

**ΥΠΟΜΕΤΡΟ 16.1 – 16.2 “ΙΔΡΥΣΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΩΝ ΟΜΑΔΩΝ
ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΣΥΜΠΡΑΞΗΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ
ΚΑΙ ΤΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ”**

**Ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας παραδοσιακών και νέων φυτικών προϊόντων για τη
διείσδυσή τους σε διεθνείς αγορές, αξιοποιώντας καινοτόμες τεχνικές αποξήρανσης**

INNODRY

M16ΣΥΝ2-00343

**ΕΕ5 Σχεδιασμός, βελτιστοποίηση, ex situ πιλοτική παραγωγή αποξηραμένων προϊόντων με τη
μέθοδο με υπερκρίσιμο CO₂**

**Π5.1 Έκθεση 1ης ex situ πιλοτικής παραγωγής αποξηραμένων προϊόντων με τη μέθοδο με υπερκρίσιμο
CO₂**

ΕΚΘΕΣΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΠΕΠΡΑΓΜΕΝΩΝ ΠΡΩΤΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗΣ

Φορέας Υλοποίησης	Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός Δήμητρα, Ινστιτούτο Γενετικής Βελτίωσης & Φυτογενετικών Πόρων
Επιστημονικά Υπεύθυνη	Δρ. Ελένη Μαλούπα, Διευθύντρια Ερευνών
Ομάδα έργου	Δρ. Ειρήνη Σάρρου (Κύρια Ερευνήτρια), Δρ. Αικατερίνη Γρηγοριάδου(Κύρια Ερευνήτρια), Αικατερίνη Παπαναστάση (Επιστημονικό Προσωπικό, Ms.c), Ευσταθία Πατέλου (Επιστημονικό Προσωπικό, Ms.c, Συμβασιούχος Εξωτερικός Συνεργάτης)
Παραεκκλίσεις	Στο έργο παρατηρούνται παρεκκλίσεις ως προς την παράδοση των δύο Παραδοτέων Π2.4 και Π4.2 εξαιτίας της καθυστερημένης προμήθειας του Συστήματος Υπερκρίσιμου ρευστού CO ₂ . Πάρα ταύτα το φυσικό αντικείμενο και οι δράσεις του Τεχνικού δελτίου προβλέπεται ότι θα εκτελεστούν ομαλά μέχρι το κλείσιμο του έργου, ενώ τα δύο παραδοτέα θα υποβληθούν με όλα τα υπόλοιπα κατά την τελική επαλήθευση.

Εισαγωγή

Η ξήρανση είναι μια κρίσιμη τεχνική μετά τη συγκομιδή που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση των φρέσκων γεωργικών προϊόντων, παρατείνοντας τη διάρκεια ζωής τους και μειώνοντας το βάρος και τον όγκο τους. Περιλαμβάνει την αφαίρεση της υγρασίας από το προϊόν, την αναστολή της μικροβιακής ανάπτυξης και της ενζυμικής δραστηριότητας. Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερα σημαντική για τα φρούτα, τα λαχανικά και τις φυλλώδεις καλλιέργειες, οι οποίες είναι εξαιρετικά ευπαθείς.

Η θεμελιώδης αρχή της ξήρανσης είναι η αφαίρεση της υγρασίας από το προϊόν. Αυτό επιτυγχάνεται τυπικά με την έκθεση του προϊόντος σε ξηραντικό παράγοντα, όπως αέρα ή χημικό αποξηραντικό. Καθώς η περιεκτικότητα σε υγρασία μειώνεται, το προϊόν γίνεται λιγότερο ευαίσθητο στην αλλοίωση.

Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία ξήρανσης:

Περιεκτικότητα σε υγρασία του προϊόντος: Η αρχική περιεκτικότητα σε υγρασία καθορίζει το χρόνο αποξήρανσης και την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Θερμοκρασία αποξήρανσης: Οι υψηλότερες θερμοκρασίες μπορούν να επιταχύνουν τη διαδικασία ξήρανσης αλλά μπορεί επίσης να υποβαθμίσουν την ποιότητα του προϊόντος.

Υγρασία αέρα: Η χαμηλή υγρασία ευνοεί το ταχύτερο στέγνωμα.

Ρυθμός ροής αέρα: Η επαρκής ροή αέρα είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική απομάκρυνση της υγρασίας.

Πάχος και σχήμα προϊόντος: Τα πιο λεπτά και επίπεδα προϊόντα στεγνώνουν πιο γρήγορα.

Προ-επεξεργασία προϊόντος: Οι προ-επεξεργασίες όπως η λεύκανση ή η θείωση μπορεί να επηρεάσουν τον χρόνο στεγνώματος και την ποιότητα του προϊόντος.

Προκλήσεις και μελλοντικές τάσεις

Ενώ η ξήρανση είναι μια αποτελεσματική μέθοδος για τη συντήρηση των γεωργικών προϊόντων, αντιμετωπίζει πολλές προκλήσεις:

Κατανάλωση ενέργειας: Πολλές μέθοδοι ξήρανσης, ειδικά αυτές που περιλαμβάνουν τεχνητές πηγές θερμότητας, είναι ενεργοβόρες.

Ποιότητα προϊόντος: Η διατήρηση της ποιότητας του προϊόντος κατά την ξήρανση μπορεί να είναι δύσκολη, καθώς οι υψηλές θερμοκρασίες και οι παρατεταμένοι χρόνοι στεγνώματος μπορεί να οδηγήσουν σε υποβάθμιση.

Επεκτασιμότητα: Η κλιμάκωση των εργασιών ξήρανσης μπορεί να είναι δύσκολη, ειδικά για παραγωγούς μικρής κλίμακας.

Για να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις, οι ερευνητές διερευνούν καινοτόμες τεχνολογίες ξήρανσης, όπως: 1) ηλιακή: αξιοποίηση ηλιακής ενέργειας για μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, 2) συνδυασμένες μέθοδοι ξήρανσης: συνδυασμός διαφορετικών μεθόδων ξήρανσης για βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης και της ποιότητας του προϊόντος, 3) προηγμένος εξοπλισμός: ανάπτυξη πιο αποτελεσματικού και ακριβούς εξοπλισμού αποξήρανσης, 4) νέοι παράγοντες αποξήρανσης: διερεύνηση εναλλακτικών παραγόντων, όπως υπερκρίσιμα υγρά, για τη βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος.

Με την κατανόηση των αρχών ξήρανσης, των διαφόρων διαθέσιμων μεθόδων και των παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα του προϊόντος, είναι δυνατό να βελτιστοποιηθούν οι διαδικασίες ξήρανσης και να διασφαλιστεί η παραγωγή αποξηραμένων προϊόντων υψηλής ποιότητας.

Μέχρι τώρα η αποξήρανση με εφαρμογή θερμότητας είναι η πιο κοινή τεχνική που χρησιμοποιείται σε φυτικά προϊόντα, ωστόσο τα αποτελέσματα αυτής πολλές φορές δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις των διεθνών αγορών και να ανταγωνισθούν εύκολα τα προϊόντα αντίστοιχων Ευρωπαϊκών αγορών. Ως εκ τούτου ο σκοπός του έργου **INNODRY** είναι η εφαρμογή εναλλακτικών τεχνικών αποξήρανσης.

Οι παραδοσιακές μέθοδοι ξήρανσης, όπως η ξήρανση στον ήλιο και η ξήρανση στον αέρα, μπορεί να είναι χρονοβόρες, ενεργοβόρες και μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικές απώλειες στη θρεπτική αξία και στις αισθητηριακές ιδιότητες. Τα τελευταία χρόνια, η ξήρανση με υπερκρίσιμο υγρό (SCFD) έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση, προσφέροντας αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους (Guiné et al., 2011).

Η ξήρανση με υπερκρίσιμο ρευστό είναι μια σχετικά νέα τεχνολογία που χρησιμοποιεί υπερκρίσιμα ρευστά για την αφαίρεση της υγρασίας από τα τρόφιμα. Υπερκρίσιμο ρευστό είναι μια ουσία που υπάρχει σε θερμοκρασία και πίεση πάνω από το κρίσιμο σημείο της, όπου εμφανίζει ιδιότητες τόσο υγρού όσο και αερίου. Το υπερκρίσιμο διοξείδιο του άνθρακα (SC-CO₂) είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υπερκρίσιμο ρευστό στην επεξεργασία τροφίμων λόγω της μη τοξικής, μη εύφλεκτης και φιλικής προς το περιβάλλον φύσης του (Benali and Boumghar, 2014).

Τα υπερκρίσιμα ρευστά προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους ξήρανσης (Peach and Eastoe, 2014) όπως φαίνεται παρακάτω:

Ήπιες συνθήκες αποξήρανσης: η αποξήρανση μπορεί να διεξαχθεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, ελαχιστοποιώντας τη θερμική υποβάθμιση και διατηρώντας το χρώμα, τη γεύση και τη θρεπτική αξία του προϊόντος.

Γρήγορη αποξήρανση: Το CO₂ μπορεί να διεισδύσει γρήγορα στο προϊόν και να αφαιρέσει την υγρασία, οδηγώντας σε μικρότερους χρόνους ξήρανσης.

Βελτιωμένη ποιότητα προϊόντος: προκύπτουν υψηλής ποιότητας αποξηραμένα προϊόντα με εξαιρετικές ιδιότητες επανενυδάτωσης, και ανώτερη υφή.

Επιλεκτική ξήρανση: μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλεκτική αφαίρεση της υγρασίας από συγκεκριμένα μέρη του προϊόντος, όπως η επιφάνεια ή ο πυρήνας.

Φιλικό προς το περιβάλλον: Το CO₂ είναι ένας μη τοξικός και μη εύφλεκτος διαλύτης που μπορεί εύκολα να ανακυκλωθεί, καθιστώντας το μια βιώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία. Τα υπερκρίσιμα ρευστά έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για την ξήρανση λαχανικών και φυλλωδών καλλιεργειών, όπως τα μανιτάρια, το σπανάκι (μπορεί να διατηρήσει το πράσινο χρώμα και τη θρεπτική αξία του), οι πιπεριές, τα καρότα, το μαρούλι, αλλά και τα βότανα όπως ο βασιλικός, η ρίγανη και το θυμάρι (Pravallika et al., 2023).

Παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του υπερκρίσιμου ρευστού.

Διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση του υπερκρίσιμου ρευστού με βασικότερους : 1) τις συνθήκες λειτουργίας όπως η πίεση, η θερμοκρασία και ο ρυθμός ροής του CO₂ οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον ρυθμό ξήρανσης και την ποιότητα του προϊόντος, 2) τις ιδιότητες του προϊόντος με σημαντικότερους την περιεκτικότητα σε υγρασία, το μέγεθος σωματιδίων και η επιφάνεια του προϊόντος, 3) ο τεχνολογικός σχεδιασμός του εξοπλισμού συμπεριλαμβανομένων του αντιδραστήρα, των αντλιών και των βαλβίδων, μπορεί να επηρεάσει την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας.

Προκλήσεις και Μελλοντικές Κατευθύνσεις

Ενώ τα υπερκρίσιμα ρευστά προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, εξακολουθούν να υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις όπως φαίνονται παρακάτω:

Υψηλό αρχικό κόστος: Το υψηλό κόστος του εξοπλισμού μπορεί να περιορίσει την υιοθέτησή του από παραγωγούς μικρής κλίμακας.

Πολύπλοκη διαδικασία: Η αποξήρανση είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί προσεκτικό έλεγχο των συνθηκών λειτουργίας.

Για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις, η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην ανάπτυξη οικονομικά αποδοτικού εξοπλισμού, τη βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας για διαφορετικά προϊόντα, την κλιμάκωση διαδικασιών για βιομηχανικές εφαρμογές, και τέλος τη διερεύνηση των δυνατοτήτων των υπερκρίσιμων ρευστών για την ξήρανση μίας πληθώρας αγροτικών προϊόντων.

Ως προς αυτή την κατεύθυνση ένας από τους κύριους στόχους του αντικείμενου του έργου INNODRY είναι η εφαρμογή του υπερκρίσιμου ρευστού CO₂ για την αποξήρανση αγροτικών προϊόντων της Χώρας όπως η μελιτζάνα, η πιπεριά, η στέβια, ο κρίταμος και η ελιά. Για αυτό το σκοπό η ομάδα του εταίρου ΙΓΒΦΠ (ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ) έχει προβεί στην προμήθεια Συσκευής νέας τεχνολογίας Υπερκρίσιμου Ρευστού και αναπτύσσει πρωτόκολλα αποξήρανσης των παραπάνω αγροτικών προϊόντων, ενώ στη συνέχεια θα εκπαιδεύσει τους παραγωγικούς φορείς επάνω στη συγκεκριμένη τεχνική αποξήρανσης.

Υλικά και μέθοδοι

Φρέσκα προϊόντα

Για τον αρχικό πειραματισμό και την πρώτη πιλοτική εφαρμογή της αποξήρανσης με υπερκρίσιμο CO₂, παραλήφθηκαν αρχικά στο εργαστήριο του ΙΓΒΦΠ (ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ) οι πρώτες παρτίδες των νωπών προϊόντων από τους εταίρους της κοινοπραξίας όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Νωπά προϊόντα που απεστάλησαν στο ΙΓΒΦΠ για εφαρμογή αποξήρανσης με CO₂.

Νωπό Προϊόν	Εταίρος
5 kg Μελιτζάνα (ολόκληρος καρπός)	Ευστάθιος Ξένος
5 kg Πιπεριά πράσινη ‘κέρατο’ (ολόκληρος καρπός)	Ευστάθιος Ξένος
1 kg Κρίταμο (εναέρια τμήματα ανθισμένα)	ΚΩΖΑΤ ΑΒΕΕ
1 kg Στέβια (εναέρια τμήματα βλαστός και φύλλα)	Αγροτικός Συνεταιρισμός Στέβια Ελλάς

Τα αρχικά δείγματα μελιτζάνας και πιπεριάς καθαρίστηκαν με απιονισμένο νερό και αφού στέγνωσαν από την επιφανειακή υγρασία τεμαχίστηκαν σε κύβους διαστάσεων 1 x 1 cm. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της μελιτζάνας και καθώς ο επιδερμικός φλοιός του καρπού είναι ‘δερματώδης’, οι καρποί αποφλοιώθηκαν κόπηκαν σε φέτες πάχους περίπου 0,5-0,8 cm και εν συνεχεία πραγματοποιήθηκε η επεξεργασία για κάθε μέρος ξεχωριστά. Στην περίπτωση των φυλλωδών προϊόντων -κρίταμο και στέβια- τα προϊόντα ελέγχθηκαν για την απομάκρυνση πιθανών ξένων υλών και τα φύλλα διαχωρίστηκαν από τον βλαστό προτού τοποθετηθούν στους - 20 °C.

Περιγραφή συνδεσμολογίας συσκευής υπερκρίσιμου ρευστού CO₂

Για τις ανάγκες του φυσικού αντικείμενου η αποξήρανση έλαβε χώρα σε συσκευή υπερκρίσιμου ρευστού CO₂ της εταιρείας ExtrateX (Supercritical Fluid Innovation) όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.

Η συσκευή αποτελείται από το δοχείο εξαγωγής χωρητικότητας 500 mL το οποίο έχει σχεδιαστεί για λειτουργία έως και 700 bar πίεση, το οποίο θερμοστατείται σε φούρνο ειδικών τεχνικών προδιαγραφών για θερμοκρασίες έως 250 °C. Το δοχείο είναι εξοπλισμένο με 2 φίλτρα και βιδωτό κάτω και πάνω καπάκι, που αποσυναρμολογείται με το χέρι. Ένας εναλλάκτης θερμότητας είναι τοποθετημένος μέσα στο φούρνο, πριν από το δοχείο εξαγωγής, ώστε να προθερμάνει το ρευστό που εισέρχεται στο εσωτερικό του δοχείου. Η συσκευή αποτελείται επίσης από μία αντλία διαλύτη CO₂ υψηλής πίεσης (δυνατή να αντλεί και νερό) η οποία συνδέεται με το δοχείο εξαγωγής και είναι σχεδιασμένη να επιτρέπει ρυθμούς ροής από 0 έως 100 ml/min νερού στα 300 bar ή 0-50 g/min CO₂ στα 1000 bar. Είναι εξοπλισμένη με κεφαλές με μανδύα και ψύκτη ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ψύξη και άντληση CO₂ με βέλτιστη απόδοση. Ο ρυθμός ροής ελέγχεται αυτόματα με οδηγό συχνότητας και έναν ενσωματωμένο ελεγκτή που βρίσκεται τοποθετημένος στην αντλία. Το λογισμικό ελέγχου που διαχειρίζεται τη συχνότητα (ταχύτητα κινητήρα) λαμβάνει υπόψη την πίεση, την πυκνότητα και επομένως τη συμπίεστικότητα του διαλύτη.

Η πίεση ελέγχεται με ακρίβεια με ρυθμιστή αντίθλιψης και ρυθμίζεται χειροκίνητα (κεντρική βαλβίδα). Τέλος το σύστημα διαθέτει ένα κυκλωνικός διαχωριστής από ανοξείδωτο χάλυβα (300 ml) που λειτουργεί υπό πιέσεις έως και 200 bar ο οποίος επιτρέπει την ανακύκλωση CO₂ και συλλογή του νερού που εξάγεται από το φυτικό ιστό. Η μονάδα ελέγχεται από ένα κουτί ελέγχου όπου βρίσκονται ελεγκτές καθώς και δείκτες πίεσης και θερμοκρασίας. Η καταγραφή δεδομένων όλων των παραμέτρων διεργασίας, όπως οι πιέσεις και οι θερμοκρασίες του εξαγωγέα και του διαχωριστή, αποτυπώνονται στην οθόνη και μπορεί να μεταφερθεί σε κλειδί USB για περαιτέρω ανάλυση.

Όλα τα δοχεία είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα 316 L, ενώ οι φλάντζες/στεγανοποιήσεις κατασκευάζονται κυρίως από PTFE ή EPDM. Όλα τα εξαρτήματα είναι τοποθετημένα σε πλαίσιο από ανοξείδωτο χάλυβα και αλουμίνιο.



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΓΕΩΡΓΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
Η Ευρώπη επενδύει στις αγροτικές περιοχές



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ



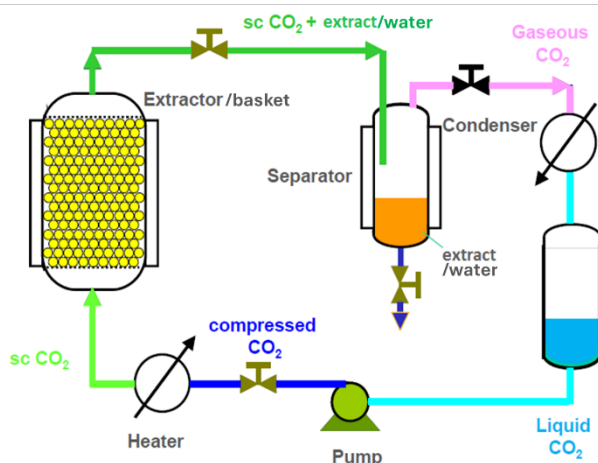
ανάπτυξη - εργασία - αλληλεγγύη

Σχήμα 1. Διάταξη συσκευής υπερκρίσιμου ρευστού CO₂ στο εργαστήριο του ΙΓΒΦΠ-ΕΛΓΟ ΔΗΜΗΤΡΑ

Αρχή λειτουργίας συσκευής

Υγρό διοξείδιο του άνθρακα από τον κύλινδρο αποθήκευσης παραδίδεται στον συμπυκνωτή. Το ψυχρό υγρό CO₂ αντλείται με την αντλία υψηλής πίεσης και η πίεση αυξάνεται μέχρι την πίεση εξαγωγής. Το CO₂ υψηλής πίεσης στη συνέχεια θερμαίνεται στον εναλλάκτη θερμότητας για να επιτευχθούν υπερκρίσιμες συνθήκες. Οι ιδιότητες του CO₂ μπορούν να τροποποιηθούν με τον συνδιαλύτη που αντλείται πριν από τον εναλλάκτη θερμότητας με μια αντλία συνδιαλύτη (εάν υπάρχει).

Η αντίδραση ή η απομάκρυνση του περιεχόμενου νερού από τον ιστό λαμβάνει χώρα στο δοχείο αντίδρασης (Extractor ή Basket) που διατηρείται σε σταθερή πίεση και θερμοκρασία. Ένας ρυθμιστής αντίθλιψης επιτρέπει τον έλεγχο της πίεσης και την αποσυμπίεση του CO₂. Το νερό που παρασύρεται από τον φυτικό ιστό συλλέγεται στον διαχωριστήρα (Separator) και το CO₂ επανακυκλοφορεί στο σύστημα.



Σχήμα 2. Απεικόνιση της διαδικασίας αποξήρανσης με Υπερκρίσιμο ρευστό CO₂.

Αποτελέσματα και συζήτηση

1. Μελιτζάνα

Όσον αφορά το υλικό της μελιτζάνας και λαμβάνοντας υπόψιν το γεγονός ότι ο φλοιός του καρπού είναι ιδιαιτέρως δερματώδης και θα μπορούσε να αποτελέσει φυσικό κυτταρικό φραγμό για την απομάκρυνση της υγρασίας από τον ιστό, ο φλοιός αφαιρέθηκε από τη σάρκα και υποβλήθηκε στις ίδιες συνθήκες αποξήρανσης με τη σάρκα ώστε να διερευνηθεί κατά πόσο ανταποκρίνεται με τον ίδιο τρόπο στην αφυδάτωση, ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί εξαιτίας και των υψηλών συγκεντρώσεων αντιοξειδωτικών συστατικών που περιέχει. Το νωπό βάρος της σάρκας ήταν 11,3 g και του φλοιού 1,54 g.



Οι παράμετροι που ρυθμίστηκαν για την ξήρανση δίδονται στον Πίνακα 2:

Πίνακας 2. Συνθήκες θερμοκρασιών και πίεσης του συστήματος.

Θερμοκρασία φούρνου	50°C
Θερμοκρασία διαχωριστήρα	45°C
Πίεση	150 bar
Ρυθμός ροής CO ₂	25 g min ⁻¹

Παράλληλα με τις παραπάνω παραμέτρους και με σκοπό να σχεδιαστούν οι κινητικές της αποξήρανσης του προϊόντος μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου ξήρανσης στην απώλεια της περιεχόμενης υγρασίας από τον κάθε ιστό. Η χρονική διάρκεια κάθε εφαρμογής για τη μελέτη των κινητικών ορίστηκαν οι τρεις ώρες, κατά το πέρας των οποίων καταγράφονταν το βάρος του κάθε ιστού κατόπιν ζυγίσματος σε ζυγό ακριβείας και η απώλεια υγρασίας του όπως φαίνεται στον Πίνακα 3. Μετά την πάροδο των πρώτων 3 h, το δείγμα ξαναζυγίστηκε και αποθηκεύτηκε στους 4°C, η δε ξήρανση συνεχίστηκε την επόμενη ημέρα. Ακολουθούν οι μετρήσεις βάρους για σάρκα και φλοιό ξεχωριστά στις 3 h και στο τέλος του πειράματος (6 h).

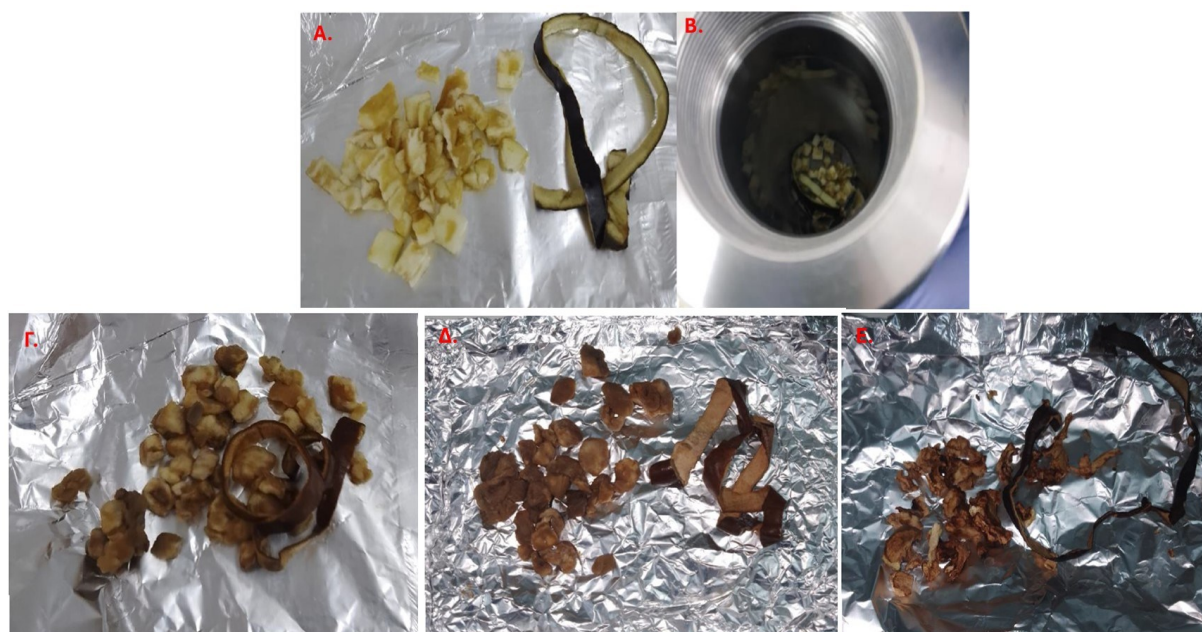
Πίνακας 3. Αποτελέσματα απώλειας υγρασίας από τους δύο ιστούς της μελιτζάνας (σάρκα και φλοιό) κατόπιν αποξήρανσής τους με υπερκρίσιμο CO₂.

Χρονική διάρκεια (h)	Βάρος σάρκας (g)	Βάρος φλοιού (g)	Απώλεια υγρασίας σάρκας (%)	Απώλεια υγρασίας φλοιού (%)
0	11,3	1,54		
3	7,47	1,01	33,9	30,5
6	2,84	0,44	62,0	58,9
Σύνολο			74,9	71,4
			19	23

Με σκοπό να προσδιοριστεί η συνολική περιεχόμενη υγρασία στους ιστούς της μελιτζάνας 2 g από σάρκα και φλοιό τοποθετήθηκαν ξεχωριστό σε θερμοζυγό. Το συνολικό περιεχόμενο υγρασίας και στους δύο ιστούς ήταν 94 %.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη περιεκτικότητα σε νερό στα αποξηραμένα τρόφιμα είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη της μικροβιακής ανάπτυξης και της αλλοίωσης. Γενικά, η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία αναστέλλει τη μικροβιακή δραστηριότητα και παρατείνει τη διάρκεια ζωής (Rezaei & Vander Gheynst, 2010). Ωστόσο, οι συγκεκριμένες οδηγίες μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο του προϊόντος, τους τοπικούς κανονισμούς και τα βιομηχανικά πρότυπα. Για τα αποξηραμένα λαχανικά και φρούτα, συμπεριλαμβανομένης της μελιτζάνας και της πιπεριάς, η κοινή στοχευόμενη περιεκτικότητα σε υγρασία είναι κάτω από 10%. Αυτό το επίπεδο θεωρείται συχνά ασφαλές για την πρόληψη της μικροβιακής ανάπτυξης και τη διατήρηση της ποιότητας του προϊόντος (Afolabi, 2014; Alp & Bulantekin, 2021). Όσον αφορά τη μελιτζάνα λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς της σε υγρασία όταν είναι φρέσκια, χρειάζεται σχολαστική ξήρανση για να επιτευχθεί χαμηλή τελική περιεκτικότητα σε υγρασία. Συχνά συνιστάται περιεκτικότητα σε υγρασία 6-8% για να διασφαλιστεί η μακροπρόθεσμη σταθερότητα αποθήκευσης.

Σύμφωνα με τον πειραματισμό μας και λαμβάνοντας υπόψιν ότι μετά το πέρας 6 ωρών για την αποξήρανση με υπερκρίσιμο CO₂ το εναπομείναν περιεχόμενο της υγρασίας στη σάρκα ήταν περίπου 19% και στο φλοιό 23%, φαίνεται ότι απαιτεί περαιτέρω χρόνο αποξήρανσης ενδεχομένως 3 επιπλέον ωρών με τη χρήση υπερκρίσιμου CO₂ ώστε να επιτευχθεί το βέλτιστο μέγιστο περιεχόμενο υγρασίας μικρότερο από 10% όπως προτείνεται από την διεθνή κοινότητα. Το αρχικό αυτό πείραμα αυτή τη στιγμή επαναλαμβάνεται με τον αυξημένο χρόνο αποξήρανσης κατά 3 h και τα τελικά αποτελέσματα θα δοθούν στο αντίστοιχο παραδοτέο του έργου.



Σχήμα 3. Αποφλοιωμένος και τεμαχισμένος καρπός μελιτζάνας, μαζί με το φλοιό, πριν την ξήρανση (Α) και εντός του δοχείου της συσκευής προς αποξήρανση με

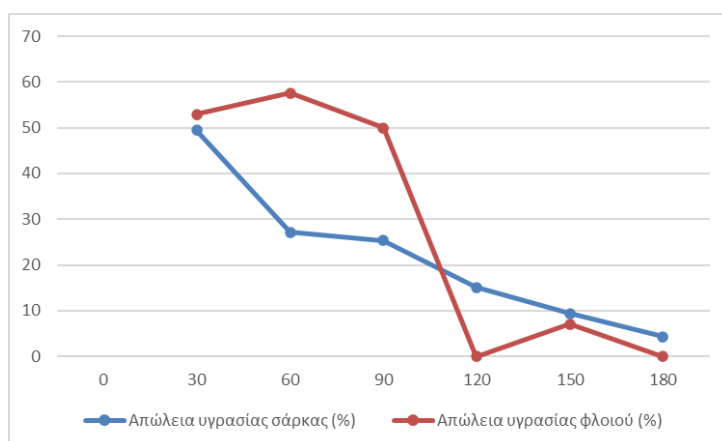
υπερκρίσιμο CO₂ SCD (B), μετά από 3 h SCD (Γ), β) μετά από 6 h SCD (Δ), γ) μετά 3 h ξήρανση σε φούρνο στους 80-100°C (Ε).

Γενικότερα παρατηρήθηκε πως η απώλεια της υγρασίας είναι παρόμοια για τη σάρκα με τις δύο μεθόδους (φούρνος και ξήρανση με υπερκρίσιμο CO₂ -SCD), ωστόσο από άποψη υφής, μακροσκοπικά φαίνεται πως στην περίπτωση του SCD διατηρείται περισσότερο το σχήμα (πιο ζωντανός ιστός), σε σχέση με το φούρνο, ενώ το “μαύρισμα” είναι σε λίγο μικρότερο βαθμό, ιδίως στο φλοιό, μετά τις 6 h. Η υφή και το χρώμα των αποξηραμένων προϊόντων θα μετρηθούν ενδελεχώς στην επανάληψη του πειράματος με εξειδικευμένο εξοπλισμό (texture analyzer και χρωματόμετρο) όπως περιγράφεται στο τεχνικό δελτίο του έργου.

Με σκοπό να παρατηρήσουμε την απώλεια υγρασίας από τους δύο ιστούς της μελιτζάνας σε συνθήκες ξήρανσης στο φούρνο μεταχειριστήκαμε 10 gr νωπού ιστού από τον καρπό μελιτζάνας με βάρος σάρκας 8,68 gr και φλοιού 1,4 gr. Ακολούθησε ξήρανση σε φούρνο σε 80-100°C, με παρακολούθηση ανά μισάωρο του βάρους των ιστών όπως φαίνεται στον Πίνακα 4 και της απώλειας υγρασίας στο Σχήμα 4.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα μέτρησης βάρους των δύο ιστών της μελιτζάνας (σάρκα και φλοιό) κατόπιν αποξηράνσής τους σε φούρνο στους 80-100°C.

Χρονική διάρκεια (h)	Βάρος σάρκας (g)	Βάρος φλοιού (g)	Απώλεια υγρασίας σάρκας (%)	Απώλεια υγρασίας φλοιού (%)
0	8,68	1,4		
30	4,39	0,66	49,4	52,9
60	3,2	0,28	27,1	57,6
90	2,39	0,14	25,3	50
120	2,03	0,14	15,1	0
150	1,84	0,13	9,4	7,1
180	1,76	0,13	4,3	0
Σύνολο			79,7	90,7



Σχήμα 4. Απώλεια της υγρασίας της σάρκας και του φλοιού μελιτζάνας κατά την αποξηράνση σε φούρνο για τρεις ώρες.

2. Πράσινη πιπεριά

Για την αποξήρανση της πιπεριάς, οι καρποί χωρίστηκαν σε δύο ίσα μέρη, από τα οποία αφαιρέθηκαν οι σπόροι. Το πρώτο μισό χρησιμοποιήθηκε για την αποξήρανση SCD και το άλλο μισό για ξήρανση σε φούρνο (80-100°C), αφού πρώτα κατατμήθηκαν σε τετράγωνα (καρέ) διαστάσεων περίπου 1x1 cm.



Οι παράμετροι που ρυθμίστηκαν για την ξήρανση της πιπεριάς δίδονται στον Πίνακα 5:

Πίνακας 5. Συνθήκες θερμοκρασιών και πίεσης του συστήματος.

Θερμοκρασία φούρνου	50°C
Θερμοκρασία διαχωριστήρα	45°C
Πίεση	150 bar
Ρυθμός ροής CO ₂	25 g min ⁻¹

Ομοίως με τα προϊόντα της μελιτζάνας και προκειμένου να μελετηθούν οι κινητικές της αποξήρανσης SCD της πιπεριάς μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου ξήρανσης στην απώλεια της περιεχόμενης υγρασίας από το νωπό ιστό εφαρμόζοντας τρίωρους χειρισμούς με υπερκρίσιμο CO₂.

Συνολικά εφαρμόστηκαν 4 τρίωροι χειρισμοί (σύνολο 12 h), ενώ κατά το πέρας κάθε χειρισμού καταγράφονταν το βάρος του ιστού κατόπιν ζυγίσματος σε ζυγό ακριβείας και η απώλεια υγρασίας του όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Ακολουθούν οι μετρήσεις βάρους του ιστού ξεχωριστά στις 3, 6, 9 και 12 h (τέλος του πειράματος).

Πίνακας 6. Αποτελέσματα βάρους ιστού και απώλειας υγρασίας πιπεριάς κατόπιν αποξήρανσής τους με υπερκρίσιμο CO₂ για 12 ώρες.

Χρόνος (h)	Βάρος ιστού (gr)	Απώλεια υγρασίας (%)
0	21,0	
3	15,17	27,8
6	12,08	20,37
9	7,14	40,89
12	3,51	50,84
Σύνολο		89,29

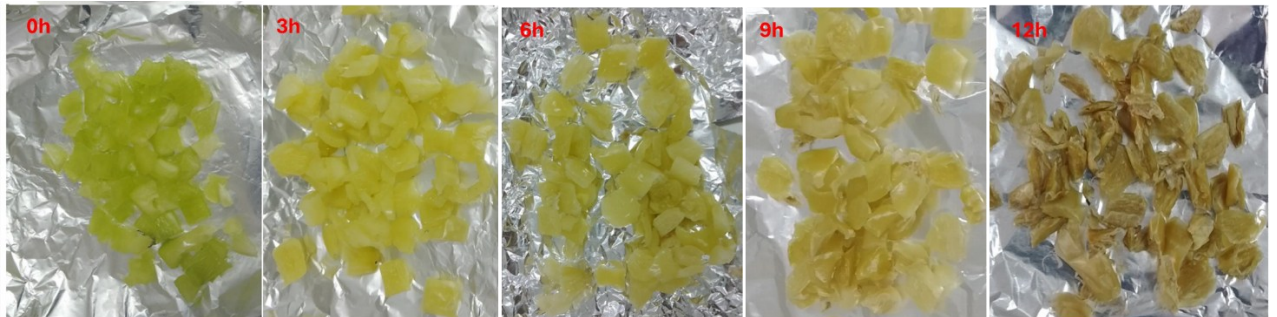
Ομοίως, ακολούθησε ξήρανση σε φούρνο σε 80-100°C, με παρακολούθηση ανά μισάωρο του βάρους των ιστών και μέχρι τις 3 h:

Πίνακας 7. Αποτελέσματα μέτρησης βάρους του ιστού πιπεριάς κατόπιν αποξήρανσής του σε φούρνο στους 80-100°C.

Χρόνος (h)	Βάρος ιστού (gr)	Απώλεια υγρασίας (%)
0	18,18	
30	16,73	8,00
60	13,49	19,37
90	10,19	24,46
120	7,65	24,93

150	5,72	25,23
180	4,39	23,25
Σύνολο		75,85

Παρατηρήθηκε ότι παρόμοια ποσοστά απώλειας υγρασίας με την ξήρανση στο φούρνο έπειτα από 3 h, παρουσιάζει η μέθοδος SCD μεταξύ 9 και 12 ωρών. Κατά την ξήρανση με CO₂, το δείγμα φαίνεται πως κυρίως αποχρωματίζεται, με εμφανή διαφορά από τις 6 h και μετέπειτα, ενώ η υφή αλλάζει εντελώς στις 12 h με τη συστροφή των τεμαχίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5. Τεμαχισμένος καρπός πιπεριάς, πριν την ξήρανση (0h), και μετά από 3, 6, 9 και 12 h SCD.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η μέγιστη περιεκτικότητα σε υγρασία για τις αποξηραμένες πιπεριές είναι συνήθως περίπου 8-10% (Sahar et al. 2015). Η χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία μπορεί να βοηθήσει στην πρόληψη της ανάπτυξης μούχλας και στη διατήρηση της γεύσης και της υφής της πιπεριάς. Στο δικό μας πειραματισμό παρατηρήθηκε ότι μετά από 12 h ξήρανσης με υπερκρίσιμο CO₂ ο ιστός της πιπεριάς μπορεί να φτάσει σε περιεχόμενη υγρασία 10% ωστόσο χάνει σε μεγάλο βαθμό ως προς το χρώμα και τη δομή του. Ως εκ τούτου απαιτείται πιθανή τροποποίηση του εφαρμοζόμενου πρωτοκόλλου για τη βελτιστοποίηση κυρίως ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του αποξηραμένου προϊόντος.

Καθώς ο πειραματισμός για τη βελτιστοποίηση του πρωτοκόλλου ξήρανσης SCD για τα λαχανοκομικά είδη είναι εν εξελίξει το προσεχές διάστημα, τους πρώτους 2 μήνες του 2025 προβλέπεται ο πειραματισμός στα φυλλώδη είδη -κρίταμο και στέβια- όπως και σε καρπούς ελιάς.

B. Έλεγχος ποιότητας αποξηραμένων προϊόντων και σύγκριση με το νωπό προϊόν

Ο νωπός ιστός μελιτζάνας και πιπεριάς αλλά και ο αποξηραμένος μετά την SCD αποθηκεύτηκε σε falcon tube στους -20°C.

Προκειμένου να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της αντιοξειδωτικής ικανότητας του προϊόντος ξήρανσης και σε σχέση με το νωπό προϊόν, λειοτριβήθηκε σε knife mill ο ιστός που είχε αποθηκευτεί, όπως επίσης και ακόμα μια φέτα από τον νωπό καρπό.

Στο προϊόν που παραλάβαμε μετά από 6 h σε SCD, υπάρχει μεσοσταθμικά ένα 19,54% ποσοστό υγρασίας (λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά για το βάρος ξεχωριστά σάρκας

και φλοιού και προσθέτοντας τα ποσοστά υγρασίας για το σύνολο του δείγματος (όπως παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα):

Μελιτζάνα	Σάρκα	Φλοιός	Σύνολο
Βάρος (gr)	2,84	0,44	3,28
Ποσοστό συμμετοχής στο συνολικό βάρος (%)	86,6	13,40	100
Υπολογισμένο ποσοστό περιεκτικότητας σε υγρασία (%)	19,10	22,6	
Υπολογισμένο ποσοστό συμμετοχής στη συνολική περιεκτικότητα σε διατηρούμενη υγρασία (%)	16,54	3	19,54

Ζυγίστηκαν από 3 δείγματα για το νωπό και τον κατεργασμένο ιστό, λαμβάνοντας υπόψη την υγρασία, ούτως ώστε να προκύπτει μια κοινή βάση για σύγκριση (γύρω στα 200 mg ξηρού βάρους), όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί (το υπολογισμένο ξηρό βάρος στις παρενθέσεις).

Μελιτζάνα	Νωπός ιστός	Αποξηραμένος ιστός 6 h SCD (mg)
1	386.0 (199.0)	253.6 (212.1)
2	380.2 (196.0)	257.4 (215.3)
3	383.1 (197.5)	258.0 (215.8)

Μετά από κατεργασία στο θερμοζυγό, στο νωπό δείγμα υπολογίστηκε ένα ποσοστό υγρασίας 93,52%. Στο προϊόν που παραλάβαμε μετά από 12 h σε SCD, υπάρχει ένα 10,23% ποσοστό υγρασίας. Ζυγίστηκαν επομένως από 3 δείγματα για το νωπό και τον κατεργασμένο ιστό, λαμβάνοντας υπόψη την υγρασία, ούτως ώστε να έχουμε μια κοινή βάση για σύγκριση (γύρω στα 200 mg ξηρού βάρους), σύμφωνα με τα δεδομένα που ακολουθούν στον παρακάτω πίνακα (το υπολογισμένο ξηρό βάρος στις παρενθέσεις).

Πιπεριά	Νωπός ιστός	Αποξηραμένος ιστός 6 h SCD (mg)
1	388.7 (200.9)	235.1 (213.3)
2	490.0 (253.2)	235.2 (213.4)
3	440.0 (227.4)	236.3 (214.6)

Σε όλα τα δείγματα προστέθηκαν 5 ml 80% MeOH και ακολούθησε vortex για 1 min, εν συνεχεία επώαση σε υπερήχους για 30 min και ανάδευση για άλλα 30 min. Τα μίγματα αποθηκεύτηκαν στους 4°C όλη νύχτα και φυγοκεντρήθηκαν στις 4000 rpm για 10 min, από όπου παραλήφθηκαν τα εκχυλίσματα τα οποία και αποθηκεύτηκαν στους -20°C για τις δοκιμές των αντιοξειδωτικών μετρήσεων (περιεχόμενο ολικών υδατοδιαλυτών φαινολών και αντιοξειδωτικού δυναμικού).

Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα προκαταρκτικά πειράματα στους ιστούς των λαχανοκομικών προϊόντων μελιτζάνας και πιπεριάς συμπεραίνονται τα παρακάτω:

1. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο ξήρανσης SCD φαίνεται να υιοθετείται καλά για τον ιστό της μελιτζάνας.
2. Οι δύο ιστοί της μελιτζάνας δε φαίνεται να διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς τη συμπεριφορά αποξήρανσης και ως εκ τούτου δεν απαιτείται ο διαχωρισμός τους κατά την προετοιμασία του προϊόντος προ ξήρανσης.
3. Πιθανόν να απαιτείται κάποια προ-μεταχείριση του ιστού της μελιτζάνας με κάποιο παράγοντα ώστε να περιοριστεί το μαύρισμα του καρπού (εξαιτίας της οξειδωσής του).
4. Το προτεινόμενο πρωτόκολλο ξήρανσης SCD χρήζει περαιτέρω βελτιστοποίησης στην περίπτωση της πιπεριάς, ενδεχομένως με τροποποίηση της θερμοκρασίας που εφαρμόζεται στο δοχείο είτε της πίεσης του CO₂ για τη διατήρηση καλύτερου χρώματος και υφής του τελικού προϊόντος.

Βιβλιογραφία

- Guiné, R. P., Barroca, M. J., & Lima, M. J. R. (2011). Comparative study of the drying of pears using different drying systems. *International Journal of Fruit Science*, 11(1), 55-73.
- Benali, M., & Boumghar, Y. (2014). Supercritical fluid-assisted drying. *Handbook of Industrial Drying*, 4th ed.; Mujumdar, AS, Ed, 1261-1270.
- Peach, J., & Eastoe, J. (2014). Supercritical carbon dioxide: a solvent like no other. *Beilstein journal of organic chemistry*, 10(1), 1878-1895.
- Pravallika, K., Chakraborty, S., & Singhal, R. S. (2023). Supercritical drying of food products: An insightful review. *Journal of Food Engineering*, 343, 111375.
- Rezaei, F., & Vander Gheynst, J. S. (2010). Critical moisture content for microbial growth in dried food-processing residues. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(12), 2000-2005.
- Alp, D., & Bulantekin, Ö. (2021). The microbiological quality of various foods dried by applying different drying methods: a review. *European Food Research and Technology*, 247(6), 1333-1343.
- Afolabi, I. S. (2014). Moisture migration and bulk nutrients interaction in a drying food systems: a review. *Food and Nutrition Sciences*, 2014.
- Sahar, N., Arif, S., Iqbal, S., Afzal, Q. U. A., Aman, S., Ara, J., & Ahmed, M. (2015). Moisture content and its impact on aflatoxin levels in ready-to-use red chillies. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 8(1), 67-72.