτων Δοκιμής 2,000 V – Διαφορές με Συμβατικό	
ASJ 40 HCL	Μείωση διαμέτρου σε όλες τις πιέσεις
ALBUZ 60 ATR	Έντονη μείωση διαμέτρου στα 4 bar, μικρότερη μείωση στα 10 και 16 bar
ALBUZ 80 ATR & ASJ 80 HCC	Μικρή μείωση διαμέτρου, μόνο στα 10 bar

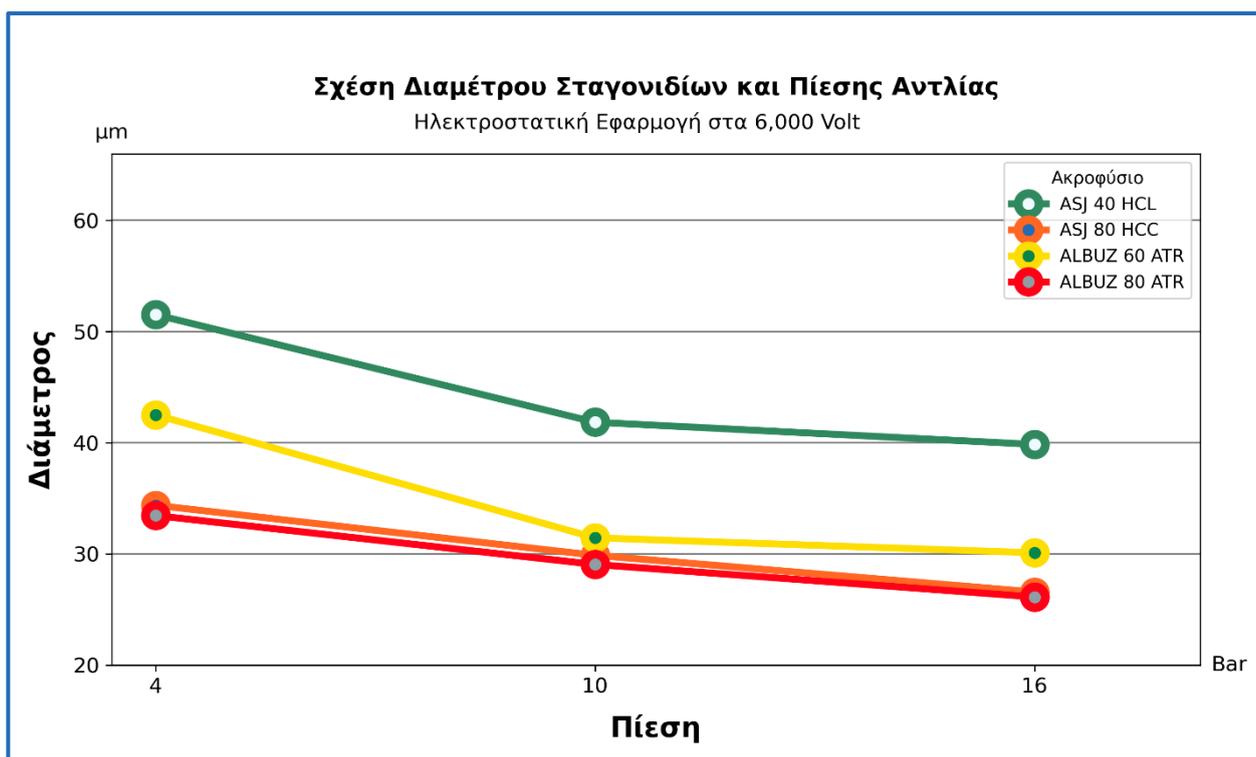
Στο επόμενο στάδιο, έπειτα από τη ρύθμιση της ηλεκτροστατικής τάσης στα 4,000 Volt, τα αποτελέσματα μας έδειξαν τη διάμετρο των σταγονιδίων για το ακροφύσιο ASJ 40 HCL να είναι ελαφρά μεγαλύτερη σε σύγκριση με τη διάμετρο του ακροφυσίου στην ηλεκτροστατική εφαρμογή των 2,000 Volt ενώ παραμένει μικρότερη σε σύγκριση με τη συμβατική εφαρμογή και στις 3 τιμές πίεσης ψεκασμού. Όσον αφορά το ακροφύσιο ALBUZ 60 ATR έπειτα τη μεταβολή της τάσης στα 4,000 Volt παρατηρείται μεγαλύτερη διάμετρος στα 4 bar σε σύγκριση με την εφαρμογή στα 2,000 Volt ενώ η διάμετρος στα

10 bar είναι αισθητά μικρότερη συγκριτικά με τη διάμετρο του ίδιου ακροφυσίου στα 4 bar καθώς και τη διάμετρο στην ίδια τιμή πίεσης στις προηγούμενες δύο εφαρμογές ενώ στα 16 bar παρατηρείται μη μεταβολή της διαμέτρου. Στο ακροφύσιο ASJ 80 HCC παρατηρείται μια αντίθετη μεταβολή της διαμέτρου στα 4,000 Volt σε σχέση με τη μεταβολή από τη συμβατική εφαρμογή στην εφαρμογή στα 2,000 Volt. Συγκεκριμένα έχουμε μικρότερη διάμετρο στα 4 και 16 bar και μεγαλύτερη διάμετρο στα 10 bar. Τέλος, για το ακροφύσιο ALBUZ 80 ATR εντοπίζεται μεγαλύτερη διάμετρο για τις πιέσεις αντλίας 4 και 10 bar και μικρότερη για τα 16 bar (Εικόνα 10).



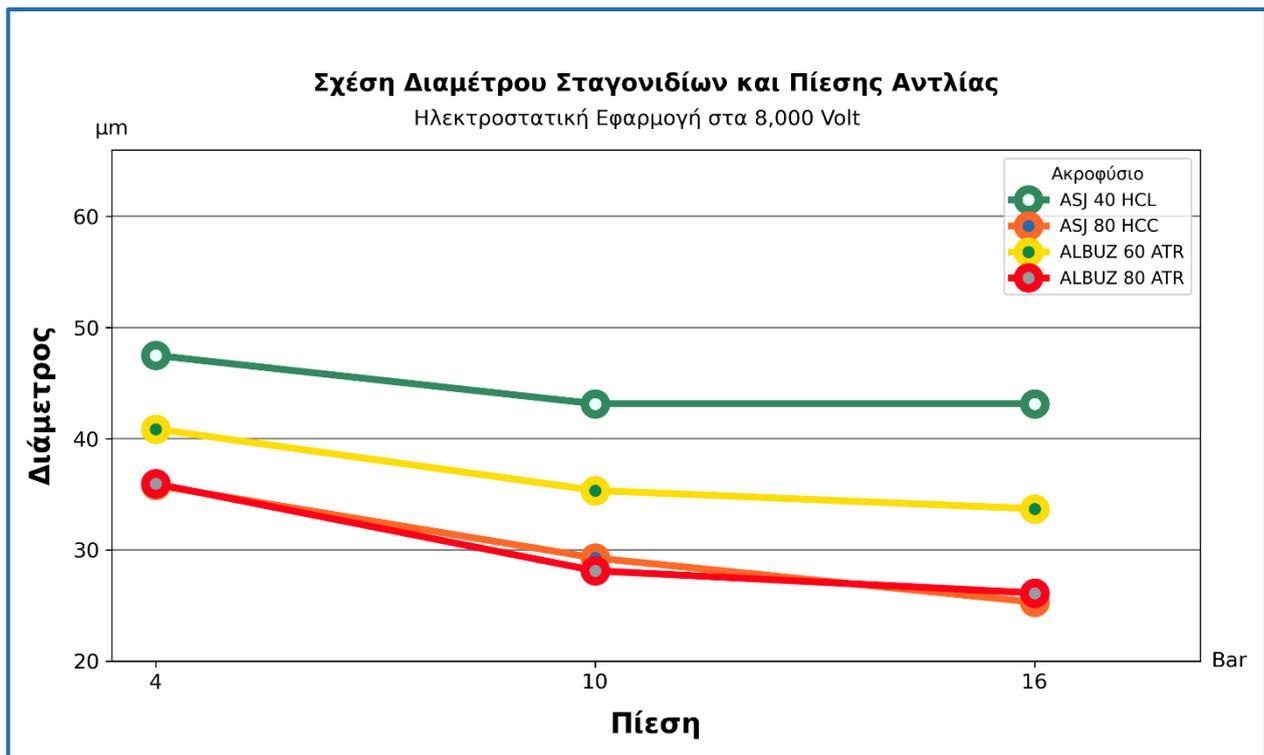
Εικόνα 10. Η μεταβολή της διαμέτρου ανά τις διαφορετικές πιέσεις και ανά ακροφύσιο σε τάση 4,000 Volt.

Στην εφαρμογή στα 6,000 Volt, διακρίνουμε μοτίβο μεταβολής διαμέτρου σταγονιδίων του ακροφυσίου ASJ 40 HCL σε μεγαλύτερες τιμές από τα 4,000 Volt στα 6,000 Volt για κάθε τιμή πίεσεως, κυρίως παρουσιάζεται μεταβολή στα 4 bar όπου η διάμετρος ξεπερνάει τα 50 μm παρόμοια όπως παρατηρήθηκε και στη ρύθμιση τάσης από 2,000 Volt στα 4,000 Volt. Αντιθέτως, για το ακροφύσιο ALBUZ 60 ATR η διάμετρος μεταβλήθηκε αισθητά σε μικρότερες τιμές και για τις 3 πιέσεις αντλίας εξίσου. Επιπροσθέτως παρατηρούμε μια ταύτιση μεταξύ των ευθειών για τα ακροφύσια ASJ 80 HCC και ALBUZ 80 ATR με μη επαρκείς μεταβολές στη διάμετρο, έπειτα από τη ρύθμιση από 4,000 στα 6,000 Volt (Εικόνα 11).



Εικόνα 11. Η μεταβολή της διαμέτρου ανά τις διαφορετικές πιέσεις και ανά ακροφύσιο σε τάση 6,000 Volt.

Στο διάγραμμα ηλεκτροστατικής εφαρμογής στα 8.000 Volt έχουμε μείωση της αυξημένης διαμέτρου στα 4 bar για το ακροφύσιο ASJ 40 HCL σε αντίθεση με τη διάμετρο των άλλων δύο μετρούμενων πιέσεων όπου παρατηρείται αύξηση. Για το ακροφύσιο ALBUZ 60 ATR παρομοίως εντοπίζουμε αύξηση στα 4 bar και μείωση στα 10 και 16 bar. Αντιθέτως, στα ακροφύσια των 80° παρατηρούμε αύξηση τη διαμέτρου στα 4 bar σε σύγκριση με τις διαμέτρους των υπόλοιπων ακροφυσίων (Εικόνα 12). Τέλος, μια σύνοψη όλων των αποτελεσμάτων των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακές συνθήκες σχετικά με τη διάμετρο σταγονιδίων παρουσιάζεται στο Πίνακα 3. Παρατηρείται πως η μεγαλύτερη μείωση σε σχέση με την αντίστοιχη συμβατική εφαρμογή εμφανίζεται στα σταγονίδια του ακροφυσίου ASJ 40°, το οποίο ωστόσο παράγει εκ φύσεως τα σταγονίδια με τη μεγαλύτερη διάμετρο. Επομένως, αν και αυτού του είδους τα ακροφύσια δίνονται να “επωφεληθούν” περισσότερο από μια ηλεκτροστατική εφαρμογή, η επιθυμητή διάμετρος πρέπει να λαμβάνει υπόψη πρωταρχικά το είδος των ακροφυσίων, καθώς εκείνο συμβάλει περισσότερο στη μείωση της διαμέτρου σε σχέση με μια ηλεκτροστατική διάταξη. Ωστόσο, όπως θα παρατηρηθεί στην επόμενη ενότητα, τα μικρότερα σταγονίδια που δημιουργούνται από τα ακροφύσια των 80° μπορούν να φορτιστούν πιο εύκολα από την ηλεκτροστατική διάταξη.



Εικόνα 12. Η μεταβολή της διαμέτρου ανά τις διαφορετικές πιέσεις και ανά ακροφύσιο σε τάση 8,000 Volt.

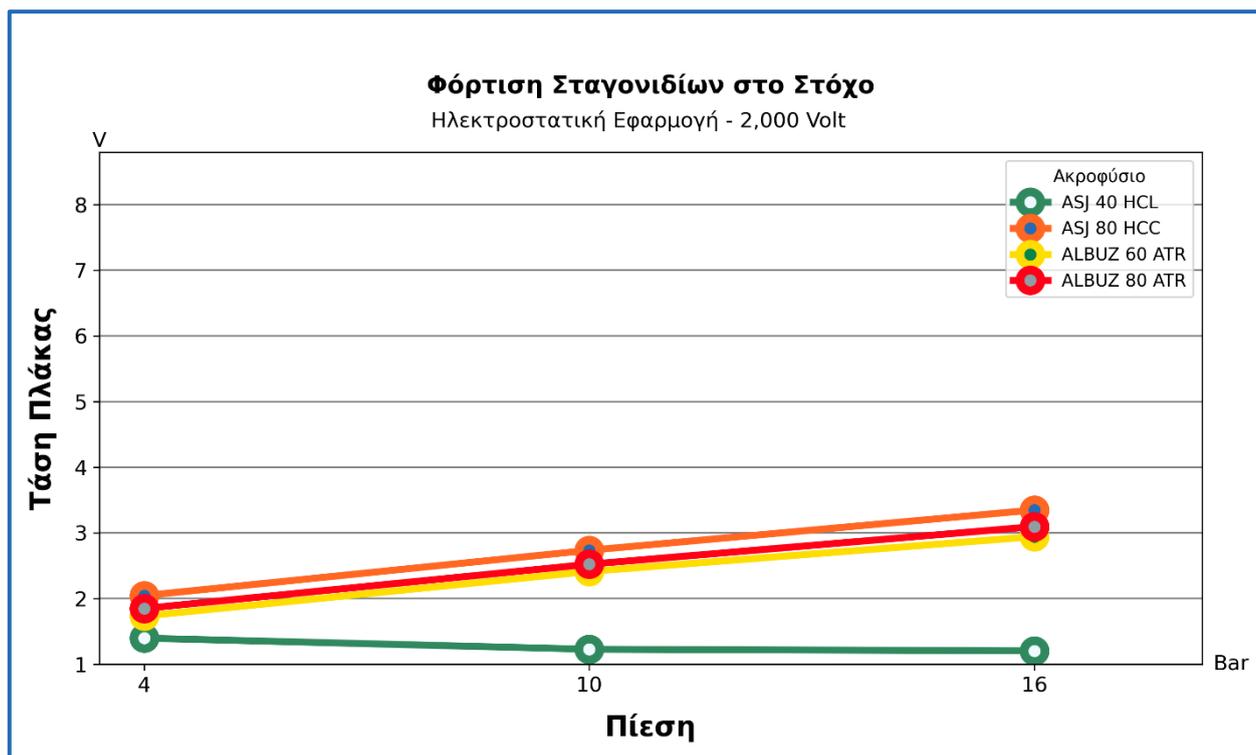
Πίνακας 3. Η μεταβολή της διαμέτρου σταγονιδίων ανά τις τάσεις πηγής και πιέσεις λειτουργίας, σε σχέση με την αντίστοιχη συμβατική εφαρμογή του κάθε ακροφυσίου.

Τάση	Πίεση	Διάμετρος σταγονιδίων			
		ASJ 40 HCL	ALBUZ 60 ATR	ASJ 80 HCC	ALBUZ 80 ATR
0 Volt	4 Bar				
	10 Bar				
	16 Bar				
2,000 Volt	4 Bar				
	10 Bar				
	16 Bar				
4,000 Volt	4 Bar				
	10 Bar				
	16 Bar				
6,000 Volt	4 Bar				
	10 Bar				
	16 Bar				
8,000 Volt	4 Bar				
	10 Bar				
	16 Bar				

Υπόμνημα	
Μεταβολή Διαμέτρου	
	Μεγάλη Αύξηση
	Μικρή Αύξηση
	Συμβατικό
	Μικρή Μείωση
	Μεγάλη Μείωση

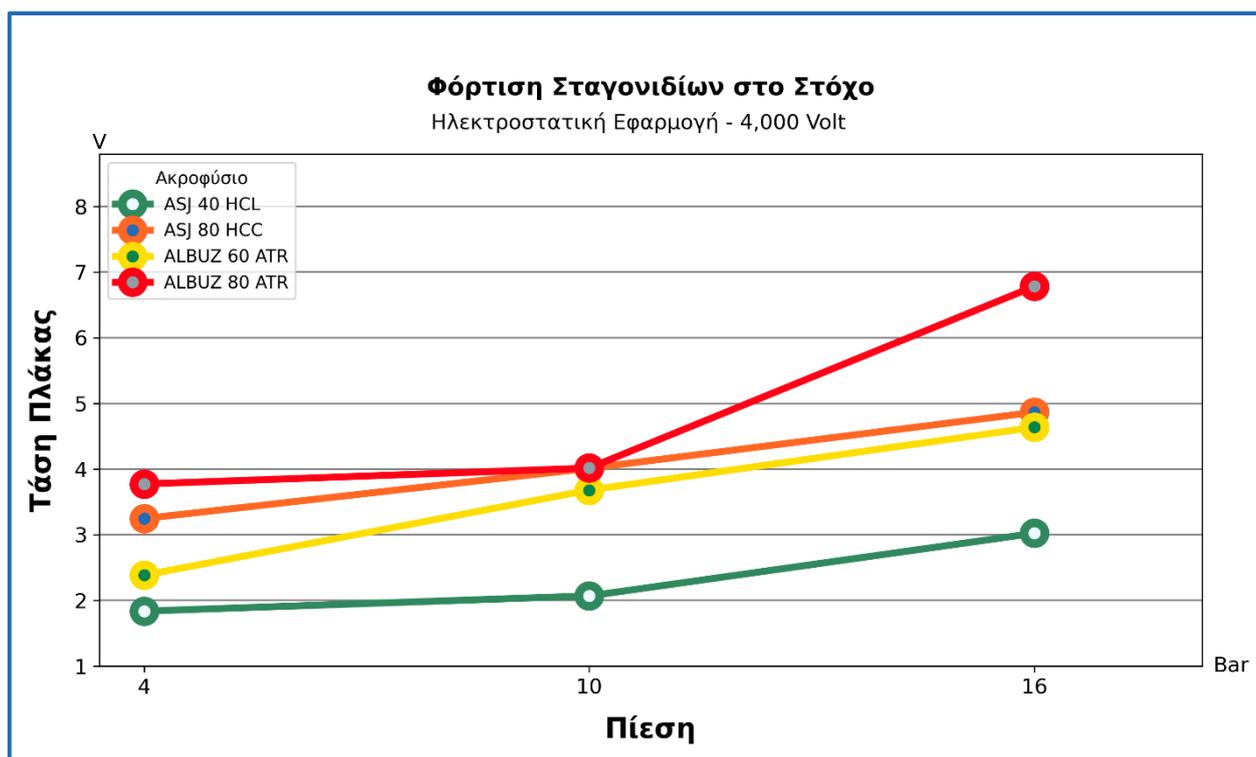
Το δεύτερο σκέλος του πειράματος υπό ελεγχόμενες συνθήκες αφορά μια σειρά δοκιμών για το προσδιορισμό του είδους ακροφυσίου με το οποίο επιτυγχάνεται υψηλότερη δυνατή τάση στο στόχο. Οι μετρήσεις υλοποιήθηκαν με μια μεταλλική πλάκα ως προσομοίωση της επιφάνειας που προσπαθούμε να φτάσουμε με τα φορτισμένα σταγονίδια (αντιπροσωπεύοντας το φύλλωμα της καλλιέργειας). Σε πρώτο στάδιο, πραγματοποιήθηκε ηλεκτροστατική εφαρμογή με τάση πηγής ρυθμισμένη στα 2,000

Volt και σύμφωνα με το παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 13), παρατηρούμε την υψηλότερη απόδοση έπειτα από το ψεκασμό με χρήση του ακροφυσίου ASJ 80 HCC και στις 3 πιέσεις αναφοράς, με τη μέγιστη να αναγράφεται στα 16 bar όπου η τάση της πλάκας ξεπέρασε τα 3,300 Volt. Ακολουθώντας τα αποτελέσματα των μετρήσεων διαμέτρου σταγόνας, οι πιο μεγάλες σταγόνες του ακροφυσίου ASJ 40 HCL φαίνεται πως είναι πιο δύσκολο να φορτιστούν, καθώς παρουσιάζουν τη χαμηλότερη μεταφορά τάσης σε όλες τις πιέσεις λειτουργίας.



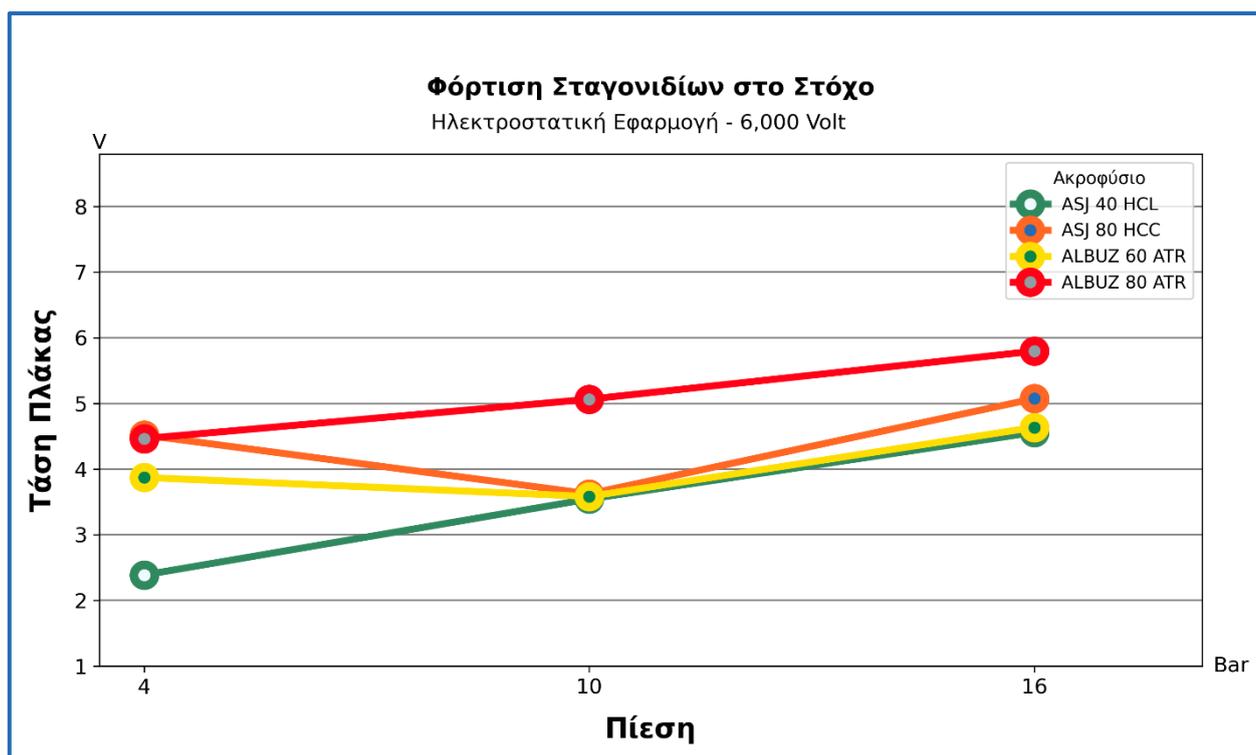
Εικόνα 13. Η μεταφορά τάσης που επιτεύχθηκε από κάθε ακροφύσιο ανά τις διαφορετικές πιέσεις λειτουργίας στα 2,000 Volt.

Αυξάνοντας τη φόρτιση των σταγονιδίων στα 4,000 Volt, παρατηρείται μια έντονη αύξηση της μεταφοράς τάσης που επιτυγχάνεται και στα τέσσερα (4) ακροφύσια που μελετήσαμε, η οποία υποδηλώνει μια γενικά υψηλότερη απόδοση στα 4,000 σε σύγκριση με τα 2,000 Volt. Επιπλέον παρατηρούμε μεγαλύτερη μεταφορά πλάκας από τα δύο (2) ακροφύσια 80°, με το ακροφύσιο ALBUZ 80 ATR να παρουσιάζει υψηλότερη απόδοση από το ASJ 80 HCC που προείχε στην εφαρμογή των 2,000 Volt. Συγκεκριμένα η ηλεκτροστατική εφαρμογή με τη χρήση του ακροφυσίου ALBUZ 80 ATR αποδίδει υψηλή τάση στο πλακίδιο της τάξης των 6.7 Volt, τιμή μέγιστης απόδοσης αισθητά υψηλότερη από την αντίστοιχη μέγιστη απόδοση στα 2,000 Volt. Καταληκτικά, η καμπύλη μεταφοράς τάσης - πίεσης για το ακροφύσιο ASJ 40 HCL παραμένει στα χαμηλότερα επίπεδα συγκριτικά με τα υπόλοιπα ακροφύσια, όπως παρουσιάστηκε και στο διάγραμμα των 2,000 Volt με τη διαφορά μιας σημαντικής σχετικά αύξησης (Εικόνα 14).



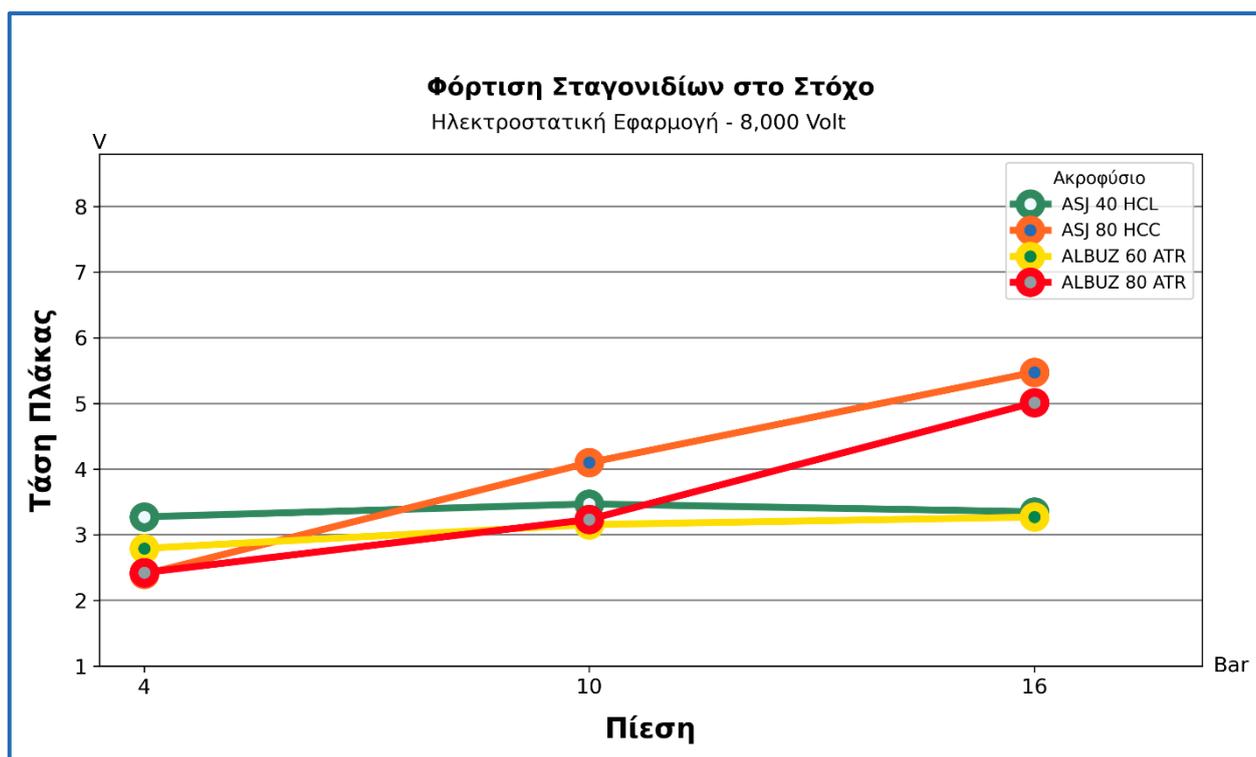
Εικόνα 14. Η μεταφορά τάσης που επιτεύχθηκε από κάθε ακροφύσιο ανά τις διαφορετικές πιέσεις λειτουργίας στα 4,000 Volt.

Στη δοκιμή των 6,000 Volt, τα αποτελέσματα εμφανίζουν μια γενική μικρή αύξηση της τάσης στο στόχο για όλα τα ακροφύσια, με τη διαφορά ότι η μέγιστη απόδοση (η οποία επιτεύχθηκε ξανά με το ακροφύσιο ALBUZ 80 ATR) μειώθηκε σημαντικά, σημειώνοντας μέγιστη τιμή ίση με 5.7 Volt (Εικόνα 15). Το ακροφύσιο των 40° εδώ εμφανίζει μια πιο γραμμική σχέση, αυξάνοντας αισθητά τη φόρτιση στο στόχο όσο αυξάνεται η πίεση λειτουργίας. Συνολικά, τα δύο (2) ακροφύσια των 80° εξακολουθούν να παρουσιάζουν την υψηλότερη μεταφορά τάσης σε όλες τις πιέσεις λειτουργίας, με εξαίρεση τα 10 bar, όπου όλα τα ακροφύσια με εξαίρεση το ALBUZ 80 ATR εμφανίζουν παρόμοιο αποτέλεσμα.



Εικόνα 15. Η μεταφορά τάσης που επιτεύχθηκε από κάθε ακροφύσιο ανά τις διαφορετικές πιέσεις λειτουργίας στα 6,000 Volt.

Στην τελική δοκιμή μεταφοράς τάσης, με την τάση πηγής ρυθμισμένη στα 8,000 Volt, τα αποτελέσματα έδειξαν μια γενική πτώση στην τάση του στόχου. Εξαιρεση παρουσιάζει το ακροφύσιο ASJ 80 HCC που αποτελεί και το ακροφύσιο με τη μεγαλύτερη απόδοση σε αυτή τη τάση πηγής, με αύξηση μεταφοράς τάσης στις πιέσεις των 10 και 16 bar (όπου και παρατηρήθηκε μέγιστη τιμή 5.4 Volt). Τέλος, εμφανίζεται ταύτιση μεταξύ τριών (3) στα 10 bar, αυτή τη φορά όμως με το ακροφύσιο ALBUZ 80 ATR να παρουσιάζει παρόμοιες τιμές με τα ASJ 40 HCL, ALBUZ 60 ATR. Ωστόσο, στις υψηλότερες πιέσεις (16 bar), τα ακροφύσια των 80° (ASJ 80 HCC και ALBUZ 80 ATR) διατηρούν την υψηλότερη απόδοση στη φόρτιση του στόχου, με τιμές που φτάνουν τα 5 Volt και 5.5 Volt αντίστοιχα (Εικόνα 16). Τέλος, μια σύνοψη όλων των δοκιμών μεταφοράς τάσης στο στόχο παρουσιάζεται στο Πίνακα 4, όπου απεικονίζεται χρωματικά οι συνδυασμοί παραμέτρων με τους οποίους εμφανίζεται βέλτιστη φόρτιση στο στόχο.



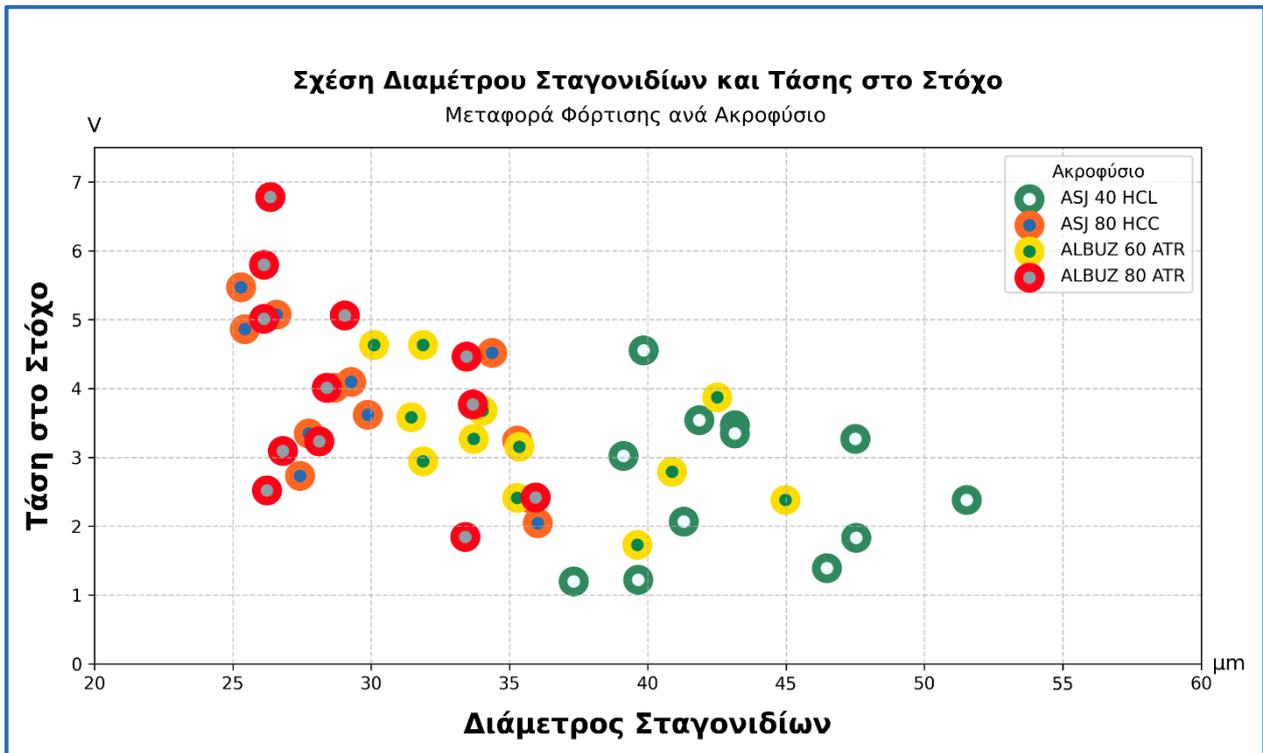
Εικόνα 16. Η μεταφορά τάσης που επιτεύχθηκε από κάθε ακροφύσιο ανά τις διαφορετικές πιέσεις λειτουργίας στα 8,000 Volt.

Πίνακας 4. Η μεταβολή της μεταφοράς τάσης (φόρτισης στόχου) ανά τις τάσεις πηγής και πιέσεις λειτουργίας για κάθε ακροφύσιο.

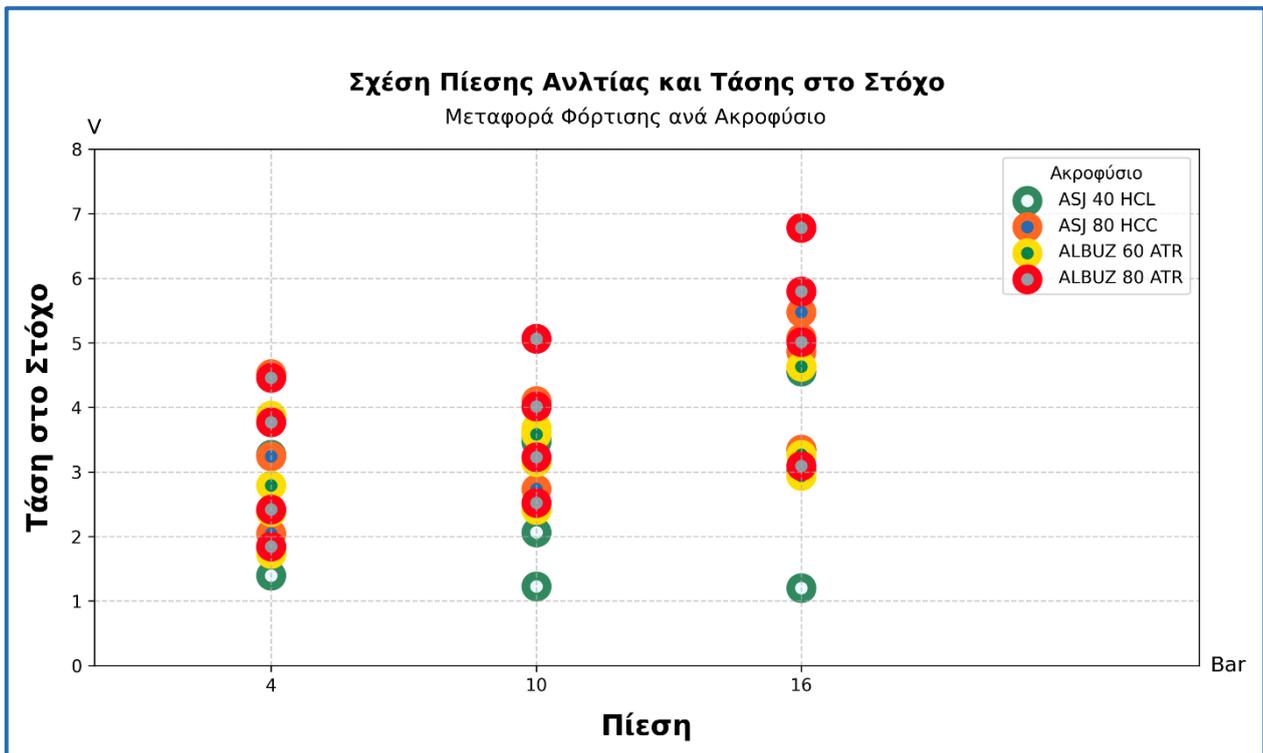
Τάση	Πίεση	Τάση Πλάκας			
		ASJ 40 HCL	ALBUZ 60 ATR	ASJ 80 HCC	ALBUZ 80 ATR
2,000 Volt	4 Bar				
	10 Bar				
	16 Bar				
4,000 Volt	4 Bar				
	10 Bar				
	16 Bar				
6,000 Volt	4 Bar				
	10 Bar				
	16 Bar				
8,000 Volt	4 Bar				
	10 Bar				
	16 Bar				

Υπόμνημα	
Τάση Στόχου	
	1-2 Volt
	2-3 Volt
	3-4 Volt
	4-5 Volt
	5+ Volt

Τέλος, παρατίθενται δύο (2) ακόμα διαγράμματα που παρουσιάζουν τη μεταφορά τάσης σε σχέση με τη διάμετρο των σταγονιδίων (Εικόνα 20) και πίεσης λειτουργίας (Εικόνα 21). Στα γραφήματα αυτά γίνεται επίσης αντιληπτό το φαινόμενο όπου τα πιο μεγάλα σε διάμετρο σταγονίδια εμφανίζουν δυσκολία στο να μεταφέρουν τάση στο στόχο, αντίθετα με τα πιο μικρά σταγονίδια. Σημαντικό είναι να επισημάνουμε πως ένας από τους λόγους όπου οι υψηλότερες τιμές πιέσεων λειτουργίας συχνά μεταφράζονται σε υψηλότερη τάση στο στόχο, είναι πιθανών λόγω του υψηλότερου ρυθμού ροής, που κατά επέκταση προκαλεί ένα μεγαλύτερο αριθμό φορτισμένων σταγονιδίων να χτυπάει το στόχο ανά μονάδα χρόνου.



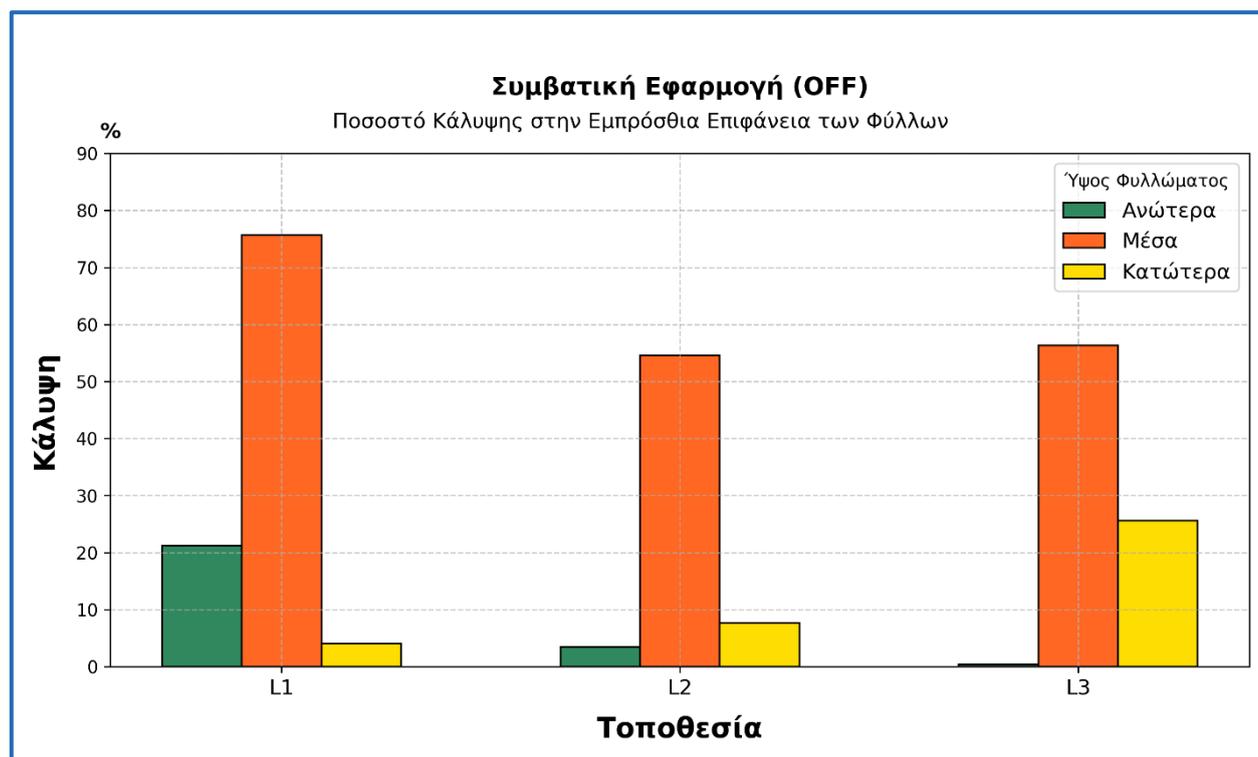
Εικόνα 17. Η σχέση διαμέτρου και μεταφοράς τάσης ανά ακροφύσιο, για όλες τις πιέσεις λειτουργίας.



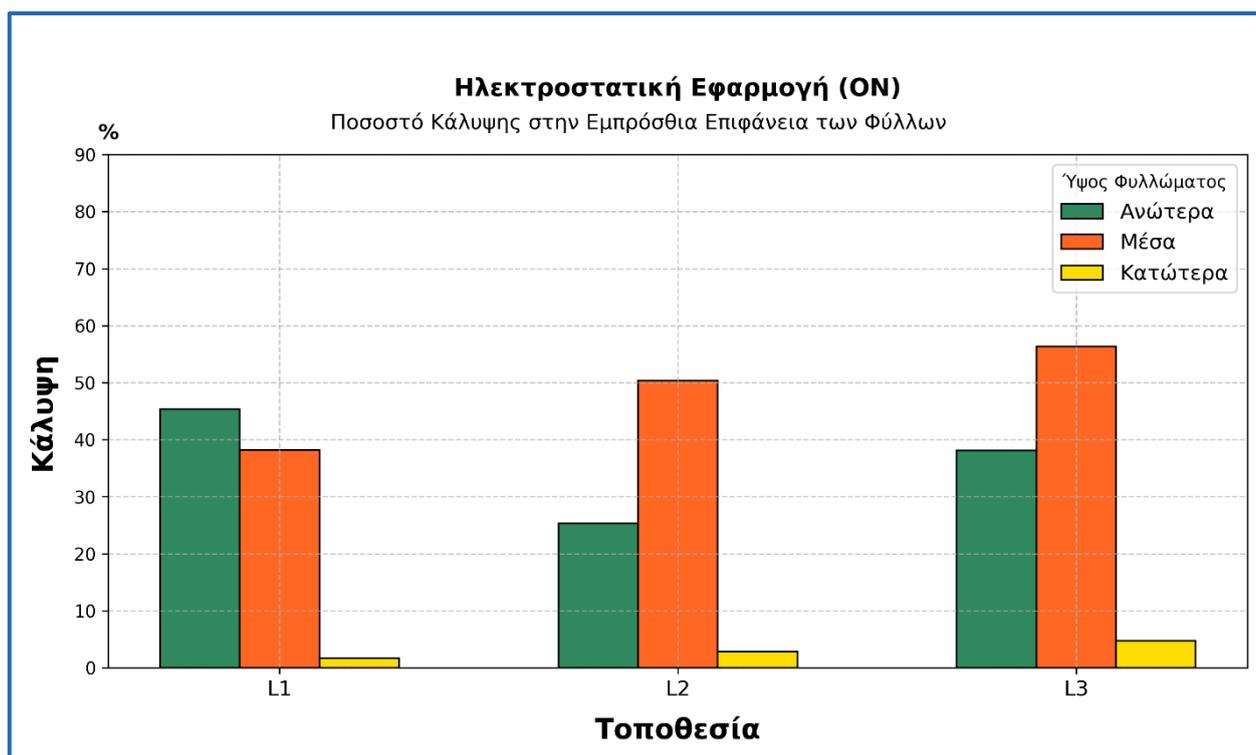
Εικόνα 18. Η σχέση πίεσης αντλίας και τάσης στο στόχο ανά ακροφύσιο, για όλες τις τάσεις πηγής.

Δοκιμές Πεδίου

Τα αποτελέσματα των δοκιμών πεδίου σε αμπέλια αφότου το ηλεκτροστατικό σύστημα είχε προσαρμοστεί σε μια τηλεχειριζόμενη ρομποτική πλατφόρμα παρουσιάζονται παρακάτω. Στις Εικόνες 21 και 22 παρουσιάζονται τα ποσοστά κάλυψης στην άνωθεν επιφάνεια του φυλλώματος που επιτεύχθηκαν με τη συμβατική και ηλεκτροστατική εφαρμογή αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι, παρόλο η ηλεκτροστατική διάταξη ήταν ενεργή στο μεσαίο ύψος φυλλώματος, η ηλεκτροστατική εφαρμογή πέτυχε υψηλότερα ποσοστά κάλυψης στα ανώτερα επίπεδα φυλλώματος, ενώ αντίθετα η συμβατική φαίνεται να υπερέχει ελαφρώς στα μεσαία και κατώτερα επίπεδα.

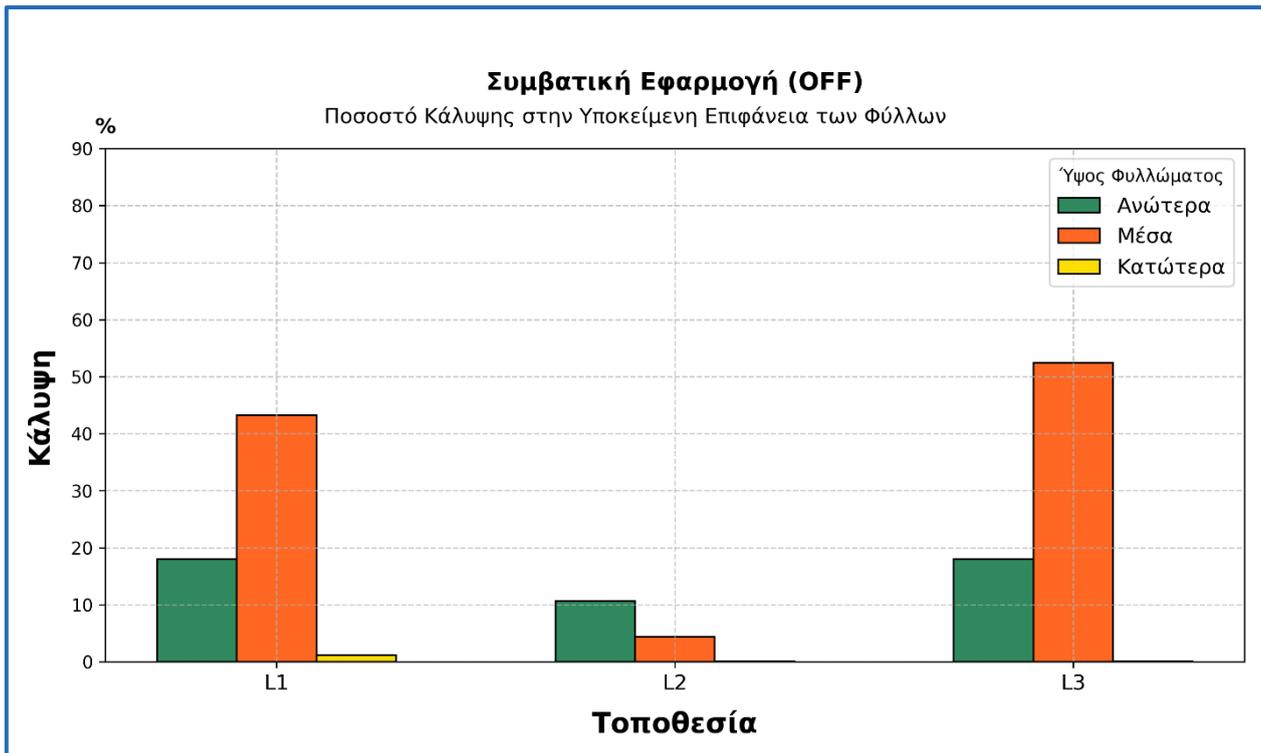


Εικόνα 19. Το ποσοστό κάλυψης της συμβατικής εφαρμογής στα διαφορετικά ύψη του φυλλώματος, για την εμπρόσθια επιφάνεια των φύλλων.

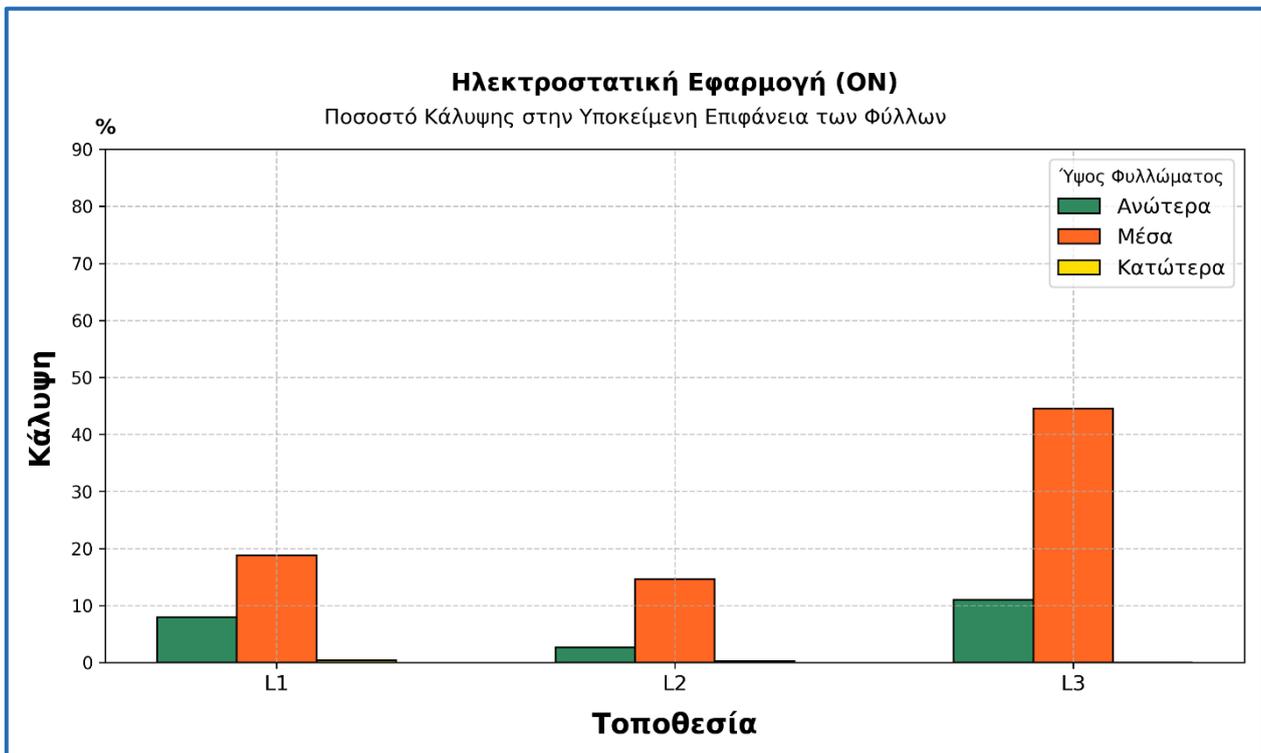


Εικόνα 20. Το ποσοστό κάλυψης της ηλεκτροστατικής εφαρμογής στα διαφορετικά ύψη του φυλλώματος, για την εμπρόσθια επιφάνεια των φύλλων.

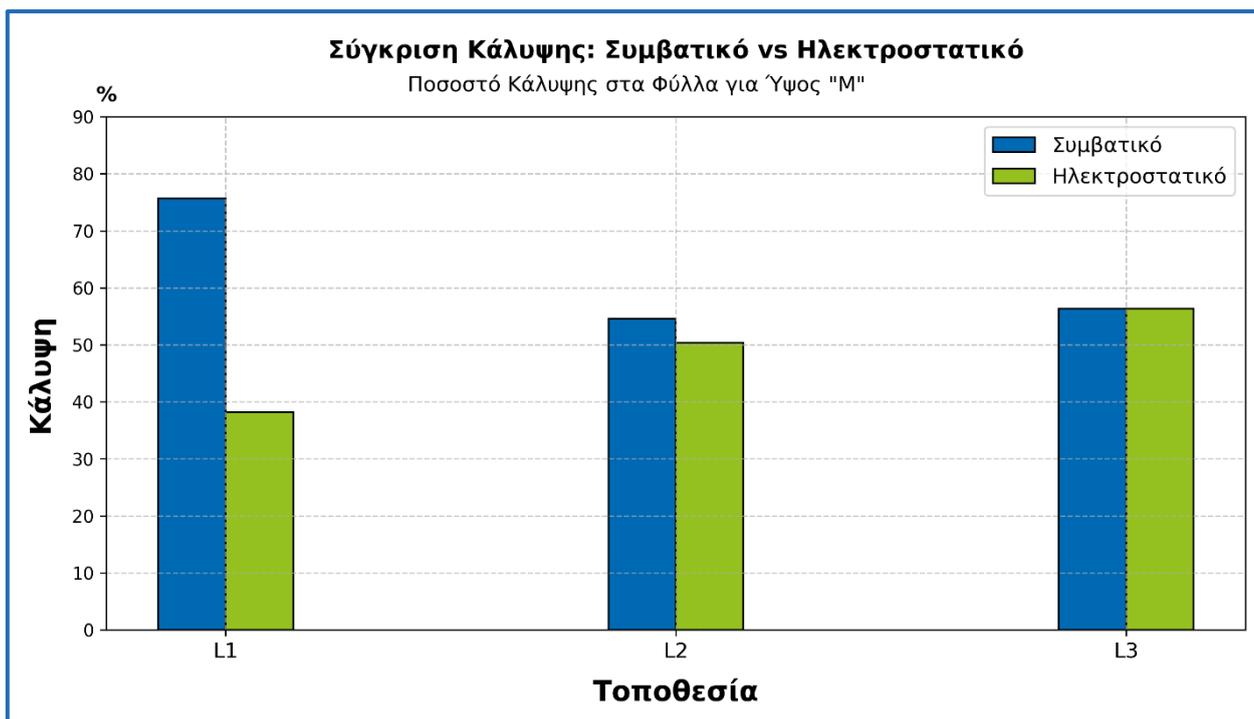
Παρόμοια, τα αποτελέσματα των ποσοστών κάλυψης στην υποκείμενη πλευρά των φύλλων ήταν – όπως ήταν αναμενόμενο – χαμηλότερα από αυτά της εμπρόσθιας πλευράς (Εικόνες 23 και 24). Και οι δύο (2) εφαρμογές φαίνεται να έχουν καταφέρει καλύτερα αποτελέσματα στο μεσαίο ύψος φυλλώματος, ενώ η κάλυψη στα κατώτερα επίπεδα ήταν αμελητέα. Καθότι το πείραμα αποτελεί μια πρώτη πιλοτική εφαρμογή που περιορίζεται μονάχα σε τρεις (3) επαναλήψεις ανά δοκιμή, βέβαια συμπεράσματα είναι δύσκολο να διεξαχθούν. Παρόλα αυτά, φαίνεται πως η ηλεκτροστατική εφαρμογή, έχει τη δυνατότητα να αυξήσει το ποσοστό κάλυψης στην υποκείμενη πλευρά του φυλλώματος, όπως φαίνεται στη δεύτερη τοποθεσία δειγματοληψίας (Εικόνα 26). Παράλληλα, σε δύο (2) από τις τρεις (3) επαναλήψεις για την εμπρόσθια πλευρά, φαίνεται να μην παρατηρούμε σημαντική διαφορά μεταξύ συμβατικού και ηλεκτροστατικής εφαρμογής (Εικόνα 25).



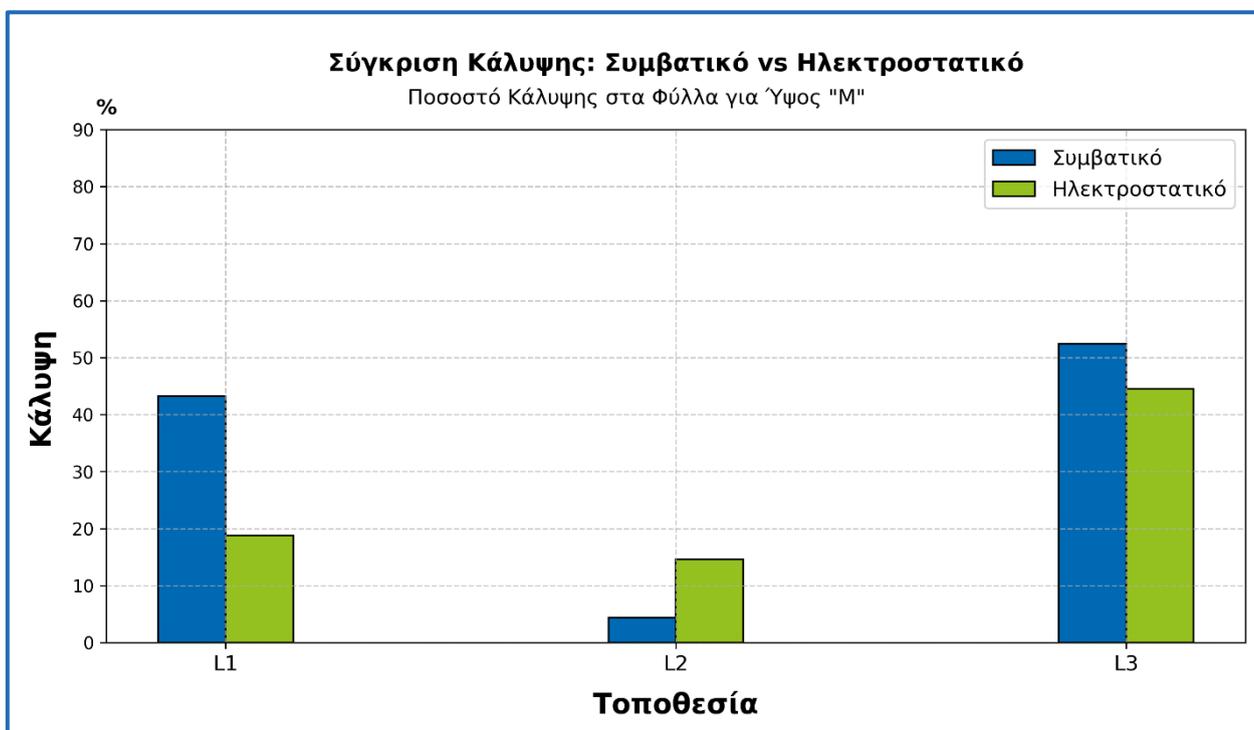
Εικόνα 21. Το ποσοστό κάλυψης της συμβατικής εφαρμογής στα διαφορετικά ύψη του φυλλώματος, για την υποκείμενη επιφάνεια των φύλλων.



Εικόνα 22. Το ποσοστό κάλυψης της ηλεκτροστατικής εφαρμογής στα διαφορετικά ύψη του φυλλώματος, για την υποκείμενη επιφάνεια των φύλλων.



Εικόνα 23. Σύγκριση του ποσοστού κάλυψης στα μεσαία επίπεδα φυλλώματος της συμβατικής και της ηλεκτροστατικής εφαρμογής στα διαφορετικά ύψη φυλλώματος, για την εμπρόσθια επιφάνεια των φύλλων.



Εικόνα 24. Σύγκριση του ποσοστού κάλυψης στα μεσαία επίπεδα φυλλώματος της συμβατικής και της ηλεκτροστατικής εφαρμογής στα διαφορετικά ύψη φυλλώματος, για την υποκείμενη επιφάνεια των φύλλων.

Η αξιολόγηση του συστήματος VRA έδειξε ότι, μετά από πέντε (5) επαναλήψεις δοκιμών πεδίου σε διαφορετικές τοποθεσίες (γραμμές δένδρων), ανταποκρίνεται με υψηλή ακρίβεια στην κόμη των ελαιόδεντρων (Εικόνα 27). Το ψεκαστικό ενεργοποιείται και

απενεργοποιείται σε κάθε πλευρά μόνο όταν υπάρχει πραγματική κόμη, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται σημαντική εξοικονόμηση ψεκαστικού υγρού της τάξης των 17%, 23%, 24%, 16% και 21% για την ίδια εκάστοτε διαδρομή (επανάληψη) σε σχέση με το καθολικό ψεκασμό. Στην αντίστοιχη συμβατική μέθοδο, το πλεονάζον υγρό θα χανόταν, αυξάνοντας την κατανάλωση φυτοπροστατευτικών προϊόντων και εκθέτοντας τον παραγωγό σε συνεχή νέφη χημικών ουσιών.



Εικόνα 257. Οι δοκιμές πεδίου με το σύστημα VRA υπό τις βέλτιστες ρυθμίσεις που προέκυψαν από τις εργαστηριακές μετρήσεις ελεγχόμενων συνθηκών.



Εικόνα 267. Οι συλλέκτες WSP από τις δοκιμές πεδίου με το σύστημα VRA, εντός στόχου (πάνω στο δένδρο) και εκτός στόχου (έδαφος).

4 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Τα στοιχεία που προέκυψαν από τις μετρήσεις σχετικά με τις παραμέτρους λειτουργίας, όπως η διάμετρος των σταγονιδίων, η πίεση της αντλίας και η γωνία των ακροφυσίων, μπορούν να αξιοποιηθούν όχι μόνο για τη βελτιστοποίηση του ρομποτικού UGV, αλλά και για την παραμετροποίηση του συστήματος μεταβλητής δόσης VRA. Η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτές οι παράμετροι επηρεάζουν την κάλυψη του φυλλώματος και την αποδοτικότητα της εφαρμογής επιτρέπει τη ρύθμιση των ακροφυσίων και της πίεσης ώστε να επιτυγχάνεται ομοιόμορφη κατανομή του ψεκαστικού διαλύματος. Παράλληλα, η γνώση για τη διάμετρο των σταγονιδίων και τη γωνία εκτόξευσής τους μπορεί να καθοδηγήσει τη βέλτιστη τοποθέτηση των ψεκαστικών στοιχείων, μειώνοντας τη διασπορά εκτός στόχου και μεγιστοποιώντας την αποτελεσματικότητα σε διαφορετικούς τύπους φυλλώματος και περιβαλλοντικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, τα πειραματικά δεδομένα προσφέρουν πρακτικές κατευθύνσεις για τη μεταφορά και την εφαρμογή των γνώσεων σε διαφορετικές τεχνολογίες ψεκασμού.

Το κύριο συμπέρασμα από το πείραμα είναι ότι η ύπαρξη της ηλεκτροστατικής διάταξης συμβάλλει ταυτόχρονα στη μείωση της διαμέτρου των σταγονιδίων των ακροφυσίων και στην ευκολότερη φόρτιση των μικρότερων σταγονιδίων. Οι δύο αυτές παράμετροι αλληλοενισχύονται σε ένα ηλεκτροστατικό σύστημα, βελτιώνοντας τη μεταφορά φορτίου στο στόχο. Η λειτουργικότητα του συστήματος επαληθεύτηκε πλήρως από τις εργαστηριακές μετρήσεις, καθώς σε όλες τις δοκιμές με ηλεκτροστατική διάταξη επιτεύχθηκε μεταφορά τάσης στο στόχο.

Όσον αφορά τα ακροφύσια, ιδανικά φαίνεται να είναι αυτά που παράγουν μικρότερης διαμέτρου σταγονίδια, όπως τα 80° που χρησιμοποιήθηκαν στην περίπτωση μας (Εικόνα 19). Αυτό οφείλεται τόσο στα μηχανολογικά τους χαρακτηριστικά, όσο και στον μεγαλύτερο αριθμό σταγονιδίων που φτάνουν στο στόχο μεταφέροντας ηλεκτρικό φορτίο. Ωστόσο, αυξάνοντας τη γωνία των ακροφυσίων, θα πρέπει πάντα να λαμβάνονται υπόψη οι λειτουργικές παράμετροι της ηλεκτροστατικής διάταξης. Σε αρχικά στάδια του πειράματος, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της γωνίας δημιουργούσε ευρύτερη δέσμη σταγονιδίων, η οποία χτυπούσε στη στεφάνη της διάταξης και προκαλούσε βραχυκύκλωμα. Συνεπώς, ένα τέτοιο σύστημα πρέπει να διαθέτει μηχανισμό ρύθμισης της απόστασης στεφάνης-ακροφυσίου, ώστε ο χειριστής να μπορεί να προσαρμόζει το σύστημα ανάλογα με τον τύπο ακροφυσίων και τις εφαρμογές.

Η πίεση της αντλίας αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα. Η αύξηση της πίεσης υπό σταθερή οπή ακροφυσίου δημιουργεί περισσότερα σταγονίδια μικρότερης διαμέτρου, με αποτέλεσμα υψηλότερες τιμές τάσης στο στόχο, όπως καταγράφηκαν στις δοκιμές στα 16 bar (Εικόνα 20). Αυτό αυξάνει το ποσοστό κάλυψης της φυλλικής επιφάνειας, αλλά ταυτόχρονα αυξάνεται και ο κίνδυνος διασποράς, καθώς τα μικρότερα σταγονίδια παρασύρονται πιο εύκολα από τον άνεμο. Η ηλεκτροστατική διάταξη μπορεί να μετριάσει αυτό το πρόβλημα, καθώς η φόρτιση των σταγονιδίων ενισχύει την προσκόλλησή τους στο φύλλωμα, μειώνοντας τη διασπορά.

Τέλος, τα πρώτα αποτελέσματα πεδίου δεν συσχετίζονται άμεσα με τις δοκιμές σε ελεγχόμενες συνθήκες, πιθανόν λόγω περιορισμένου αριθμού δοκιμών (9 δείγματα ανά

επανάληψη) και περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως στιγμιαίες ριπές ανέμου, διαφορές υγρασίας των φύλλων και ακανόνιστη επικάλυψη της φυλλικής επιφάνειας. Επιπλέον, η χρήση ψεκαστικού διαλύματος με εντομοκτόνο και μυκητοκτόνο αντί για νερό ενδέχεται να επηρέασε την αγωγιμότητα και την αποτελεσματικότητα του συστήματος.

Παρά τις παραπάνω προκλήσεις, τα πρώτα αποτελέσματα είναι ενθαρρυντικά και επιβεβαιώνουν αρκετές θεωρητικές προβλέψεις. Αποτελούν αξιόπιστη βάση για μελλοντική επέκταση του πειραματικού σχεδιασμού, ενώ ανοίγουν το δρόμο για δοκιμές με περισσότερες παραμέτρους, όπως διαφορετικοί κρίκοι φόρτισης σταγονιδίων, διαφορετικά ακροφύσια και πιο εκτενείς δοκιμές πεδίου.

5 Παραρτημα Ι

Βιβλιογραφικές Αναφορές

1. B. Salas, R. Salcedo, F. Garcia-Ruiz, and E. Gil, "Field validation of a variable rate application sprayer equipped with ultrasonic sensors in apple tree plantations," *Precis. Agric.*, vol. 26, no. 1, p. 22, Feb. 2025, doi: 10.1007/s11119-024-10201-5.
2. Bowen, H. D., Splinter, W. E., & Carleton, W. M. (1964). Theoretical implications of electrical fields on deposition of charged particles. *Transactions of the ASAE*, 7(1), 75-0082.
3. Giles, D., & Blewett, T. (1991). Effects of Conventional and Reduced-Volume, Charged-Spray Application Techniques on Dislodgeable Foliar Residue of Captan on Strawberries. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39(9), 1646-1651.
4. He, Y., Zhao, B., & Yu, Y. (2016). Effect, comparison and analysis of pesticide electrostatic spraying and traditional spraying. *Bulgarian Chemical Communications*, 48, 340-344.
5. Laryea, G. N., & No, S. Y. (2005). Effect of fan speed and electrostatic charge on deposition of orchard canopy sprays. *Atomization and Sprays*, 15(2).
6. Law, S. E., & Bowen, H. D. (1966). Charging liquid spray by electrostatic induction. *Transactions of the ASAE*, 9(4), 501-0506.
7. Maski D & Durairaj D (2006) Abaxial deposition and biological efficacy of electrostatically charged spray. *Transactions of the ASAE*, 61:116.
8. Mostafaie Maynagh, B., Ghobadian, B., Tavakkoli Hashjin, T., & Jahannama, M. R. (2009). Effect of electrostatic induction parameters on droplets charging for agricultural application. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 11(3), 249-257.
9. P. Tsakiris, C. A. Damalas, and S. D. Koutroubas, "Safety behavior in pesticide use among farmers of northern GREECE : the role of information sources," *Pest Manag. Sci.*, vol. 79, no. 11, pp. 4335-4342, Nov. 2023, doi: 10.1002/ps.7632.
10. Patel, M. K., Sahoo, H. K., Nayak, M. K., Kumar, A., Ghanshyam, C., & Kumar, A. (2015). Electrostatic nozzle: new trends in agricultural pesticides spraying. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 6-11.
11. R. Alarcón *et al.*, "Occupational exposure to pesticides as a potential risk factor for epilepsy," *NeuroToxicology*, vol. 96, pp. 166-173, May 2023, doi: 10.1016/j.neuro.2023.04.012.
12. S. O. Araújo, R. S. Peres, J. Barata, F. Lidon, and J. C. Ramalho, "Characterising the Agriculture 4.0 Landscape—Emerging Trends, Challenges and Opportunities," *Agronomy*, vol. 11, no. 4, p. 667, Apr. 2021, doi: 10.3390/agronomy11040667.
13. Urkan, E., Guler, H., & Komekci, F. (2016). A review of electrostatic spraying for agricultural applications. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 12(4), 229-233.
14. V. A. Félix Da Graça Silva, "Pesticide residues in EU soils and related risks," Wageningen University, 2022. doi: 10.18174/568702.

15. Wampler, E. L., & Hoskins, W. M. (1939). Factors Concerned in the Deposit of Sprays: VI. The Role of Electrical Charges Produced During Spraying. *Journal of Economic Entomology*, 32(1), 61-69.
16. Xiongkui, H., Aijun, Z., Yajia, L., & Jianli, S. (2011). Precision orchard sprayer based on automatically infrared target detecting and electrostatic spraying techniques. *International Journal of Agricultural and biological engineering*, 4(1), 35-40.
17. Z. Wei *et al.*, "Key Technologies for an Orchard Variable-Rate Sprayer: Current Status and Future Prospects," *Agronomy*, vol. 13, no. 1, p. 59, Dec. 2022, doi: 10.3390/agronomy13010059.
18. Γαβριηλίδης Σ., 1969, Καλλιεργητικές φροντίδες και Συγκομιδή, Γαρταγάνη, Θεσσαλονίκη.