



## **ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ**

### **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**«Μελέτη αποδοτικότητας και συντηρησιμότητας  
διαχωριστήρων για τη βελτιστοποίηση παραγωγής αιθέριου ελαίου  
πορτοκαλιού»**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ ΧΡΟΝΗ**

Επιβλέπων: **ΘΕΟΔΩΡΟΣ ΒΑΡΖΑΚΑΣ**

Β' Αξιολογητής: **ΘΩΜΑΣ ΜΠΙΝΤΣΗΣ**

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Μελέτη αποδοτικότητας και συντηρησιμότητας διαχωριστήρων για τη βελτιστοποίηση παραγωγής αιθέριου ελαίου πορτοκαλιού» εστιάζει στην αξιολόγηση της αποδοτικότητας της διεργασίας ανάκτησης αιθέριου ελαίου πορτοκαλιού σε βιομηχανικό περιβάλλον, με ιδιαίτερη έμφαση στη λειτουργική συμπεριφορά των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων. Η αποτελεσματική λειτουργία της συγκεκριμένης διεργασίας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης και τη διασφάλιση της ποιότητας του τελικού προϊόντος.

Αρχικά, παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με την έννοια της ποιότητας και τον Στατιστικό Έλεγχο Διεργασιών, καθώς και οι βασικές αρχές που διέπουν τη μελέτη της μεταβλητότητας στις βιομηχανικές διεργασίες. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά στο βιομηχανικό περιβάλλον εφαρμογής, με περιγραφή της παραγωγικής διαδικασίας επεξεργασίας εσπεριδοειδών και των βασικών σταδίων που οδηγούν στην ανάκτηση του αιθέριου ελαίου.

Η εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση δεδομένων που προέρχονται από πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, τα οποία περιλαμβάνουν την αποδοτικότητα της ανάκτησης αιθέριου ελαίου, λειτουργικές παραμέτρους όπως η πίεση και η παροχή νερού, καθώς και μεταβλητές που σχετίζονται με την πρώτη ύλη και τη λειτουργία του εξοπλισμού. Μέσω της επεξεργασίας των δεδομένων αυτών επιδιώκεται η κατανόηση της συμπεριφοράς της διεργασίας και η διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοσή της.

Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση της διεργασίας, με στόχο την αποτύπωση της μεταβλητότητας και την αξιολόγηση της σταθερότητας της λειτουργίας. Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την αναγνώριση προτύπων συμπεριφοράς, καθώς και τον εντοπισμό αποκλίσεων από τη συνήθη λειτουργία, οι οποίες σχετίζονται με την επίδραση ειδικών παραγόντων.

Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι η διεργασία παραγωγής αιθέριου ελαίου παρουσιάζει, στο μεγαλύτερο μέρος του χρόνου, σταθερή και επαναλαμβανόμενη λειτουργία, υποδηλώνοντας την ύπαρξη ενός βασικού πλαισίου κανονικής λειτουργίας. Ωστόσο, παρατηρούνται σποραδικές αλλά έντονες αποκλίσεις, οι οποίες επηρεάζουν την αποδοτικότητα της διεργασίας και συνδέονται με την επίδραση μεταβλητών που διαφοροποιούνται κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Τα ευρήματα αυτά καταδεικνύουν ότι

η αποδοτικότητα δεν καθορίζεται από έναν μεμονωμένο παράγοντα, αλλά αποτελεί αποτέλεσμα της συνδυαστικής επίδρασης πολλαπλών παραμέτρων.

Συνολικά, η εργασία αναδεικνύει τη σημασία της συστηματικής παρακολούθησης της διεργασίας παραγωγής αιθέριου ελαίου και της αξιοποίησης στατιστικών εργαλείων για την κατανόηση της μεταβλητότητας και τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας σε βιομηχανικές συνθήκες.

### **Λέξεις κλειδιά**

Αιθέριο έλαιο πορτοκαλιού, φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες, αποδοτικότητα διαχωρισμού, συντηρησιμότητα, Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών (SPC).

## **Abstract**

This thesis, entitled “Efficiency and Maintainability of Centrifugal Separators in the Industrial Production of Orange Essential Oil”, focuses on the evaluation of process efficiency in the industrial recovery of orange essential oil, with particular emphasis on the operational behavior of centrifugal separators. Ensuring high efficiency in this process is crucial for maximizing yield and maintaining consistent product quality in industrial conditions.

The main objective of the study is to investigate process variability and to identify the factors affecting the efficiency of essential oil recovery. For this purpose, real operational data collected from daily industrial production were analyzed. The dataset includes process efficiency indicators, operational parameters such as water pressure and flow rate, as well as variables related to raw material characteristics and equipment operation.

The analysis of the data reveals that the process operates under generally stable conditions for the majority of the observed period, indicating the existence of a consistent baseline performance. However, sporadic but significant deviations from normal operation were identified. These deviations cannot be attributed solely to random variability and are likely associated with the influence of specific factors affecting the process performance at particular moments.

The findings suggest that the efficiency of essential oil production is not determined by a single dominant factor, but rather by the combined effect of multiple interacting variables. Therefore, improving process performance requires a systematic approach to monitoring and analyzing variability, as well as targeted investigation of the causes leading to deviations from normal operating conditions.

Overall, this study highlights the importance of data-driven analysis and statistical process monitoring in understanding process behavior and enhancing efficiency in industrial essential oil production system.

## **Keywords**

Orange essential oil, centrifugal separators, separation efficiency, maintenance, Statistical Process Control (SPC).

## Περιεχόμενα

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Περίληψη .....                                                                                                      | 1  |
| Λέξεις κλειδιά .....                                                                                                | 2  |
| Abstract .....                                                                                                      | 3  |
| Keywords .....                                                                                                      | 3  |
| Πίνακας Συντομογραφιών .....                                                                                        | 7  |
| Πίνακας πινάκων .....                                                                                               | 7  |
| Πίνακας εικόνων .....                                                                                               | 8  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                                                                           | 10 |
| 1.1 Γενικό Πλαίσιο και Σημασία της Παραγωγής Αιθέριου Ελαίου Πορτοκαλιού .....                                      | 10 |
| 1.2 Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών στη Βιομηχανική Παραγωγή .....                                                   | 11 |
| 1.3 Σημασία του αιθέριου ελαίου στη βιομηχανική επεξεργασία πορτοκαλιού .....                                       | 13 |
| 1.4 Ποιοτικός έλεγχος αιθέριων ελαίων εσπεριδοειδών .....                                                           | 14 |
| 1.5 Το πορτοκάλι ως πρώτη ύλη .....                                                                                 | 15 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΧΥΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ..... | 18 |
| 2.1 Στατιστικός έλεγχος διεργασιών σε συνεχείς διεργασίες διαχωρισμού .....                                         | 18 |
| 2.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταβλητότητα της διεργασίας φυγοκεντρικού διαχωρισμού .....                     | 19 |
| 2.1.1.1 Ιδιότητες τροφοδοσίας και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά .....                                                 | 19 |
| 2.1.1.2 Λειτουργικές συνθήκες διεργασίας .....                                                                      | 20 |
| 2.1.1.3 Κατάσταση εξοπλισμού και συντηρησιμότητα .....                                                              | 20 |
| 2.1.2 Μετρήσιμες μεταβλητές και δείκτες στατιστικού ελέγχου στους φυγοκεντρικούς διαχωριστήρες .....                | 21 |
| 2.1.2.1 Μεταβλητές που σχετίζονται με την ποιότητα του προϊόντος .....                                              | 21 |
| 2.1.2.2 Λειτουργικές μεταβλητές διεργασίας .....                                                                    | 22 |
| 2.1.2.3 Δείκτες απόδοσης και αξιοπιστίας εξοπλισμού .....                                                           | 23 |
| 2.1.3 Διαγράμματα ελέγχου και στατιστικές μέθοδοι παρακολούθησης της διεργασίας .....                               | 23 |
| 2.2 Διεργασίες χυμοποίησης πορτοκαλιού .....                                                                        | 25 |
| 2.2.1 Γενική επισκόπηση της βιομηχανικής διεργασίας .....                                                           | 25 |
| 2.2.2 Παραλαβή και προετοιμασία καρπών .....                                                                        | 25 |
| 2.2.3 Εκχύλιση χυμού .....                                                                                          | 26 |
| 2.2.4 Διαύγαση του χυμού .....                                                                                      | 26 |
| 2.2.5 Ανάκτηση αιθέριου ελαίου πορτοκαλιού .....                                                                    | 27 |
| 2.2.6 Διαχείριση στερεών υπολειμμάτων και υποπροϊόντων .....                                                        | 29 |
| 2.2.7 Συνοπτική παρουσίαση σταδίων χυμοποίησης .....                                                                | 29 |
| 2.3 Προϊόντα και υποπροϊόντα από την επεξεργασία πορτοκαλιού .....                                                  | 31 |
| 2.4 Παράμετροι ποιότητας χυμού πορτοκαλιού και λειτουργική τους σημασία .....                                       | 34 |
| 2.4.1 Σάκχαρα, οξύτητα και λόγος Brix/οξύς .....                                                                    | 35 |
| 2.4.2 Θολό και πολτός του χυμού πορτοκαλιού .....                                                                   | 35 |

|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.3 Γεύση, πτητικά συστατικά και περιεκτικότητα σε έλαιο του χυμού πορτοκαλιού .....         | 36        |
| 2.5 Τεχνολογίες ανάκτησης αιθέριου ελαίου φλούδας πορτοκαλιού .....                            | 38        |
| 2.5.1 Γαλάκτωμα ελαίου-νερού .....                                                             | 38        |
| 2.5.2 Πρωτογενής φυγοκεντρικός διαχωρισμός ελαίου .....                                        | 39        |
| 2.5.3 Δευτερογενής φυγοκεντρικός διαχωρισμός και τελικός καθαρισμός αιθέριου ελαίου .....      | 40        |
| 2.5.4 Διεργασία καθίζησης αιθέριου ελαίου.....                                                 | 41        |
| 2.5.5 Ανάκτηση d-λιμονενίου από το υδατικό κλάσμα μετά τη φυγοκέντρωση .....                   | 43        |
| 2.5.6 Ανάκτηση αρωματικών κλασμάτων και σχέση με το αιθέριο έλαιο .....                        | 44        |
| 2.6 Τεχνολογία φυγοκεντρικών διαχωριστήρων και αρχή λειτουργίας .....                          | 45        |
| 2.6.1 Φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες δίσκων .....                                                 | 46        |
| 2.6.2 Αρχή λειτουργίας φυγοκεντρικού διαχωριστήρα δίσκων .....                                 | 47        |
| 2.6.3 Κατανομή ροής και συμπεριφορά σταγονιδίων σε διαχωριστήρες δίσκων.....                   | 48        |
| 2.6.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα διαχωρισμού .....                            | 49        |
| 2.6.5 Τύποι φυγοκεντρικών διαχωριστήρων και κριτήρια επιλογής.....                             | 50        |
| 2.6.6 Λειτουργικοί περιορισμοί και προβλήματα λειτουργίας φυγοκεντρικών διαχωριστήρων .....    | 51        |
| 2.6.7 Εφαρμογή φυγοκεντρικών διαχωριστήρων στη βιομηχανία επεξεργασίας πορτοκαλιού.....        | 52        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ ....</b>           | <b>56</b> |
| 3.1 Διαδικασία δειγματοληψίας και μετρήσεων .....                                              | 56        |
| 3.2 Λειτουργικά δεδομένα και προκαθορισμένα όρια ελέγχου.....                                  | 57        |
| 3.2.1 Ορισμός μεταβλητών διεργασίας.....                                                       | 57        |
| 3.3 Καταγραφή και παρακολούθηση συντηρήσεων και βλαβών.....                                    | 61        |
| 3.4 Στατιστική επεξεργασία και μαθηματική θεμελίωση της ανάλυσης .....                         | 63        |
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>                                    | <b>65</b> |
| 4.1 Περιγραφή δεδομένων .....                                                                  | 65        |
| 4.2 Γραφική ανάλυση των δεδομένων της διεργασίας.....                                          | 65        |
| 4.2.1 Ανάλυση αποδοτικότητας διαχωρισμού .....                                                 | 66        |
| 4.2.1.1 Ιστόγραμμα αποδοτικότητας διαχωρισμού .....                                            | 67        |
| 4.2.1.2 Θηκόγραμμα αποδοτικότητας διαχωρισμού .....                                            | 69        |
| 4.2.1.3 Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης αποδοτικότητας διαχωρισμού.....                            | 70        |
| 4.3 Αξιολόγηση σταθερότητας της διεργασίας.....                                                | 72        |
| 4.3.1 Διάγραμμα I-MR για την απόδοση αιθέριου ελαίου .....                                     | 73        |
| 4.4 Συσχέτιση μεταβλητότητας διεργασίας με τις εργασίες συντήρησης .....                       | 74        |
| 4.5 Στατιστική διερεύνηση της απόδοσης αιθέριου ελαίου .....                                   | 76        |
| 4.5.1 Ιστόγραμμα κατανομής απόδοσης αιθέριου ελαίου .....                                      | 76        |
| 4.5.2 Θηκόγραμμα απόδοσης αιθέριου ελαίου.....                                                 | 78        |
| 4.6 Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας διαχωρισμού και απόδοσης αιθέριου ελαίου ..... | 79        |
| 4.7 Επίδραση της πτώσης πίεσης (ΔΡ) στην αποδοτικότητα διαχωρισμού.....                        | 81        |
| 4.7.1 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία ΔΡ .....                                    | 83        |

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.7.2 Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την επίδραση της πτώσης πίεσης (ΔΡ).....          | 85  |
| 4.8 Επίδραση παροχής τροφοδοσίας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού .....                   | 87  |
| 4.8.1 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία παροχής τροφοδοσίας .....            | 88  |
| 4.8.2 Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την επίδραση της παροχής τροφοδοσίας.....         | 89  |
| 4.9 Επίδραση παρουσίας πούλπας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού .....                     | 91  |
| 4.9.1 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία παρουσίας πούλπας .....              | 91  |
| 4.9.2 Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την επίδραση της πούλπας .....                    | 93  |
| 4.10 Επίδραση του ποσοστού νερού τροφοδοσίας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού.....        | 95  |
| 4.10.1 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία ποσοστού νερού .....                | 96  |
| 4.10.2 Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την επίδραση του ποσοστού νερού.....             | 98  |
| Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα και προτάσεις.....                                              | 101 |
| 5.1 Συμπεράσματα.....                                                                   | 101 |
| 5.2 Προτάσεις βελτιστοποίησης της διεργασίας.....                                       | 103 |
| Βιβλιογραφία .....                                                                      | 105 |
| Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία.....                                                          | 105 |
| Ξενόγλωσση βιβλιογραφία .....                                                           | 105 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....                                                                       | 108 |
| Καταγραφές συντήρησης φυγοκεντρικών διαχωριστήρων .....                                 | 108 |
| Παράρτημα Α.1 – Καταγραφή τεχνικής επέμβασης (17-11-2025).....                          | 108 |
| Παράρτημα Α.2 – Εργασίες συντήρησης και καθαρισμού (03-11-2025) .....                   | 111 |
| Παράρτημα Α.3 – Τεχνικός έλεγχος και αντικατάσταση εξαρτημάτων (10-12-2025) .....       | 112 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Πρωτογενή δεδομένα λειτουργίας διεργασίας ανάκτησης αιθέριου ελαίου ..... | 113 |
| ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – Δεδομένα παραγωγής και απόδοσης αιθέριου ελαίου .....                     | 122 |

## Πίνακας Συντομογραφιών

|      |                                     |                                                 |
|------|-------------------------------------|-------------------------------------------------|
| SPC  | Statistical Process Control         | Στατιστικός Έλεγχος<br>Διεργασιών               |
| NFC  | Not From Concentrate                | Όχι από συμπύκνωμα                              |
| FCOJ | Frozen Concentrated Orange<br>Juice | Κατεψυγμένος συμπυκνωμένος<br>χυμός πορτοκαλιού |

## Πίνακας πινάκων

Πίνακας 1. Βασικά στάδια βιομηχανικής χυμοποίησης πορτοκαλιού και στόχος κάθε διεργασίας.....30

## Πίνακας εικόνων

|                                                                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΕΙΚΟΝΑ 1 ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΥΤΟΚΕΝΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗΡΩΝ (ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟ JBT FOODTECH, 2008).     | 53 |
| ΕΙΚΟΝΑ 2 ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΦΥΤΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗΡΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ. ....                       | 68 |
| ΕΙΚΟΝΑ 3 ΘΗΚΟΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΦΥΤΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗΡΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ .....                                 | 69 |
| ΕΙΚΟΝΑ 4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΦΥΤΟΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗΡΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ. .... | 71 |
| ΕΙΚΟΝΑ 5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ I-MR ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ.....                                                                                              | 73 |
| ΕΙΚΟΝΑ 6 ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ (‰) ΚΑΤΑ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ. ....                                     | 77 |
| ΕΙΚΟΝΑ 7 ΘΗΚΟΓΡΑΜΜΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ (‰). ....                                                                                   | 78 |
| ΕΙΚΟΝΑ 8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΜΕΣΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ. ....                                        | 80 |
| ΕΙΚΟΝΑ 9 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΙΑΣΠΟΡΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (ΔΡ) ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ.....                                                             | 82 |
| ΕΙΚΟΝΑ 10 ΜΕΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΤΩΣΗΣ ΠΙΕΣΗΣ (ΔΡ) ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ .....                                           | 84 |
| ΕΙΚΟΝΑ 11 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ΑΝΟΒΑ) ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΣΗΣ (ΔΡ).....                                  | 86 |
| ΕΙΚΟΝΑ 12 ΜΕΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΟΧΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ. ....                                          | 88 |
| ΕΙΚΟΝΑ 13 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ONE-WAY ΑΝΟΒΑ) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ.....               | 90 |

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ΕΙΚΟΝΑ 14 ΜΕΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΠΟΥΛΠΑΣ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ. ....                             | 92 |
| ΕΙΚΟΝΑ 15 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ONE-WAY ANOVA) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣ ΠΟΥΛΠΑΣ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ. .... | 94 |
| ΕΙΚΟΝΑ 16 ΜΕΣΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΜΕ ΡΑΒΔΟΥΣ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ. ....                                | 96 |
| ΕΙΚΟΝΑ 17 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ (ONE-WAY ANOVA) ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ. ....    | 99 |

## 1.1 Γενικό Πλαίσιο και Σημασία της Παραγωγής Αιθέριου Ελαίου Πορτοκαλιού

Η βιομηχανική επεξεργασία εσπεριδοειδών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους τομείς της βιομηχανίας τροφίμων, καθώς τα προϊόντα τους καταναλώνονται ευρέως και παρουσιάζουν υψηλή εμπορική αξία. Η αυξανόμενη ζήτηση για χυμούς και προϊόντα υψηλής διατροφικής αξίας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη της βιομηχανίας χυμοποίησης και, παράλληλα, στην παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων υποπροϊόντων, όπως φλοιοί, πολτός και σπόροι (Kimball, 1989, Tetra Pak, 2017). Τα υποπροϊόντα αυτά αντιστοιχούν σε σημαντικό ποσοστό της συνολικής μάζας του καρπού και πλέον δεν αντιμετωπίζονται αποκλειστικά ως απόβλητα, αλλά ως πιθανές πηγές φυσικών ενώσεων με υψηλή προστιθέμενη αξία.

Από τα σημαντικότερα προϊόντα που μπορούν να ανακτηθούν κατά την επεξεργασία των εσπεριδοειδών είναι το αιθέριο έλαιο πορτοκαλιού, το οποίο εντοπίζεται κυρίως στον εξωτερικό φλοιό του καρπού. Το αιθέριο έλαιο περιέχει κυρίως τερπενικές ενώσεις, με σημαντικότερο συστατικό το d-λιμονένιο, ενώ παράλληλα περιλαμβάνει φαινολικές και άλλες βιοδραστικές ουσίες που σχετίζονται με αντιοξειδωτικές και αντιμικροβιακές ιδιότητες (Vasquez-Gomez et al., 2024). Χάρη στα χαρακτηριστικά αυτά, χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων, στα καλλυντικά και σε φαρμακευτικές εφαρμογές.

Η αξιοποίηση των υποπροϊόντων της χυμοποίησης συνδέεται άμεσα με σύγχρονες πρακτικές βιώσιμης ανάπτυξης και κυκλικής οικονομίας, καθώς συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων και στη βελτίωση της οικονομικής αποδοτικότητας της παραγωγικής διαδικασίας (Zema et al., 2020). Για τον λόγο αυτό, η ανάκτηση αιθέριου ελαίου αποτελεί σημαντικό στάδιο της βιομηχανικής επεξεργασίας πορτοκαλιού και επηρεάζει τόσο την ποιότητα όσο και την εμπορική αξία του τελικού προϊόντος.

Στη βιομηχανική επεξεργασία εσπεριδοειδών, βασικό ρόλο στη διαδικασία διαχωρισμού έχουν οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες. Οι διαχωριστήρες αυτοί χρησιμοποιούνται για τον διαχωρισμό υγρών

φάσεων διαφορετικής πυκνότητας μέσω της ανάπτυξης φυγόκεντρων δυνάμεων και αποτελούν βασικό εξοπλισμό στις γραμμές παραγωγής αιθέριου ελαίου (Dong et al., 2024). Η λειτουργία τους επηρεάζεται από παράγοντες όπως η παροχή τροφοδοσίας, η θερμοκρασία, τα χαρακτηριστικά του γαλακτώματος και οι συνθήκες ροής. Μεταβολές στις παραμέτρους αυτές μπορούν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού και να οδηγήσουν σε απώλειες προϊόντος ή σε διαφοροποιήσεις στην ποιότητα του παραγόμενου ελαίου.

Η αξιολόγηση της λειτουργίας των φυγόκεντρικών διαχωριστήρων αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα βιομηχανικής λειτουργίας. Η συνεχής καταγραφή και ανάλυση δεδομένων επιτρέπει την παρακολούθηση της μεταβλητότητας της διεργασίας και τη διερεύνηση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση του διαχωρισμού. Μέσα από αυτή τη διαδικασία καθίσταται δυνατή η καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της διεργασίας και η υποστήριξη ενεργειών βελτιστοποίησης της λειτουργίας του εξοπλισμού σε πραγματικές συνθήκες παραγωγής.

## 1.2 Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών στη Βιομηχανική Παραγωγή

Ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών (Statistical Process Control – SPC) αποτελεί μία από τις βασικότερες μεθόδους παρακολούθησης και αξιολόγησης βιομηχανικών διεργασιών, καθώς επιτρέπει τη συστηματική ανάλυση δεδομένων με στόχο τον έλεγχο της σταθερότητας και της απόδοσης μιας παραγωγικής διαδικασίας. Μέσω της συνεχούς συλλογής και επεξεργασίας λειτουργικών δεδομένων καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός μεταβολών που ενδέχεται να επηρεάσουν την ποιότητα του προϊόντος ή την αποδοτικότητα της παραγωγής (Montgomery, 2019, Oakland, 2007).

Η λειτουργία κάθε βιομηχανικής διεργασίας συνοδεύεται από ένα επίπεδο φυσιολογικής μεταβλητότητας, το οποίο προκύπτει από τις συνήθεις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος. Ωστόσο, μπορούν να εμφανιστούν και αποκλίσεις που σχετίζονται με ειδικές αιτίες, όπως δυσλειτουργίες εξοπλισμού, μεταβολές στα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης ή αλλαγές στις συνθήκες επεξεργασίας. Η διάκριση μεταξύ φυσιολογικών και μη φυσιολογικών μεταβολών είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς

επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση προβλημάτων και τη λήψη διορθωτικών ενεργειών πριν επηρεαστεί ουσιαστικά η διεργασία (Montgomery, 2019).

Στην πράξη, ο SPC εφαρμόζεται κυρίως μέσω διαγραμμάτων ελέγχου και δεικτών ικανότητας διεργασίας. Τα διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση κρίσιμων μεταβλητών στον χρόνο και διευκολύνουν τον εντοπισμό ασυνήθιστων αποκλίσεων από τη συνήθη συμπεριφορά του συστήματος. Παράλληλα, οι δείκτες ικανότητας διεργασίας παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη δυνατότητα μιας διεργασίας να ανταποκρίνεται στις απαιτούμενες προδιαγραφές ποιότητας (Montgomery, 2019, Zwetsloot et al., 2024).

Η συνεχής παρακολούθηση λειτουργικών δεδομένων επιτρέπει την αξιολόγηση μεταβλητών όπως η συγκέντρωση αιθέριου ελαίου, η καθαρότητα των διαχωριζόμενων φάσεων και οι απώλειες προϊόντος κατά την επεξεργασία. Μέσα από τη στατιστική ανάλυση των δεδομένων μπορούν να εντοπιστούν δυσμενείς τάσεις ή αποκλίσεις πριν αυτές επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση της διεργασίας ή την ποιότητα του τελικού προϊόντος (Oakland, 2007, Quinino et al., 2021). Παράλληλα, η αξιοποίηση δεδομένων που σχετίζονται με τη λειτουργία και τη συντήρηση του εξοπλισμού συμβάλλει στη βελτίωση της διαθεσιμότητας των μηχανημάτων και στην ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών στρατηγικών προληπτικής συντήρησης (Salmasnia et al., 2024).

Συνεπώς, ο SPC αποτελεί βασικό εργαλείο για την κατανόηση και τη βελτιστοποίηση βιομηχανικών διεργασιών διαχωρισμού. Η αξιοποίηση πραγματικών δεδομένων λειτουργίας συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του συστήματος και υποστηρίζει τη λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με τη σταθερότητα της παραγωγής, τη μείωση των απωλειών και τη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας της διεργασίας.

### 1.3 Σημασία του αιθέριου ελαίου στη βιομηχανική επεξεργασία πορτοκαλιού

Το αιθέριο έλαιο πορτοκαλιού αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προϊόντα που προκύπτουν από τη βιομηχανική επεξεργασία εσπεριδοειδών, καθώς συνδέεται άμεσα τόσο με την ποιότητα του χυμού όσο και με την αξιοποίηση των παραγόμενων υποπροϊόντων. Προέρχεται κυρίως από τον φλοιό του καρπού, ο οποίος αντιστοιχεί σε σημαντικό ποσοστό της συνολικής μάζας των εσπεριδοειδών, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της αξιοποίησης των υπολειμμάτων της χυμοποίησης για την παραγωγή προϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας (Kimball, 1989, Vasquez-Gomez et al., 2024).

Το αρωματικό προφίλ των χυμών εσπεριδοειδών επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση των αιθέριων ελαίων και των πτητικών ενώσεων που περιέχονται στον χυμό. Ενώσεις όπως το d-λιμονένιο, η κιτράλη και διάφοροι εστέρες συμβάλλουν σημαντικά στη διαμόρφωση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών του προϊόντος και επηρεάζουν το άρωμα και τη γεύση του χυμού (Kimball, 1989). Παράλληλα, τα αιθέρια έλαια περιέχουν φαινολικές ενώσεις, φλαβονοειδή και άλλα βιοδραστικά συστατικά που σχετίζονται με αντιοξειδωτικές και αντιμικροβιακές ιδιότητες, γεγονός που αυξάνει το ενδιαφέρον για τη βιομηχανική αξιοποίησή τους (Vasquez-Gomez et al., 2024).

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των αιθέριων ελαίων, όπως η πυκνότητα, το ιξώδες και η σταθερότητά τους, επηρεάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά τους κατά την επεξεργασία και την αποθήκευση. Οι ιδιότητες αυτές επηρεάζουν τη σταθερότητα των γαλακτωμάτων και τη λειτουργία των διεργασιών διαχωρισμού, ιδιαίτερα σε συστήματα φυγοκεντρικού διαχωρισμού όπου η αποτελεσματικότητα της διεργασίας εξαρτάται από τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ των φάσεων και τη διασπορά των σταγονιδίων. Για τον λόγο αυτό, η κατανόηση των χαρακτηριστικών του αιθέριου ελαίου είναι σημαντική για τη βελτιστοποίηση της βιομηχανικής επεξεργασίας (Dong et al., 2024, Vasquez-Gomez et al., 2024).

Η ανάκτηση του αιθέριου ελαίου μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορες τεχνικές εκχύλισης και διαχωρισμού, όπως η μηχανική έκθλιψη, η υδροαπόσταξη και άλλες σύγχρονες μέθοδοι επεξεργασίας. Η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου επηρεάζει τόσο την απόδοση της διεργασίας όσο και τη χημική σύσταση

του παραγόμενου ελαίου, γεγονός που καθιστά το στάδιο αυτό ιδιαίτερα σημαντικό για τη διατήρηση της ποιότητας του τελικού προϊόντος (Vasquez-Gomez et al., 2024).

Η περιεκτικότητα του αιθέριου ελαίου στον χυμό αποτελεί σημαντική παράμετρο ποιοτικού ελέγχου, καθώς επηρεάζει άμεσα τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και τη συνολική ποιότητα του τελικού προϊόντος. Υψηλές συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσουν ανεπιθύμητες αισθητηριακές μεταβολές, γεγονός που καθιστά απαραίτητο τον ακριβή έλεγχο της διεργασίας διαχωρισμού κατά τη βιομηχανική επεξεργασία (Tetra Pak, 2017). Συνεπώς, η κατανόηση των ιδιοτήτων του αιθέριου ελαίου και των παραγόντων που επηρεάζουν την ανάκτησή του αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διασφάλιση σταθερής ποιότητας και αποδοτικής λειτουργίας της παραγωγικής διαδικασίας.

## 1.4 Ποιοτικός έλεγχος αιθέριων ελαίων εσπεριδοειδών

Η ποιότητα των αιθέριων ελαίων εσπεριδοειδών αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη βιομηχανική επεξεργασία, καθώς η χημική σύσταση και η σταθερότητα των πτητικών ενώσεων επηρεάζουν άμεσα τόσο τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά όσο και την εμπορική αξία του τελικού προϊόντος (Σαρού, 2013). Για τη διατήρηση σταθερής ποιότητας απαιτείται συστηματική παρακολούθηση της πρώτης ύλης και έλεγχος των παραμέτρων που μπορούν να επηρεάσουν τη σύσταση των αιθέριων ελαίων κατά την παραγωγική διαδικασία (Vasquez-Gomez et al., 2024).

Η χημική σύσταση των αιθέριων ελαίων μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος και την ποικιλία των εσπεριδοειδών, καθώς και με το στάδιο ωρίμανσης του καρπού και τις συνθήκες καλλιέργειας. Παράγοντες όπως η υδατική διαθεσιμότητα, οι εδαφικές ιδιότητες και οι καλλιεργητικές πρακτικές είναι δυνατόν να επηρεάσουν τόσο τη συνολική περιεκτικότητα του αιθέριου ελαίου όσο και την αναλογία των επιμέρους συστατικών του (Σαρού, 2013· Saini et al., 2022). Οι διαφοροποιήσεις αυτές επηρεάζουν τη σταθερότητα και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την αξιολόγηση της πρώτης ύλης πριν από τη βιομηχανική επεξεργασία (Tetra Pak, 2017).

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στην παρουσία φαινολικών ενώσεων και φλαβονοειδών, καθώς οι ενώσεις αυτές σχετίζονται με τη βιοδραστικότητα και την αντιοξειδωτική ικανότητα των αιθέριων ελαίων (Vasquez-Gomez et al., 2024). Η συγκέντρωσή τους μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές μεταξύ διαφορετικών ειδών και ποικιλιών εσπεριδοειδών, επηρεάζοντας τόσο τη σταθερότητα όσο και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων ελαίων (Σαρού, 2013). Για τον λόγο αυτό, οι συγκεκριμένες ενώσεις χρησιμοποιούνται συχνά ως δείκτες αξιολόγησης της ποιότητας των αιθέριων ελαίων στη βιομηχανία τροφίμων και ποτών (Vasquez-Gomez et al., 2024).

Ο ποιοτικός έλεγχος των αιθέριων ελαίων πραγματοποιείται μέσω φυσικοχημικών και αναλυτικών μεθόδων που επιτρέπουν τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης και των βασικών χαρακτηριστικών του προϊόντος (Salvatore et al., 2022). Στη βιομηχανική πρακτική, μία από τις παραμέτρους που παρακολουθούνται είναι και η περιεκτικότητα σε αλδεΰδες, η οποία χρησιμοποιείται ως δείκτης ποιότητας και καταγράφεται στα πιστοποιητικά ανάλυσης του παραγόμενου αιθέριου ελαίου. Οι αλδεΰδες αποτελούν σημαντικά πτητικά συστατικά των αιθέριων ελαίων εσπεριδοειδών και συμβάλλουν σημαντικά στα αρωματικά χαρακτηριστικά και στη συνολική ποιότητα του προϊόντος (Salvatore et al., 2022).

Παράλληλα, η αξιολόγηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών συνοδεύεται συχνά από τη χρήση στατιστικών μεθόδων ανάλυσης, οι οποίες επιτρέπουν τη σύγκριση διαφορετικών δειγμάτων και τη μελέτη της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων τους (Montgomery, 2019). Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των αιθέριων ελαίων και υποστηρίζει τον έλεγχο της σταθερότητας της παραγωγικής διαδικασίας σε βιομηχανικές συνθήκες (Vasquez-Gomez et al., 2024).

## 1.5 Το πορτοκάλι ως πρώτη ύλη

Η παραγωγή χυμού πορτοκαλιού σε παγκόσμιο επίπεδο συγκεντρώνεται κυρίως σε χώρες με ανεπτυγμένη γεωργική και βιομηχανική δραστηριότητα, όπως η Βραζιλία και οι Ηνωμένες Πολιτείες, όπου οι κλιματικές συνθήκες και οι καλλιεργητικές πρακτικές ευνοούν τη μαζική παραγωγή και επεξεργασία εσπεριδοειδών (Tetra Pak, 2017).

Η ποιότητα της πρώτης ύλης επηρεάζεται σημαντικά από την ποικιλία του πορτοκαλιού, τις συνθήκες καλλιέργειας και το στάδιο ωρίμανσης του καρπού. Ποικιλίες όπως οι Hamlin και Valencia χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία χυμού, καθώς παρουσιάζουν ικανοποιητική απόδοση σε χυμό και κατάλληλα χαρακτηριστικά για μηχανική επεξεργασία (Tetra Pak, 2017). Παράλληλα, κατά την ωρίμανση μεταβάλλονται η περιεκτικότητα σε χυμό, η συγκέντρωση αιθέριου ελαίου, το χρώμα του φλοιού και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του καρπού, γεγονός που επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Τα εσπεριδοειδή παρουσιάζουν ιδιαίτερο διατροφικό και βιοχημικό ενδιαφέρον, καθώς περιέχουν φαινολικές ενώσεις, φλαβονοειδή, καροτενοειδή, βιταμίνες και πηκτίνη, ενώ σημαντική είναι και η παρουσία αιθέριου ελαίου στον φλοιό του καρπού (Saini et al., 2022). Τα συστατικά αυτά συνδέονται τόσο με τη θρεπτική αξία του χυμού όσο και με τη δυνατότητα αξιοποίησης των υποπροϊόντων της βιομηχανικής επεξεργασίας.

Κατά τη διαδικασία χυμοποίησης παράγονται μεγάλες ποσότητες υποπροϊόντων, κυρίως φλοιού, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάκτηση αιθέριου ελαίου, πηκτίνης και άλλων βιοδραστικών ενώσεων υψηλής προστιθέμενης αξίας (Vilas Boas et al., 2025). Η αξιοποίηση των υποπροϊόντων αυτών συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων και ενισχύει τη συνολική αποδοτικότητα της βιομηχανίας εσπεριδοειδών.

Η χημική σύσταση του καρπού και η κατανομή των βιοδραστικών συστατικών μεταβάλλονται κατά την ανάπτυξη και την ωρίμανση του πορτοκαλιού. Οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν τόσο τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του χυμού όσο και τη δυνατότητα αξιοποίησης των παραγόμενων υποπροϊόντων κατά τη βιομηχανική επεξεργασία (Saini et al., 2022).

Η αξιολόγηση της καταλληλότητας του πορτοκαλιού ως βιομηχανικής πρώτης ύλης βασίζεται σε δείκτες που σχετίζονται με την ωρίμανση και τη χημική σύσταση του καρπού. Παράμετροι όπως η περιεκτικότητα σε χυμό, ο λόγος διαλυτών στερεών προς οργανικά οξέα, το χρώμα του φλοιού και η

συγκέντρωση αιθέριου ελαίου χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ποιότητας και της τεχνολογικής καταλληλότητας των καρπών για χυμοποίηση (Saini et al., 2022, Tetra Pak, 2017). Παράλληλα, οι συνθήκες αποθήκευσης και μετασυλλεκτικής διαχείρισης επηρεάζουν τη σταθερότητα των αρωματικών συστατικών και τη συνολική ποιότητα της πρώτης ύλης πριν από τη βιομηχανική επεξεργασία.

Η φυσική μεταβλητότητα της πρώτης ύλης μεταξύ διαφορετικών παρτίδων πορτοκαλιών μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποιήσεις στην απόδοση χυμού, στην περιεκτικότητα σε αιθέριο έλαιο και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Η μεταβλητότητα αυτή σχετίζεται με γενετικούς, περιβαλλοντικούς και καλλιεργητικούς παράγοντες και αναδεικνύει την ανάγκη συστηματικής παρακολούθησης της πρώτης ύλης κατά τη βιομηχανική επεξεργασία (Vilas Boas et al., 2025, Tetra Pak, 2017). Συνεπώς, η κατανόηση των χαρακτηριστικών του πορτοκαλιού ως πρώτης ύλης αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση σταθερής ποιότητας και την αποτελεσματική λειτουργία της παραγωγικής διαδικασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΧΥΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΡΤΟΚΑΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει το θεωρητικό υπόβαθρο που απαιτείται για την κατανόηση της βιομηχανικής χυμοποίησης πορτοκαλιού και των διεργασιών διαχωρισμού που εφαρμόζονται για την παραγωγή χυμού και την ανάκτηση αιθέριου ελαίου. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον ρόλο της σταθερότητας των διεργασιών και στη σημασία της παρακολούθησης κρίσιμων παραμέτρων λειτουργίας σε συνθήκες συνεχούς παραγωγής.

Αρχικά παρουσιάζονται οι βασικές αρχές του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών και η εφαρμογή τους σε συνεχείς διεργασίες διαχωρισμού, με στόχο την κατανόηση της μεταβλητότητας και τη διασφάλιση σταθερής ποιότητας προϊόντος. Στη συνέχεια αναλύονται τα κύρια στάδια της βιομηχανικής χυμοποίησης πορτοκαλιού, από την παραλαβή της πρώτης ύλης έως την ανάκτηση αιθέριου ελαίου και τη διαχείριση των υποπροϊόντων, ώστε να τεθεί το πλαίσιο μέσα στο οποίο εντάσσεται η μεθοδολογική προσέγγιση της παρούσας εργασίας.

### 2.1 Στατιστικός έλεγχος διεργασιών σε συνεχείς διεργασίες διαχωρισμού

Στις συνεχείς βιομηχανικές διεργασίες διαχωρισμού, η σταθερότητα της λειτουργίας εξαρτάται από την αλληλεπίδραση των φυσικών ιδιοτήτων της τροφοδοσίας, των συνθηκών λειτουργίας και της μηχανικής κατάστασης του εξοπλισμού. Οι παράγοντες αυτοί δημιουργούν μεταβλητότητα, η οποία επηρεάζει την αποδοτικότητα του διαχωρισμού, τη σύσταση των παραγόμενων ρευμάτων και τις απώλειες προϊόντος. Η συστηματική ανάλυση της μεταβλητότητας μέσω στατιστικών μεθόδων επιτρέπει την ποσοτική αξιολόγηση της σταθερότητας της διεργασίας και τον έγκαιρο εντοπισμό αποκλίσεων που σχετίζονται με λειτουργικές μεταβολές ή φαινόμενα φθοράς του εξοπλισμού (Montgomery, 2019, Dong et al., 2024).

Σε αντίθεση με τις διακριτές διεργασίες, στις συνεχείς διεργασίες η παραγωγή πραγματοποιείται αδιάλειπτα και η μεταβλητότητα εξελίσσεται δυναμικά στον χρόνο, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη

συνεχή παρακολούθηση κρίσιμων μεταβλητών. Η εφαρμογή του SPC σε τέτοια συστήματα βασίζεται στη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και στην αξιοποίηση εργαλείων όπως τα διαγράμματα ελέγχου, τα οποία επιτρέπουν την απεικόνιση της συμπεριφοράς της διεργασίας και τον εντοπισμό μη τυχαίων αποκλίσεων. Παράλληλα, η χρήση δεικτών ικανότητας διεργασίας συμβάλλει στην ποσοτική εκτίμηση της απόδοσης σε σχέση με προκαθορισμένα όρια ποιότητας (Montgomery, 2019).

Η ενσωμάτωση του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στη λειτουργία των συστημάτων αυτών επιτρέπει την παρακολούθηση κρίσιμων μεταβλητών, όπως η συγκέντρωση αιθέριου ελαίου στον χυμό, η καθαρότητα των διαχωριζόμενων φάσεων και οι απώλειες προϊόντος στα παραπροϊόντα. Μέσω της συνεχούς ανάλυσης των δεδομένων καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός δυσμενών τάσεων πριν αυτές οδηγήσουν σε σημαντική απόκλιση της διεργασίας από τα επιθυμητά επίπεδα λειτουργίας.

Συνεπώς, ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών σε συνεχείς διεργασίες διαχωρισμού αποτελεί βασικό εργαλείο για τη διασφάλιση της σταθερότητας, την έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των βιομηχανικών συστημάτων, συμβάλλοντας άμεσα στη βελτίωση της ποιότητας και της αποδοτικότητας της παραγωγικής διαδικασίας.

### **2.1.1 Παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταβλητότητα της διεργασίας φυγοκεντρικού διαχωρισμού**

Η αποδοτικότητα των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων καθορίζεται από μεταβλητές της τροφοδοσίας, των συνθηκών λειτουργίας και της κατάστασης του εξοπλισμού, οι οποίες επηρεάζουν άμεσα τη μεταβλητότητα της διεργασίας και την απόδοση διαχωρισμού. Η κατανόηση των παραγόντων αυτών αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματική εφαρμογή μεθόδων στατιστικού ελέγχου και τη διατήρηση σταθερής λειτουργίας (Montgomery, 2019).

#### **2.1.1.1 Ιδιότητες τροφοδοσίας και φυσικοχημικά χαρακτηριστικά**

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες του μίγματος που οδηγείται στον διαχωριστήρα επηρεάζουν άμεσα τη δυναμική συμπεριφορά της ροής και την αποτελεσματικότητα του φυγοκεντρικού διαχωρισμού. Παράμετροι όπως το ιξώδες, η πυκνότητα, η θερμοκρασία και η κατανομή μεγέθους σταγονιδίων του

γαλακτώματος καθορίζουν την ταχύτητα μετακίνησης των φάσεων στο εσωτερικό του πεδίου φυγοκέντρωσης. Μεταβολές στις ιδιότητες αυτές μπορούν να μεταβάλλουν τη διεπιφανειακή συμπεριφορά και να επηρεάσουν την πιθανότητα συγχώνευσης ή επαναδιασποράς των σταγονιδίων, οδηγώντας σε διαφοροποιήσεις της απόδοσης διαχωρισμού (Dong et al., 2024).

Στη βιομηχανική επεξεργασία πορτοκαλιού, οι ιδιότητες της τροφοδοσίας επηρεάζονται επιπλέον από τη φυσική μεταβλητότητα της πρώτης ύλης, όπως το στάδιο ωρίμανσης, η περιεκτικότητα σε αιθέριο έλαιο και η σύσταση των στερεών συστατικών του χυμού. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να επηρεάσουν τη δημιουργία γαλακτωμάτων και τη σταθερότητα των διαχωριζόμενων φάσεων, καθιστώντας αναγκαία τη συνεχή παρακολούθηση της διεργασίας για τη διατήρηση σταθερής ποιότητας προϊόντος (Tetra Pak, 2017).

### **2.1.1.2 Λειτουργικές συνθήκες διεργασίας**

Οι συνθήκες λειτουργίας του διαχωριστήρα αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση της διεργασίας. Η παροχή τροφοδοσίας, η ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου, η θερμοκρασία λειτουργίας και οι πιέσεις εξόδου επηρεάζουν την κατανομή χρόνου παραμονής και την ένταση των φυγοκεντρικών δυνάμεων που δρουν στο μίγμα. Ακόμη και μικρές αποκλίσεις από τις βέλτιστες συνθήκες μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση των απωλειών ελαίου ή σε μείωση της καθαρότητας των διαχωριζόμενων ρευμάτων (Dong et al., 2024).

Η ανάγκη διατήρησης σταθερών λειτουργικών συνθηκών είναι ιδιαίτερα έντονη σε διεργασίες συνεχούς παραγωγής τροφίμων, όπου οι μεταβολές της διεργασίας επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα και την ομοιομορφία του τελικού προϊόντος. Για τον λόγο αυτό, η συστηματική παρακολούθηση κρίσιμων λειτουργικών παραμέτρων μέσω στατιστικών εργαλείων αποτελεί βασικό στοιχείο της βιομηχανικής πρακτικής (Montgomery, 2019).

### **2.1.1.3 Κατάσταση εξοπλισμού και συντηρησιμότητα**

Η μηχανική κατάσταση του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα επηρεάζει άμεσα τη σταθερότητα της διεργασίας και την απόδοση του διαχωρισμού. Φαινόμενα όπως φθορά μηχανικών εξαρτημάτων, ανισορροπία περιστρεφόμενων μερών, επικαθίσεις στερεών και ανεπαρκής καθαρισμός μπορούν να

οδηγήσουν σε σταδιακή υποβάθμιση της λειτουργίας. Η υποβάθμιση αυτή συχνά εκδηλώνεται ως αυξημένη μεταβλητότητα των παραμέτρων λειτουργίας ή ως μείωση της ανάκτησης αιθέριου ελαίου, πριν ακόμη εμφανιστούν εμφανείς βλάβες του εξοπλισμού (Svarovsky, 2000).

Η ανάλυση δεδομένων λειτουργίας και συντήρησης μέσω μεθόδων στατιστικού ελέγχου επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση τάσεων φθοράς και τη λήψη προληπτικών μέτρων συντήρησης. Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στη βελτίωση της διαθεσιμότητας του εξοπλισμού, στη μείωση των απρογραμμάτιστων διακοπών παραγωγής και στη διατήρηση σταθερής απόδοσης διαχωρισμού (Montgomery, 2019).

### **2.1.2 Μετρήσιμες μεταβλητές και δείκτες στατιστικού ελέγχου στους φυγοκεντρικούς διαχωριστήρες**

Η εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου διεργασιών σε συστήματα φυγοκεντρικού διαχωρισμού προϋποθέτει τον προσδιορισμό κατάλληλων μετρήσιμων μεταβλητών που αντανακλούν τη λειτουργική κατάσταση της διεργασίας και την ποιότητα των παραγόμενων ρευμάτων. Οι μεταβλητές αυτές πρέπει να είναι ευαίσθητες σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας, επαναλήψιμες ως προς τη μέτρηση και άμεσα συνδεδεμένες με την απόδοση του διαχωρισμού και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η επιλογή τους αποτελεί κρίσιμο στάδιο για την αξιόπιστη εφαρμογή μεθόδων στατιστικής παρακολούθησης σε βιομηχανικά περιβάλλοντα συνεχούς παραγωγής (Montgomery, 2019).

#### **2.1.2.1 Μεταβλητές που σχετίζονται με την ποιότητα του προϊόντος**

Στη βιομηχανική χυμοποίηση πορτοκαλιού, βασικό κριτήριο αξιολόγησης της λειτουργίας των διαχωριστήρων αποτελεί η συγκέντρωση αιθέριου ελαίου στον χυμό, καθώς και η κατανομή του μεταξύ των επιμέρους ρευμάτων της διεργασίας, δηλαδή των φάσεων που προκύπτουν κατά τον διαχωρισμό. Η περιεκτικότητα αυτή επηρεάζει άμεσα τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, τη σταθερότητα και τη συνολική εμπορική αξία του προϊόντος, ενώ ταυτόχρονα αποτελεί βασικό δείκτη της αποτελεσματικότητας της διεργασίας διαχωρισμού. Η συστηματική παρακολούθηση της συγκέντρωσης αιθέριου ελαίου, μέσω κατάλληλων στατιστικών εργαλείων, επιτρέπει την έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων από τις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας και τη λήψη διορθωτικών ενεργειών πριν την εμφάνιση ποιοτικής υποβάθμισης του χυμού. Η βέλτιστη λειτουργία των διαχωριστικών συστημάτων επιδιώκει την επίτευξη ισορροπίας μεταξύ

ποιότητας χυμού και ανάκτησης αιθέριου ελαίου, καθώς τόσο η ανεπαρκής όσο και η υπερβολική απομάκρυνση του ελαίου μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τη συνολική απόδοση της διεργασίας (Tetra Pak, 2017).

Επιπλέον, σημαντική μεταβλητή αποτελεί η καθαρότητα των διαχωριζόμενων φάσεων, η οποία σχετίζεται με την παρουσία στερεών σωματιδίων ή γαλακτωματοποιημένων σταγονιδίων σε ρεύματα που υπό ιδανικές συνθήκες θα έπρεπε να είναι διαυγή. Μεταβολές στην καθαρότητα υποδηλώνουν πιθανές διαταραχές στο εσωτερικό πεδίο ροής ή μη βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού. Οι μεταβολές αυτές επηρεάζουν τόσο την ποιότητα του τελικού προϊόντος όσο και την απόδοση ανάκτησης του αιθέριου ελαίου, καθιστώντας αναγκαία τη συνεχή παρακολούθησή τους (Dong et al., 2024).

Στο πλαίσιο του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, οι παραπάνω μεταβλητές μπορούν να παρακολουθούνται συστηματικά μέσω κατάλληλων δεικτών και διαγραμμάτων ελέγχου, επιτρέποντας την αξιολόγηση της σταθερότητας της διεργασίας και τον έγκαιρο εντοπισμό μη φυσιολογικών αποκλίσεων. Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών συμβάλλει στη διατήρηση σταθερών συνθηκών λειτουργίας και στη συνεχή βελτίωση της ποιότητας του προϊόντος, ενισχύοντας τη συνολική αποδοτικότητα της παραγωγικής διαδικασίας (Montgomery, 2019).

#### **2.1.2.2 Λειτουργικές μεταβλητές διεργασίας**

Πέρα από τις μεταβλητές ποιότητας, ιδιαίτερη σημασία έχουν οι λειτουργικές μεταβλητές που περιγράφουν τη λειτουργία του εξοπλισμού. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται η παροχή τροφοδοσίας, η θερμοκρασία λειτουργίας, η ταχύτητα περιστροφής και οι πιέσεις εισόδου και εξόδου. Οι μεταβλητές αυτές επηρεάζουν άμεσα την ένταση των φυγοκεντρικών δυνάμεων και τον χρόνο παραμονής του μίγματος στο εσωτερικό του εξοπλισμού.

Οι μεταβολές στις λειτουργικές μεταβλητές επηρεάζουν άμεσα την απόδοση διαχωρισμού και την ποιότητα των παραγόμενων ρευμάτων, καθιστώντας αναγκαία τη συνεχή παρακολούθησή τους σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (Dong et al., 2024).

### 2.1.2.3 Δείκτες απόδοσης και αξιοπιστίας εξοπλισμού

Η αξιολόγηση της λειτουργίας των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων δεν περιορίζεται στην παρακολούθηση μεμονωμένων μεταβλητών, αλλά περιλαμβάνει και τη χρήση δεικτών απόδοσης και αξιοπιστίας. Ενδεικτικά, ο βαθμός ανάκτησης αιθέριου ελαίου, οι απώλειες προϊόντος στα παραπροϊόντα και η σταθερότητα της λειτουργίας σε βάθος χρόνου αποτελούν βασικούς δείκτες της αποτελεσματικότητας της διεργασίας. Παράλληλα, δείκτες συντήρησης, όπως ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών βλαβών και ο χρόνος αποκατάστασης λειτουργίας, συμβάλλουν στην αξιολόγηση της διαθεσιμότητας και της αξιοπιστίας του εξοπλισμού. Η συστηματική ανάλυση των δεικτών αυτών μπορεί να υποστηρίξει την ανάπτυξη στρατηγικών προληπτικής συντήρησης και τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης της διεργασίας (Montgomery, 2019).

Οι μετρήσιμες μεταβλητές και οι δείκτες απόδοσης αποτελούν τη βάση για την εφαρμογή διαγραμμάτων ελέγχου και άλλων εργαλείων στατιστικής παρακολούθησης. Η συστηματική καταγραφή και ανάλυση των δεδομένων επιτρέπει τον προσδιορισμό φυσιολογικών ορίων λειτουργίας, την ανίχνευση αποκλίσεων και την τεκμηριωμένη λήψη διορθωτικών ενεργειών. Μέσω της διαδικασίας αυτής, ο στατιστικός έλεγχος διεργασιών μετατρέπεται σε εργαλείο συνεχούς βελτίωσης της παραγωγής και διασφάλισης σταθερής ποιότητας προϊόντος (Montgomery, 2019).

### 2.1.3 Διαγράμματα ελέγχου και στατιστικές μέθοδοι παρακολούθησης της διεργασίας

Η εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου διεργασιών βασίζεται σε ένα σύνολο στατιστικών εργαλείων που επιτρέπουν την ποσοτική παρακολούθηση της συμπεριφοράς μιας διεργασίας σε συνάρτηση με τον χρόνο. Κεντρική θέση μεταξύ των εργαλείων αυτών κατέχουν τα διαγράμματα ελέγχου, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διάκριση μεταξύ φυσιολογικής μεταβλητότητας και πραγματικών αποκλίσεων που οφείλονται σε ειδικά αίτια. Μέσω της γραφικής απεικόνισης των δεδομένων και της σύγκρισής τους με στατιστικά καθορισμένα όρια ελέγχου, καθίσταται δυνατός ο έγκαιρος εντοπισμός μεταβολών στη λειτουργία της διεργασίας και η λήψη τεκμηριωμένων διορθωτικών ενεργειών (Montgomery, 2019).

Τα διαγράμματα ελέγχου μπορούν να εφαρμοστούν τόσο σε ποσοτικές όσο και σε ποιοτικές μεταβλητές της διεργασίας. Στις συνεχείς βιομηχανικές διεργασίες διαχωρισμού, ιδιαίτερη σημασία έχουν

τα διαγράμματα για μετρήσεις συνεχών μεταβλητών, όπως η συγκέντρωση αιθέριου ελαίου, η παροχή λειτουργίας, η θερμοκρασία ή άλλες φυσικοχημικές παράμετροι του χυμού. Η συστηματική παρακολούθηση των μεταβλητών αυτών επιτρέπει τον προσδιορισμό της στατιστικής σταθερότητας της διεργασίας και την αξιολόγηση της ικανότητάς της να λειτουργεί εντός προκαθορισμένων προδιαγραφών ποιότητας (Montgomery, 2019, Tetra Pak, 2017).

Πέρα από τα διαγράμματα ελέγχου, σημαντικό ρόλο στον στατιστικό έλεγχο διεργασιών διαδραματίζουν οι δείκτες ικανότητας διεργασίας, οι οποίοι παρέχουν ποσοτική εκτίμηση της απόδοσης μιας διεργασίας σε σχέση με τα επιθυμητά όρια προδιαγραφών. Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν τη σύγκριση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας τεχνικών παρεμβάσεων ή στρατηγικών συντήρησης. Στο πλαίσιο διεργασιών φυγοκεντρικού διαχωρισμού, η χρήση δεικτών ικανότητας συμβάλλει στην κατανόηση της σχέσης μεταξύ λειτουργικών παραμέτρων και απόδοσης ανάκτησης αιθέριου ελαίου (Montgomery, 2019).

Η στατιστική ανάλυση δεδομένων διεργασίας μπορεί επίσης να περιλαμβάνει τεχνικές διερεύνησης τάσεων, συσχετίσεων και επαναλαμβανόμενων προτύπων μεταβολής. Οι μέθοδοι αυτές επιτρέπουν την αναγνώριση σταδιακής υποβάθμισης της λειτουργίας του εξοπλισμού ή μεταβολών στη σύσταση της τροφοδοσίας, πριν αυτές εκδηλωθούν ως εμφανείς αποκλίσεις ποιότητας. Στους φυγοκεντρικούς διαχωριστήρες, η κατανόηση της χρονικής εξέλιξης των παραμέτρων λειτουργίας είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς η φθορά μηχανικών στοιχείων ή η μεταβολή των ιδιοτήτων του μίγματος μπορεί να επηρεάσει σταδιακά την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού (Dong et al., 2024).

Επιπλέον, η ενσωμάτωση στατιστικών μεθόδων παρακολούθησης στη λειτουργία του εξοπλισμού υποστηρίζει την ανάπτυξη στρατηγικών προληπτικής συντήρησης. Η ανάλυση δεδομένων σχετικών με βλάβες, χρόνους διακοπής και αποκατάσταση λειτουργίας επιτρέπει την εκτίμηση της αξιοπιστίας των διαχωριστήρων και τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού συντήρησης, συμβάλλοντας στη μείωση απρογραμματίστων διακοπών παραγωγής και στη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας της μονάδας (Svarovsky, 2000).

## 2.2 Διεργασίες χυμοποίησης πορτοκαλιού

### 2.2.1 Γενική επισκόπηση της βιομηχανικής διεργασίας

Η βιομηχανική επεξεργασία πορτοκαλιού για την παραγωγή χυμού βασίζεται σε μια ακολουθία συνεχών και αλληλοσυνδεόμενων σταδίων, τα οποία αποσκοπούν στον αποτελεσματικό διαχωρισμό των επιμέρους συστατικών του καρπού. Η διεργασία περιλαμβάνει την παραλαβή και προετοιμασία των καρπών, την εκχύλιση του χυμού, τη διαχείριση των στερεών υπολειμμάτων και την ανάκτηση του αιθέριου ελαίου, με κάθε στάδιο να επηρεάζει τη συνολική απόδοση και την ποιότητα του τελικού προϊόντος (Tetra Pak, 2017).

Η εκχύλιση αποτελεί το βασικό στάδιο της διεργασίας, κατά το οποίο απελευθερώνεται ο χυμός από τον εσωτερικό ιστό του καρπού, ενώ παράλληλα δημιουργούνται ρεύματα που περιέχουν στερεά σωματίδια και αιθέριο έλαιο. Τα ρεύματα αυτά οδηγούνται σε επόμενα στάδια διαχωρισμού, όπου πραγματοποιείται η απομάκρυνση των στερεών και η σταδιακή ανάκτηση του ελαίου μέσω μηχανικών και φυγοκεντρικών διεργασιών (Tetra Pak, 2017, John Bean Technologies Corporation, 2018).

Η αποτελεσματικότητα της συνολικής διεργασίας εξαρτάται από τη σωστή λειτουργία και συνεργασία των επιμέρους σταδίων, καθώς και από τη διατήρηση σταθερών συνθηκών λειτουργίας. Μεταβολές σε κρίσιμες παραμέτρους, όπως η παροχή τροφοδοσίας, η θερμοκρασία και τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης, μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση της εκχύλισης, την καθαρότητα των ρευμάτων και τις απώλειες προϊόντος, καθιστώντας αναγκαία τη συστηματική παρακολούθηση και τον έλεγχο της διεργασίας (Montgomery, 2019, Dong et al., 2024).

### 2.2.2 Παραλαβή και προετοιμασία καρπών

Μετά τη συγκομιδή, τα πορτοκάλια μεταφέρονται στο εργοστάσιο χυμοποίησης και εκφορτώνονται στον χώρο παραλαβής, όπου πραγματοποιείται αρχικός ποιοτικός έλεγχος. Κατά το στάδιο αυτό απομακρύνονται ξένα σώματα, φύλλα και καρποί με εμφανείς μηχανικές φθορές ή ενδείξεις αλλοίωσης. Η αξιολόγηση της πρώτης ύλης πραγματοποιείται μέσω δειγματοληψίας και περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της απόδοσης σε χυμό, του βαθμού διαλυτών στερεών και της οξύτητας, στοιχεία που επηρεάζουν άμεσα τον έλεγχο της παραγωγικής διαδικασίας. (Tetra Pak, 2017)

Ακολουθεί η προετοιμασία των καρπών, η οποία περιλαμβάνει την απομάκρυνση ρύπων, σκόνης και

φυτοπροστατευτικών καταλοίπων μέσω πλύσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις εφαρμόζεται και ήπια απολύμανση για τον περιορισμό του μικροβιακού φορτίου. Στη συνέχεια, οι καρποί ταξινομούνται κατά μέγεθος, ώστε να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη λειτουργία του εξοπλισμού εκχύλισης. Η σωστή προετοιμασία των καρπών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη διασφάλιση υψηλής απόδοσης και σταθερής ποιότητας του παραγόμενου χυμού. (Tetra Pak, 2017)

### 2.2.3 Εκχύλιση χυμού

Η εκχύλιση αποτελεί το κεντρικό στάδιο της διεργασίας χυμοποίησης, καθώς κατά τη διάρκειά της ο χυμός απομακρύνεται από τον εσωτερικό ιστό του καρπού. Στη βιομηχανική χυμοποίηση πορτοκαλιού χρησιμοποιούνται ειδικά σχεδιασμένα συστήματα εκχύλισης, τα οποία επιτρέπουν τον διαχωρισμό του χυμού από τον φλοιό, τους σπόρους και τις μεμβράνες. Ο σχεδιασμός και η ρύθμιση του εξοπλισμού επηρεάζουν άμεσα τόσο την απόδοση όσο και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος. (Jia et al., 2022, Tetra Pak, 2017)

Κατά την εκχύλιση παράγονται διακριτά ρεύματα, τα οποία περιλαμβάνουν τον χυμό, το αιθέριο έλαιο, τον πολτό και τα στερεά υπολείμματα. Η αποφυγή εκτεταμένης επαφής του χυμού με τον φλοιό είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς μειώνει τη μεταφορά ανεπιθύμητων πικρών συστατικών και ελαίων στο τελικό προϊόν. Παράλληλα, ο έλεγχος της πίεσης και της μηχανικής καταπόνησης των καρπών συμβάλλει στη διατήρηση της φυσικής σύστασης και του αρώματος του χυμού. (Jia et al., 2022, Tetra Pak, 2017)

Η εκχύλιση επηρεάζει καθοριστικά τη συνολική απόδοση της μονάδας, καθώς και τη σύσταση των επόμενων σταδίων επεξεργασίας. Τυχόν αστοχίες στο στάδιο αυτό μπορεί να οδηγήσουν σε αυξημένη περιεκτικότητα σε έλαιο ή στερεά, καθιστώντας απαραίτητες πιο εντατικές διεργασίες διαύγασης και σταθεροποίησης. (Tetra Pak, 2017)

### 2.2.4 Διαύγαση του χυμού

Ο χυμός που προκύπτει από την εκχύλιση περιέχει σημαντική ποσότητα αιωρούμενων και καθιζανόντων στερεών, τα οποία προέρχονται από τον πολτό, τις μεμβράνες και τον ιστό του καρπού. Η διαύγαση αποτελεί το στάδιο κατά το οποίο απομακρύνονται τα στερεά αυτά συστατικά, ώστε να επιτευχθεί

η επιθυμητή υφή, σταθερότητα και εμφάνιση του προϊόντος. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διασφάλιση της ομοιομορφίας του χυμού κατά την αποθήκευση και την περαιτέρω επεξεργασία. (Tetra Pak, 2017)

Η διαύγαση πραγματοποιείται συνήθως με μηχανικά μέσα, όπως κόσκινα, φυγοκεντρικούς διαχωριστές ή συνδυασμό αυτών. Μέσω της διαδικασίας αυτής ρυθμίζεται η περιεκτικότητα του χυμού σε πολτό, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της αγοράς ή του τελικού προϊόντος. Η σωστή ρύθμιση της διαύγασης συμβάλλει επίσης στη μείωση της πιθανότητας καθίζησης στερεών κατά την αποθήκευση και στη βελτίωση της λειτουργίας των επόμενων σταδίων, όπως η παστερίωση ή η συμπύκνωση. (Tetra Pak, 2017)

Η αποτελεσματική διαύγαση αποτελεί βασική προϋπόθεση για την παραγωγή προϊόντων σταθερής ποιότητας, καθώς επηρεάζει τόσο τη φυσική σταθερότητα όσο και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του χυμού. Παράλληλα, μειώνει το φορτίο ανεπιθύμητων συστατικών που θα μπορούσαν να επηρεάσουν αρνητικά τη διάρκεια ζωής του προϊόντος. (Tetra Pak, 2017)

### **2.2.5 Ανάκτηση αιθέριου ελαίου πορτοκαλιού**

Κατά τη βιομηχανική επεξεργασία του πορτοκαλιού, το αιθέριο έλαιο εντοπίζεται στους ελαιογόνους αδένες του εξωτερικού φλοιού και απελευθερώνεται κατά το στάδιο της εκχύλισης του χυμού. Η ανάκτηση του ελαίου πραγματοποιείται παράλληλα με τη χυμοποίηση, χωρίς την εφαρμογή θερμικής κατεργασίας, γεγονός που οδηγεί στην παραγωγή ελαίου ψυχρής έκθλιψης, υψηλής αρωματικής ποιότητας. (John Bean Technologies Corporation, 2018)

Σύμφωνα με τη βιομηχανική τεχνολογία που εφαρμόζεται σε σύγχρονες μονάδες χυμοποίησης, η απελευθέρωση του αιθέριου ελαίου επιτυγχάνεται μέσω μηχανικής καταπόνησης του φλοιού εντός του εκχυλιστή, όπου οι ελαιογόνοι αδένες διαρρηγνύονται. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας, εφαρμόζεται νερό υπό πίεση μέσω ειδικών διατάξεων ψεκασμού, το οποίο παρασύρει το έλαιο και οδηγεί στον σχηματισμό γαλακτώματος ελαίου–νερού. Το παραγόμενο αυτό γαλάκτωμα, περιέχει λεπτοδιασπαρμένα σταγονίδια αιθέριου ελαίου, νερό και στερεά σωματίδια φλούδας (frit). (John Bean Technologies Corporation, 2018)

Το γαλάκτωμα παρουσιάζει αυξημένη σταθερότητα, λόγω της παρουσίας πηκτινών, σακχάρων και λεπτόκοκκων στερεών, τα οποία λειτουργούν ως φυσικοί γαλακτωματοποιητές. Ως εκ τούτου, η ανάκτηση του αιθέριου ελαίου δεν μπορεί να επιτευχθεί με απλή βαρυτική καθίζηση, αλλά απαιτεί την εφαρμογή πολυσταδιακών διαχωριστικών διεργασιών υψηλής απόδοσης. (John Bean Technologies Corporation, 2018)

Η πρώτη φάση επεξεργασίας περιλαμβάνει την απομάκρυνση των χονδρόκοκκων στερεών μέσω μηχανικών διαχωριστών, ώστε να προστατεύεται ο εξοπλισμός που ακολουθεί και να περιορίζεται η εκχύλιση ανεπιθύμητων συστατικών από τον φλοιό. Στη συνέχεια, το καθαρισμένο γαλάκτωμα οδηγείται σε φυγοκεντρικό διαχωριστή απολάσπωσης, όπου, υπό την επίδραση ισχυρού φυγοκεντρικού πεδίου, απομακρύνεται το μεγαλύτερο μέρος της υδατικής φάσης και των στερεών σωματιδίων. (John Bean Technologies Corporation, 2018)

Το προϊόν του πρώτου σταδίου είναι ένα έλαιο-πλούσιο γαλάκτωμα, με περιεκτικότητα σε αιθέριο έλαιο που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 65% και 85%. Το ρεύμα αυτό οδηγείται σε δεύτερο στάδιο φυγοκεντρικού διαχωρισμού, όπου απομακρύνονται τα υπολειμματικά ίχνη νερού και λεπτόκοκκων στερεών, με αποτέλεσμα την παραγωγή αιθέριου ελαίου υψηλής καθαρότητας, κατάλληλου για αποθήκευση και εμπορική αξιοποίηση. (John Bean Technologies Corporation, 2018)

Η απόδοση και η σταθερότητα της διεργασίας επηρεάζονται καθοριστικά από λειτουργικές παραμέτρους, όπως η παροχή και η θερμοκρασία του νερού εκχύλισης, το ιξώδες του γαλακτώματος και η κατάσταση καθαριότητας των φυγοκεντρικών διαχωριστών. Αυξημένο ιξώδες, το οποίο συχνά σχετίζεται με υπερβολική εκχύλιση πηκτινών από τη φλούδα, έχει αναφερθεί ότι μειώνει την αποδοτικότητα του διαχωρισμού και αυξάνει τις απώλειες αιθέριου ελαίου στα υδατικά ρεύματα. Για τον λόγο αυτό, η συστηματική παρακολούθηση των λειτουργικών συνθηκών και η τακτική συντήρηση του εξοπλισμού αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη μεγιστοποίηση της ανάκτησης και τη διασφάλιση σταθερής ποιότητας του τελικού προϊόντος. (John Bean Technologies Corporation, 2018)

Συνεπώς, η ανάκτηση του αιθέριου ελαίου αποτελεί κρίσιμο στάδιο της χυμοποίησης, καθώς συνδέεται τόσο με την οικονομική αξιοποίηση ενός προϊόντος υψηλής προστιθέμενης αξίας όσο και με τη διατήρηση της ποιότητας του παραγόμενου χυμού.

### **2.2.6 Διαχείριση στερεών υπολειμμάτων και υποπροϊόντων**

Κατά τη χυμοποίηση του πορτοκαλιού παράγεται σημαντική ποσότητα στερεών υπολειμμάτων, τα οποία περιλαμβάνουν φλοιούς, σπόρους και πολτό. Τα υπολείμματα αυτά αντιστοιχούν σε μεγάλο ποσοστό της αρχικής μάζας του καρπού και η ορθολογική διαχείρισή τους αποτελεί βασικό παράγοντα βιωσιμότητας της βιομηχανικής μονάδας. Αντί της απόρριψης, τα στερεά υπολείμματα αξιοποιούνται ως πρώτες ύλες για την παραγωγή ζωοτροφών, βιοενέργειας ή άλλων βιομηχανικών προϊόντων. (Tetra Pak, 2017)

Η επεξεργασία των στερεών υπολειμμάτων περιλαμβάνει συνήθως μηχανική αποστράγγιση και ξήρανση, ώστε να μειωθεί η υγρασία και να διευκολυνθεί η αποθήκευση και μεταφορά τους. Η αξιοποίηση των υποπροϊόντων συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της διεργασίας, καθώς περιορίζονται τα απόβλητα και ενισχύεται η κυκλική χρήση των πόρων. Παράλληλα, δημιουργούνται πρόσθετες πηγές εσόδων, οι οποίες ενισχύουν τη συνολική οικονομική αποδοτικότητα της παραγωγής χυμού. (Tetra Pak, 2017)

### **2.2.7 Συνοπτική παρουσίαση σταδίων χυμοποίησης**

Η βιομηχανική χυμοποίηση του πορτοκαλιού περιλαμβάνει μια αλληλουχία διακριτών αλλά αλληλένδετων σταδίων, από την παραλαβή και προετοιμασία των καρπών έως την εκχύλιση, τη διαύγαση, την ανάκτηση αιθέριου ελαίου και τη διαχείριση των υπολειμμάτων. Κάθε στάδιο επηρεάζει τη συνολική απόδοση, την ποιότητα και τη σταθερότητα του τελικού προϊόντος. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στάδια της διεργασίας και ο κύριος σκοπός κάθε σταδίου.

Πίνακας 1. Βασικά στάδια βιομηχανικής χυμοποίησης πορτοκαλιού και κύρια χαρακτηριστικά τους.

| Στάδιο διεργασίας                                     | Σκοπός διεργασίας                                                          | Βασικά χαρακτηριστικά                                      |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Παραλαβή και έλεγχος πρώτης ύλης                      | Έλεγχος της καταλληλότητας των καρπών<br>πριν από την επεξεργασία          | Απομάκρυνση ακατάλληλων ή<br>αλλοιωμένων καρπών            |
| Πλύσιμο και καθαρισμός                                | Απομάκρυνση ξένων υλών και<br>υπολειμμάτων από την επιφάνεια του<br>καρπού | Καθαρισμός με νερό και συστήματα<br>πλύσης                 |
| Διαλογή και προετοιμασία καρπών                       | Εξασφάλιση ομοιόμορφης τροφοδοσίας<br>στη γραμμή παραγωγής                 | Διαχωρισμός καρπών ανά μέγεθος<br>και ποιότητα             |
| Εκχύλιση χυμού                                        | Ανάκτηση χυμού με όσο το δυνατόν<br>μεγαλύτερη απόδοση                     | Παραγωγή χυμού και δημιουργία<br>γαλακτώματος ελαίου-νερού |
| Πρωτογενής διαχωρισμός                                | Απομάκρυνση στερεών συστατικών και<br>μέρους της πούλπας                   | Διαχωρισμός χυμού από στερεές<br>φάσεις                    |
| Διαύγαση χυμού                                        | Ρύθμιση της περιεκτικότητας σε πολτό και<br>βελτίωση της σταθερότητας      | Έλεγχος θολότητας και πούλπας                              |
| Ανάκτηση αιθέριου ελαίου                              | Ανάκτηση αιθέριου ελαίου από το<br>γαλάκτωμα ελαίου-νερού                  | Φυγοκεντρικός διαχωρισμός των<br>φάσεων                    |
| Δευτερογενής διαχωρισμός και<br>καθαρισμός ελαίου     | Βελτίωση της καθαρότητας του αιθέριου<br>ελαίου                            | Απομάκρυνση υγρασίας και<br>ανεπιθύμητων συστατικών        |
| Τελικός διαχωρισμός και<br>αποθήκευση αιθέριου ελαίου | Σταθεροποίηση και προσωρινή<br>αποθήκευση του προϊόντος                    | Διαχωρισμός υπολειπόμενων<br>φάσεων και αποθήκευση         |
| Ανάκτηση αρωματικών<br>παραπροϊόντων                  | Αξιοποίηση παραπροϊόντων υψηλής<br>προστιθέμενης αξίας                     | Παραγωγή αρωματικών κλασμάτων<br>και τερπενικών προϊόντων  |
| Διαχείριση υπολειμμάτων                               | Μείωση αποβλήτων και αξιοποίηση<br>παραπροϊόντων                           | Παραγωγή ζωοτροφών και<br>ενεργειακή αξιοποίηση            |

## 2.3 Προϊόντα και υποπροϊόντα από την επεξεργασία πορτοκαλιού

Η βιομηχανική επεξεργασία του πορτοκαλιού οδηγεί στην παραγωγή δύο κύριων προϊόντων, του νωπού καρπού και του χυμού, τα οποία καταναλώνονται σε παγκόσμιο επίπεδο. Παράλληλα, παράγεται ένα ευρύ φάσμα δευτερογενών προϊόντων (υποπροϊόντων), τα οποία συμβάλλουν στη μεγιστοποίηση της οικονομικής απόδοσης της διεργασίας και στη μείωση των αποβλήτων. Στην πράξη, κανένα μέρος του καρπού δεν παραμένει ανεκμετάλλευτο μετά την εκχύλιση του χυμού, εφόσον η παροχή πρώτης ύλης δικαιολογεί την επένδυση σε κατάλληλο εξοπλισμό που επιτρέπει τη μετατροπή της φλούδας και του πολτού σε εμπορικά προϊόντα (Tetra Pak, 2017).

Ο χυμός πορτοκαλιού παράγεται με δύο εναλλακτικούς τρόπους: είτε ως προϊόν φυσικής περιεκτικότητας σε κατεψυγμένη ή ασηπτική μορφή (NFC – Not From Concentrate), είτε ως συμπυκνωμένος χυμός, ο οποίος διατίθεται συνήθως σε κατεψυγμένη μορφή (FCOJ – Frozen Concentrated Orange Juice). Κατά τη διεργασία εκχύλισης και επεξεργασίας του χυμού προκύπτουν επίσης σημαντικές ποσότητες υποπροϊόντων. (Tetra Pak, 2017)

Ο NFC αποτελεί χυμό που παράγεται μετά την εκχύλιση και τη διαύγαση, χωρίς να έχει υποστεί απομάκρυνση σημαντικού ποσοστού του νερού του μέσω συμπύκνωσης. Η παραγωγική του αλυσίδα δεν περιλαμβάνει στάδιο εξάτμισης και ανασύστασης, γεγονός που διαφοροποιεί ουσιαστικά το προϊόν από τον συμπυκνωμένο χυμό. Ο NFC διατηρεί τη φυσική σύσταση του χυμού όπως αυτή προκύπτει από τον καρπό, με έμφαση στη διατήρηση του αρώματος, της γεύσης και του χρώματος. Η επεξεργασία του NFC απαιτεί αυστηρό έλεγχο των συνθηκών υγιεινής και λειτουργίας, καθώς το προϊόν είναι πιο ευαίσθητο σε μικροβιολογικές και χημικές αλλοιώσεις σε σύγκριση με το συμπύκνωμα. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται ήπιες θερμικές κατεργασίες, με στόχο την απενεργοποίηση ενζύμων και τη διασφάλιση της μικροβιολογικής σταθερότητας, περιορίζοντας ταυτόχρονα την αλλοίωση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών. Ιδιαίτερη σημασία στη διαχείριση του NFC έχει ο περιορισμός της επαφής με το οξυγόνο. Το διαλυμένο οξυγόνο μπορεί να προκαλέσει οξειδωτικές αντιδράσεις και απώλεια βιταμίνης C κατά την αποθήκευση. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται τεχνικές απομάκρυνσης αέρα και ο χυμός αποθηκεύεται υπό ψύξη, σε

κατεψυγμένη μορφή ή σε ασηπτικές δεξαμενές, ανάλογα με τον προβλεπόμενο χρόνο αποθήκευσης και τη στρατηγική διάθεσης. (Tetra Pak, 2017)

Ο συμπυκνωμένος χυμός πορτοκαλιού προκύπτει από την απομάκρυνση μεγάλου μέρους του νερού του χυμού μετά την ολοκλήρωση των σταδίων της εκχύλισης και της διαύγασης. Η μείωση του όγκου του προϊόντος διευκολύνει τη μακροχρόνια αποθήκευση και τη μεταφορά σε μεγάλες αποστάσεις, ενώ παράλληλα επιτρέπει την αποσύνδεση της περιόδου παραγωγής από την περίοδο διάθεσης στην αγορά, στοιχείο ιδιαίτερα κρίσιμο για μια πρώτη ύλη με έντονη εποχικότητα, όπως το πορτοκάλι. Η διεργασία συμπύκνωσης πραγματοποιείται μέσω ελεγχόμενης εξάτμισης και απαιτεί προσεκτικό χειρισμό, καθώς ενδέχεται να οδηγήσει σε απώλειες πτητικών αρωματικών συστατικών που συμβάλλουν καθοριστικά στο οργανοληπτικό προφίλ του χυμού. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού εφαρμόζονται διεργασίες ανάκτησης και ελεγχόμενης επαναπροσθήκης των αρωματικών κλασμάτων, ώστε να διατηρείται η χαρακτηριστική γεύση και το άρωμα του προϊόντος μετά τη συμπύκνωση. Ο συμπυκνωμένος χυμός χαρακτηρίζεται από μειωμένη ενεργότητα νερού και αυξημένη μικροβιολογική και χημική σταθερότητα κατά την αποθήκευση. Συνήθως αποθηκεύεται σε κατεψυγμένη μορφή μέχρι την ανασύστασή του, κατά την οποία προστίθεται κατάλληλη ποσότητα νερού ώστε να επανέλθει σε σύσταση αντίστοιχη του φυσικού χυμού. Ακολουθεί τελική θερμική κατεργασία, η οποία διασφαλίζει τη μικροβιολογική ασφάλεια και τη σταθερότητα του προϊόντος πριν από τη διάθεσή του στην αγορά (Tetra Pak, 2017).

Άλλα σημαντικά υποπροϊόντα είναι ο πολτός, ο οποίος αποτελείται από διαρρηγμένα κυστίδια χυμού και τοιχώματα των τμημάτων του καρπού και μπορεί να προστεθεί εκ νέου στον χυμό για τη βελτίωση της υφής και της φυσικής εμφάνισης του προϊόντος, καθώς και το προϊόν πλύσης πολτού, το οποίο περιέχει διαλυτά στερεά και χρησιμοποιείται σε συνθέσεις ροφημάτων ως πηγή σακχάρων και ως παράγοντας θολότητας λόγω της περιεκτικότητάς του σε πηκτίνη. Αντίστοιχα, το προϊόν πλύσης πυρήνα, που προκύπτει από την πλύση του υλικού πυρήνα (μεμβράνες και σπόροι), χρησιμοποιείται μετά από συμπύκνωση ως αρωματικό συστατικό και παράγοντας θολότητας, αν και μπορεί να απαιτείται διεργασία αποπικρισμού λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε λιμονίνη. (Tetra Pak, 2017)

Ιδιαίτερης σημασίας υποπροϊόν υψηλής προστιθέμενης αξίας αποτελεί το έλαιο φλούδας ψυχρής

έκθλιψης, το οποίο εξάγεται από τη φλούδα του πορτοκαλιού. Μέρος του ελαίου μπορεί να προστεθεί στο συμπύκνωμα μετά την εξάτμιση και πριν από τη μακροχρόνια αποθήκευση, καθώς συμβάλλει στην επιβράδυνση της ανάπτυξης ανεπιθύμητων οσμών. Το έλαιο φλούδας χρησιμοποιείται επίσης ως πρώτη ύλη στη βιομηχανία αρωμάτων, καλλυντικών και χημικών προϊόντων. (Tetra Pak, 2017)

Κατά τη διεργασία εξάτμισης του χυμού ανακτώνται επιπλέον πτητικά αρωματικά συστατικά, τα οποία διαχωρίζονται σε υδατική και ελαιώδη φάση. Τα υδατοδιαλυτά αρωματικά συστατικά και το έλαιο χρησιμοποιούνται είτε ως πρόσθετα αρώματος στον χυμό είτε ως πρώτες ύλες στη βιομηχανία αρωμάτων. Από τα στερεά υπολείμματα της φλούδας ανακτάται επίσης το d-λιμονένιο, το οποίο αποτελεί το κύριο συστατικό του ελαίου φλούδας και χρησιμοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η παραγωγή συνθετικών ρητινών, συγκολλητικών και διαλυτών. (Tetra Pak, 2017)

Κατά τη συμπύκνωση του χυμού πορτοκαλιού, η παρουσία μικρών ποσοτήτων ελαίου, το οποίο απαντά φυσικά εντός του χυμού και δεν ταυτίζεται με το αιθέριο έλαιο φλούδας ως προϊόν, αποτελεί έναν παράγοντα που επηρεάζει τόσο την ποιότητα του τελικού προϊόντος όσο και τη λειτουργική σταθερότητα της διεργασίας. Το έλαιο αυτό βρίσκεται στον χυμό υπό μορφή λεπτοδιασπαρμένων σταγονιδίων, σχηματίζοντας γαλακτώματα με το υδατικό μέσο. (Tetra Pak, 2017)

Η παρουσία αιθέριου ελαίου στον χυμό επηρεάζει τη θερμική του συμπεριφορά κατά τη διέλευσή του από τα συστήματα εξάτμισης, καθώς και την τάση σχηματισμού επικαθίσεων στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας. Στα σωληνωτά συστήματα εξάτμισης τύπου TASTE, η έντονη τυρβώδης ροή και ο μικρός χρόνος παραμονής του προϊόντος περιορίζουν τη θερμική καταπόνηση του ελαίου. Ωστόσο, όταν η συγκέντρωση του ελαίου είναι αυξημένη, ενισχύεται η δημιουργία επικαθίσεων, δηλαδή η συσσώρευση ανεπιθύμητων ουσιών στις επιφάνειες του εξοπλισμού. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε μείωση της αποδοτικότητας του συστήματος και σε αύξηση των αναγκών καθαρισμού (Tetra Pak, 2017).

Στα συστήματα εξάτμισης τύπου πλακών, η παρουσία ελαίου επηρεάζει άμεσα τη ροή και την κατανομή του προϊόντος στα κανάλια. Λόγω της μικρής διάρκειας παραμονής και της ευαισθησίας τους σε

μεταβολές της σύστασης, τα συστήματα αυτά είναι λιγότερο ανεκτικά σε αυξημένη περιεκτικότητα σε έλαιο ή πολτό. Η συσσώρευση ελαίου στις επιφάνειες μεταφοράς θερμότητας μειώνει την αποτελεσματικότητα της μεταφοράς θερμότητας και μπορεί να οδηγήσει σε ανομοιόμορφη επεξεργασία του προϊόντος (Tetra Pak, 2017).

Η ομογενοποίηση του συμπυκνώματος, η οποία πραγματοποιείται συνήθως πριν από το τελικό στάδιο εξάτμισης σε συγκεντρώσεις περίπου 40–42 °Brix, επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του ελαίου στον χυμό. Μέσω της διάσπασης της πηκτικής και της μείωσης του ιξώδους, επιτυγχάνεται πιο ομοιόμορφη κατανομή των σταγονιδίων ελαίου στο υδατικό μέσο. Παράλληλα, η ομογενοποίηση συμβάλλει στη διάσπαση νιφάδων εσπεριδίνης, οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν ως σημεία συσσώρευσης ελαίου και να ενισχύσουν τη δημιουργία επικαθίσεων. Η παρουσία τέτοιων νιφάδων θεωρείται ανεπιθύμητη, καθώς επηρεάζει τόσο την ποιότητα του προϊόντος όσο και τη σταθερή λειτουργία της παραγωγικής διαδικασίας (Tetra Pak, 2017).

Τέλος, τα υπόλοιπα στερεά υπολείμματα της διεργασίας αξιοποιούνται για την παραγωγή ζωοτροφών, ενώ από τα υγρά ρεύματα αποβλήτων μπορεί να παραχθεί μελάσα εσπεριδοειδών και, σε μικρότερη κλίμακα, πηκτική, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως στη βιομηχανία τροφίμων για την παραγωγή προϊόντων με πηκτικές ιδιότητες (Tetra Pak, 2017).

## 2.4 Παράμετροι ποιότητας χυμού πορτοκαλιού και λειτουργική τους σημασία

Η ποιότητα του χυμού πορτοκαλιού αποτελεί σύνθετη έννοια και καθορίζεται τόσο από υποκειμενικά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά όσο και από αντικειμενικές, μετρήσιμες παραμέτρους. Από την πλευρά του καταναλωτή, η ποιότητα σχετίζεται κυρίως με τη γεύση, την αίσθηση στο στόμα και το χρώμα. Ωστόσο, δεδομένου ότι ο χυμός πορτοκαλιού παράγεται, εμπορεύεται και καταναλώνεται σε παγκόσμια κλίμακα, η αξιολόγηση της ποιότητάς του δεν μπορεί να βασίζεται αποκλειστικά σε υποκειμενικά κριτήρια, αλλά απαιτεί τον καθορισμό συγκεκριμένων ποιοτικών παραμέτρων (Tetra Pak, 2017).

Οι σημαντικότερες παράμετροι ποιότητας του χυμού πορτοκαλιού περιλαμβάνουν την περιεκτικότητα σε σάκχαρα ( $^{\circ}\text{Brix}$ ), την οξύτητα, τον λόγο σακχάρων προς οξέα, το θολό, τον πολτό, το χρώμα, τη βιταμίνη C, καθώς και την περιεκτικότητα σε πτητικά συστατικά και αιθέριο έλαιο (Tetra Pak, 2017).

#### **2.4.1 Σάκχαρα, οξύτητα και λόγος Brix/οξέος**

Η περιεκτικότητα σε σάκχαρα και ο λόγος σακχάρων προς οξέα αποτελούν βασικούς δείκτες ποιότητας του χυμού πορτοκαλιού, καθώς εκφράζουν την ισορροπία μεταξύ γλυκύτητας και οξύτητας. Κατά την ωρίμανση του καρπού, η συγκέντρωση σακχάρων αυξάνεται, ενώ η οξύτητα μειώνεται, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση του λόγου  $^{\circ}\text{Brix}$ /οξέος. Ο λόγος αυτός χρησιμοποιείται ευρέως ως δείκτης ωριμότητας του καρπού και επηρεάζει άμεσα την αποδοχή του προϊόντος από τον καταναλωτή (Tetra Pak, 2017).

#### **2.4.2 Θολό και πολτός του χυμού πορτοκαλιού**

Το θολό του χυμού πορτοκαλιού αποτελεί επιθυμητό χαρακτηριστικό, καθώς προσδίδει στο προϊόν σώμα και κατά συνέπεια συμβάλλει θετικά στην αίσθηση στο στόμα. Δημιουργείται από διαλυτές και αδιάλυτες ουσίες που απελευθερώνονται κατά την εκχύλιση του χυμού. Η πηκτίνη είναι ένα από τα βασικά διαλυτά συστατικά του θολού, καθώς αυξάνει το ιξώδες του χυμού και επιτρέπει στα στερεά σωματίδια να παραμένουν σε αιώρηση (Tetra Pak, 2017).

Ο πολτός του χυμού αποτελείται κυρίως από θραύσματα κυτταρικών τοιχωμάτων και ινώδες υλικό και διακρίνεται σε επιπλέοντα και καθιζάνοντα πολτό. Ο επιπλέον πολτός αποτελείται από μεγαλύτερα και λιγότερο κατακερματισμένα σωματίδια, τα οποία έχουν την τάση να ανέρχονται προς την επιφάνεια του χυμού όταν το προϊόν παραμένει σε ηρεμία ή μετά από ήπια ανάδευση. Τα σωματίδια αυτά προέρχονται κυρίως από δομές του καρπού και χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο μέγεθος και αντοχή (Tetra Pak, 2017).

Ο επιπλέον πολτός θεωρείται ποιοτικά ανώτερος σε σχέση με τον καθιζάνοντα, καθώς προσδίδει στον χυμό πιο φυσική εμφάνιση και πιο ευχάριστη αίσθηση στο στόμα, παρόμοια με αυτή του φρέσκου χυμού. Για τον λόγο αυτό, σε πολλές περιπτώσεις προστίθεται εκ νέου στο τελικό προϊόν, ιδιαίτερα σε χυμούς υψηλής ποιότητας (Tetra Pak, 2017).

Στη βιομηχανία χυμοποίησης, ο όρος «πολτός» χρησιμοποιείται με διαφορετική σημασία ανάλογα με το στάδιο επεξεργασίας. Γενικά, αναφέρεται στο σύνολο των στερεών σωματιδίων που προκύπτουν κατά την εκχύλιση και τη διαύγαση του χυμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο πολτός που προκύπτει στο τελικό στάδιο επεξεργασίας συλλέγεται και διατίθεται ως ξεχωριστό προϊόν με υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά (Tetra Pak, 2017).

Η διάκριση μεταξύ των δύο τύπων πολτού είναι σημαντική, καθώς παρουσιάζουν διαφορετική συμπεριφορά κατά την επεξεργασία και επηρεάζουν διαφορετικά την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Ο καθιζάνων πολτός αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια, τα οποία με τον χρόνο κατακάθονται στον πυθμένα, ενώ ο επιπλέων πολτός αποτελείται από μεγαλύτερα σωματίδια που παραμένουν σε αιώρηση ή επιπλέουν. Οι βασικές ιδιότητες που καθορίζουν την ποιότητα του επιπλέοντος πολτού είναι το μέγεθος των σωματιδίων και η περιεκτικότητα σε έλαιο (Tetra Pak, 2017).

Η μέθοδος εκχύλισης επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του πολτού. Όταν η επεξεργασία είναι πιο ήπια, προκύπτουν μεγαλύτερα και πιο άθικτα σωματίδια, με χαμηλότερη περιεκτικότητα σε έλαιο. Αντίθετα, όταν ασκείται μεγαλύτερη μηχανική καταπόνηση, δημιουργούνται μικρότερα σωματίδια και αυξάνεται η μεταφορά ελαίου στον πολτό, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τόσο τη γεύση όσο και τη συμπεριφορά του προϊόντος κατά την επεξεργασία (Tetra Pak, 2017).

#### **2.4.3 Γεύση, πτητικά συστατικά και περιεκτικότητα σε έλαιο του χυμού πορτοκαλιού**

Η γεύση του χυμού πορτοκαλιού αποτελεί ένα σύνθετο αισθητηριακό χαρακτηριστικό, το οποίο προκύπτει από τον συνδυασμό της γλυκύτητας, της οξύτητας, της υφής (θολό και πολτός) και των αρωματικών πτητικών ενώσεων. Παρότι τα σάκχαρα και τα οργανικά οξέα καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την ισορροπία μεταξύ γλυκού και όξινου χαρακτήρα, η τελική αντίληψη της γεύσης επηρεάζεται ουσιαστικά από την παρουσία και τη σύσταση των πτητικών συστατικών και του αιθέριου ελαίου (Tetra Pak, 2017, Kimball, 1989).

Τα πτητικά αρωματικά συστατικά του χυμού προέρχονται κυρίως από τρία βασικά κλάσματα: το έλαιο της φλούδας, το έλαιο που ανακτάται κατά την επεξεργασία και το υδατικό αρωματικό κλάσμα. Τα συστατικά αυτά συμβάλλουν καθοριστικά στη διαμόρφωση του χαρακτηριστικού αρώματος του χυμού και

απαιτείται η ισορροπημένη παρουσία τους για την επίτευξη φυσικής και ευχάριστης γεύσης. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και ιδιαίτερα κατά τη συμπύκνωση, σημαντικό μέρος των πτητικών ενώσεων απομακρύνεται μαζί με τους υδατμούς, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια αρωματικής έντασης. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται διεργασίες ανάκτησης και ελεγχόμενης επαναπροσθήκης των αρωματικών συστατικών (Tetra Pak, 2017, Braddock, 1999).

Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η περιεκτικότητα του χυμού σε αιθέριο έλαιο, η οποία σχετίζεται άμεσα με τη συγκέντρωση του λιμονενίου, του κυρίαρχου συστατικού του ελαίου. Το λιμονένιο λειτουργεί κυρίως ως φορέας άλλων αρωματικών ενώσεων και συμβάλλει περιορισμένα από μόνο του στη γεύση. Ωστόσο, σε αυξημένες συγκεντρώσεις μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά, όπως αίσθηση καύσου, τραχύτητας ή έντονη και δυσάρεστη γεύση (Tetra Pak, 2017, Kimball, 1989).

Σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές, η περιεκτικότητα σε αιθέριο έλαιο στον χυμό πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, ενώ οι καταναλωτικές προτιμήσεις τοποθετούν το βέλτιστο εύρος ακόμη χαμηλότερα. Αυξημένες συγκεντρώσεις ελαίου συνδέονται συχνά με έντονη μηχανική καταπόνηση του καρπού κατά την εκχύλιση, η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερη απελευθέρωση ελαίου από τη φλούδα. Στην παραγωγή συμπυκνωμένου χυμού, το φαινόμενο αυτό δεν είναι ιδιαίτερα προβληματικό, καθώς μεγάλο μέρος των πτητικών συστατικών απομακρύνεται κατά την εξάτμιση. Αντίθετα, στους φυσικούς χυμούς απαιτείται αυστηρότερος έλεγχος της περιεκτικότητας σε έλαιο, ώστε να διατηρείται η φυσική γεύση του προϊόντος (Tetra Pak, 2017· Braddock, 1999).

Η περιεκτικότητα σε αιθέριο έλαιο συνδέεται επίσης με την εμφάνιση πικρότητας στον χυμό πορτοκαλιού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, πρόδρομες ενώσεις που υπάρχουν στον καρπό μετατρέπονται κατά την επεξεργασία σε πικρές ουσίες, όπως η λιμονίνη. Αν και η πικρότητα δεν αποτελεί συχνό πρόβλημα για τις ποικιλίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανική χυμοποίηση, η ανεξέλεγκτη μεταφορά αυτών των ενώσεων μπορεί να υποβαθμίσει τη γευστική ποιότητα του προϊόντος. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου εφαρμόζονται διεργασίες απομάκρυνσης των πικρών συστατικών, όπως ο φυγοκεντρικός διαχωρισμός και η διήθηση (Tetra Pak, 2017, Kimball, 1989).

Ο ποσοτικός προσδιορισμός της περιεκτικότητας σε αιθέριο έλαιο αποτελεί βασικό εργαλείο

ποιοτικού ελέγχου, καθώς επιτρέπει την παρακολούθηση της σταθερότητας της διεργασίας και την έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων. Η συγκέντρωση του ελαίου συνδέεται άμεσα με την ποιότητα του τελικού προϊόντος, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη χρήση αξιόπιστων και τυποποιημένων μεθόδων μέτρησης (Kimball, 1989, Montgomery, 2019).

## 2.5 Τεχνολογίες ανάκτησης αιθέριου ελαίου φλούδας πορτοκαλιού

### 2.5.1 Γαλάκτωμα ελαίου-νερού

Το αιθέριο έλαιο φλούδας πορτοκαλιού ανακτάται από ένα πολύπλοκο γαλάκτωμα ελαίου–νερού, το οποίο προκύπτει κατά τα στάδια εκχύλισης και αρχικής επεξεργασίας του καρπού. Το γαλάκτωμα αυτό αποτελείται από υδατική φάση, λεπτοδιασπαρμένα σταγονίδια αιθέριου ελαίου, καθώς και στερεά σωματίδια που προέρχονται από τη φλούδα και τον πολτό του πορτοκαλιού. Το αιθέριο έλαιο δεν απαντά ως συνεχής φάση, αλλά υπό μορφή πολύ μικρών σταγονιδίων, τα οποία σχηματίζουν σταθερό γαλάκτωμα με το υδατικό μέσο. Η σταθερότητα του γαλακτώματος ενισχύεται από την παρουσία πηκτινών, διαλυτών σακχάρων και λεπτόκοκκων στερεών σωματιδίων, τα οποία δρουν ως φυσικοί γαλακτωματοποιητές και δυσχεραίνουν τον διαχωρισμό των φάσεων. (Tetra Pak, 2017)

Η σύσταση του αιθέριου ελαίου παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα, ανάλογα με την ποικιλία του πορτοκαλιού, τις συνθήκες εκχύλισης και τον βαθμό μηχανικής καταπόνησης του καρπού. Εκτός από το αιθέριο έλαιο, το γαλάκτωμα περιέχει σημαντικές ποσότητες νερού, υπολείμματα πολτού, ίχνη πηκτινών και άλλες οργανικές ενώσεις, γεγονός που καθιστά τη διεργασία ανάκτησης τεχνολογικά απαιτητική. (Tetra Pak, 2017)

Στόχος της διεργασίας ανάκτησης του αιθέριου ελαίου είναι η απομάκρυνση των ανεπιθύμητων συστατικών και η σταδιακή αύξηση της καθαρότητάς του. Λόγω της σταθερότητας του γαλακτώματος και της μικρής διαφοράς πυκνότητας μεταξύ των φάσεων, η ανάκτηση του ελαίου δεν μπορεί να επιτευχθεί με μία μόνο διεργασία, αλλά απαιτεί την εφαρμογή πολυσταδιακών διαχωριστικών τεχνικών. Η κατανόηση της φυσικοχημικής συμπεριφοράς του αιθέριου ελαίου αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον σωστό σχεδιασμό

των επόμενων σταδίων επεξεργασίας και για την αποτελεσματική λειτουργία των συστημάτων φυγοκεντρικού διαχωρισμού που ακολουθούν. (Tetra Pak, 2017)

Εκτός από τις απώλειες που σχετίζονται με τη διαχωριστική διεργασία του χυμού, σημαντικός ρόλος αποδίδεται και στις στερεές φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας. Σημαντικό ποσοστό απωλειών αιθέριου ελαίου δεν σχετίζεται αποκλειστικά με τη υγρή φάση του χυμού, αλλά και με τις στερεές φάσεις της διεργασίας. Η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι τα στερεά σωματίδια και ο πολτός που προκύπτουν κατά την εκχύλιση μπορούν να συγκρατούν αυξημένες ποσότητες αιθέριου ελαίου σε σχέση με τον ίδιο τον χυμό. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται με τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού εκχύλισης και τις συνθήκες λειτουργίας, όπως η πίεση εκχύλισης και ο βαθμός κατακερματισμού των κυτταρικών δομών. Ως αποτέλεσμα, οι απώλειες αιθέριου ελαίου δεν περιορίζονται μόνο στη διαχωριστική διεργασία του χυμού, αλλά επεκτείνονται και στα παραπροϊόντα της γραμμής παραγωγής, καθιστώντας αναγκαία τη συνολική αξιολόγηση της διεργασίας και του εξοπλισμού. (Tetra Pak, 2017)

### 2.5.2 Πρωτογενής φυγοκεντρικός διαχωρισμός ελαίου

Το πρώτο στάδιο ανάκτησης αιθέριου ελαίου πραγματοποιείται μέσω πρωτογενούς φυγοκεντρικού διαχωρισμού, ο οποίος έχει ως κύριο στόχο την απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του νερού και των στερεών σωματιδίων, καθώς και την αρχική αύξηση της συγκέντρωσης του ελαίου. (Tetra Pak, 2017)

Πριν την είσοδο στον φυγοκεντρικό διαχωριστή, το γαλάκτωμα υποβάλλεται συνήθως σε μηχανική προεπεξεργασία μέσω φίλτρου τύπου finisher, με σκοπό την απομάκρυνση χονδρόκοκκων στερεών και την προστασία του εξοπλισμού που ακολουθεί. Η προεπεξεργασία αυτή συμβάλλει στη σταθερότερη λειτουργία του διαχωριστή και στη μείωση της μηχανικής καταπόνησης. (Tetra Pak, 2017)

Ο πρωτογενής διαχωρισμός βασίζεται στην εφαρμογή ισχυρού φυγοκεντρικού πεδίου, το οποίο εκμεταλλεύεται τη διαφορά πυκνότητας μεταξύ της ελαιώδους και της υδατικής φάσης. Υπό την επίδραση της φυγοκεντρικής δύναμης, η βαρύτερη υδατική φάση μετακινείται προς την περιφέρεια του κάδου, ενώ η ελαφρύτερη ελαιώδης φάση συγκεντρώνεται προς το κέντρο και απομακρύνεται ξεχωριστά. Με τον πρωτογενή φυγοκεντρικό διαχωρισμό, η περιεκτικότητα του αιθέριου ελαίου αυξάνεται συνήθως από αρχικές τιμές της τάξης του 0,5–2% σε επίπεδα που μπορούν να φθάσουν το 70–90%. Ωστόσο, το προϊόν

που προκύπτει στο στάδιο αυτό εξακολουθεί να περιέχει σημαντικές ποσότητες νερού και διαλυμένων ουσιών, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη συνέχιση της επεξεργασίας σε επόμενα στάδια. Ο πρωτογενής διαχωρισμός δεν αποσκοπεί στην επίτευξη τελικής καθαρότητας του αιθέριου ελαίου, αλλά λειτουργεί ως στάδιο προ-συμπύκνωσης και σταθεροποίησης της διεργασίας. Οι περιορισμοί του σταδίου αυτού, που σχετίζονται κυρίως με τη σταθερότητα του γαλακτώματος και την παρουσία λεπτόκοκκων σωματιδίων, οδηγούν αναγκαστικά στην εφαρμογή δευτερογενών διαχωριστικών διεργασιών, όπως ο τελικός καθαρισμός. (Tetra Pak, 2017)

### **2.5.3 Δευτερογενής φυγοκεντρικός διαχωρισμός και τελικός καθαρισμός αιθέριου ελαίου**

Μετά την ολοκλήρωση του πρωτογενούς φυγοκεντρικού διαχωρισμού, το συμπυκνωμένο ρεύμα αιθέριου ελαίου φλούδας πορτοκαλιού εξακολουθεί να περιέχει υπολείμματα νερού, διαλυμένες οργανικές ενώσεις και λεπτόκοκκα στερεά σωματίδια. Παρότι η περιεκτικότητα σε ελαιώδη φάση έχει αυξηθεί σημαντικά, το προϊόν του πρώτου σταδίου δεν θεωρείται τελικό, καθώς οι προσμείξεις αυτές μπορούν να επηρεάσουν τη σταθερότητα, την εμφάνιση και τη συνολική ποιότητα του αιθέριου ελαίου. (Tetra Pak, 2017)

Για τον λόγο αυτό, το έλαιο οδηγείται σε δεύτερο στάδιο φυγοκέντρωσης, γνωστό ως δευτερογενής φυγοκεντρικός διαχωρισμός ή στάδιο τελικού καθαρισμού. Στόχος του σταδίου αυτού είναι η περαιτέρω απομάκρυνση υπολειμματικού νερού, διαλυμένων ουσιών και λεπτόκοκκων στερεών σωματιδίων, ώστε να επιτευχθεί αιθέριο έλαιο πολύ υψηλής καθαρότητας, η οποία μπορεί να υπερβαίνει το 99% (Tetra Pak, 2017)

Οι παροχές στο στάδιο του τελικού καθαρισμού είναι ιδιαίτερα χαμηλές και αντιστοιχούν συνήθως στο 1–2% των παροχών του πρωτογενούς σταδίου φυγοκέντρωσης. Δεδομένου ότι το έλαιο έχει ήδη υποστεί προηγούμενο διαχωρισμό, το ρεύμα εισόδου είναι πρακτικά απαλλαγμένο από χονδρόκοκκα στερεά, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση φυγοκεντρικών διαχωριστήρων υψηλής ακρίβειας και χαμηλής παροχής. (Tetra Pak, 2017)

Σε εφαρμογές μικρής δυναμικότητας χρησιμοποιούνται συχνά φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες συμπαγούς κάδου, στους οποίους το έλαιο και το νερό απομακρύνονται συνεχώς, ενώ τα στερεά που συσσωρεύονται στον κάδο αποβάλλονται περιοδικά μέσω διακοπής της λειτουργίας. Αντίθετα, σε εγκαταστάσεις μεγαλύτερης δυναμικότητας εφαρμόζονται φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες με αυτόματη απόρριψη στερεών, στους οποίους το έλαιο και το νερό εξέρχονται συνεχώς υπό πίεση, ενώ τα συσσωρευμένα στερεά απομακρύνονται αυτόματα μία ή δύο φορές ανά ώρα χωρίς να απαιτείται διακοπή της διεργασίας. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου διαχωριστήρα στο στάδιο τελικού καθαρισμού επηρεάζει άμεσα τόσο την τελική καθαρότητα του αιθέριου ελαίου όσο και τη λειτουργική αξιοπιστία της γραμμής παραγωγής (Tetra Pak, 2017).

Τυπικά, από έναν τόνο πορτοκαλιών παράγονται περίπου 200–300 L γαλακτώματος ελαίου στο πρωτογενές στάδιο φυγοκέντρωσης και 3–6 L καθαρού αιθέριου ελαίου που οδηγούνται στο στάδιο τελικού καθαρισμού. Επιπλέον, σε ορισμένες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται τριφασικοί φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες αποπολτοποίησης, οι οποίοι επιτρέπουν την αποτελεσματική απομάκρυνση πηκτινών και αδιάλυτων στερεών από το ρεύμα του «κίτρινου νερού», συμβάλλοντας στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης ανάκτησης αιθέριου ελαίου (Tetra Pak, 2017).

Σε εγκαταστάσεις μεγάλης δυναμικότητας, η διεργασία τελικού καθαρισμού πραγματοποιείται συχνά σε συνεχές σύστημα, με στόχο τη διατήρηση σταθερής ποιότητας του προϊόντος και τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής και λειτουργικής απόδοσης της γραμμής παραγωγής. Η επιτυχής ολοκλήρωση του σταδίου τελικού καθαρισμού αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη συνολική ποιότητα του αιθέριου ελαίου φλούδας πορτοκαλιού και προϋπόθεση για τα επόμενα στάδια σταθεροποίησης και εξευγενισμού. (Tetra Pak, 2017)

#### **2.5.4 Διεργασία καθίζησης αιθέριου ελαίου**

Το αιθέριο έλαιο φλούδας πορτοκαλιού που έχει υποστεί τελικό καθαρισμό μέσω δευτερογενούς φυγοκεντρικού διαχωρισμού παρουσιάζει υψηλό βαθμό καθαρότητας, ωστόσο εξακολουθεί να περιέχει ίχνη διαλυμένων κηρωδών ουσιών που προέρχονται από τη φλούδα του καρπού. Οι ουσίες αυτές δεν επηρεάζουν τη σύσταση του ελαίου σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αλλά μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα

σταθερότητας και εμφάνισης όταν το προϊόν εκτεθεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Σε θερμοκρασίες άνω των 15–20 °C οι κηροί παραμένουν διαλυμένοι στο αιθέριο έλαιο και το προϊόν εμφανίζεται διαυγές. Αντίθετα, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες οι κηρώδεις ενώσεις τείνουν να κρυσταλλώνονται, οδηγώντας σε σχηματισμό ιζήματος και θολότητα, γεγονός που υποβαθμίζει την οπτική ποιότητα και την εμπορική αξία του προϊόντος (Tetra Pak, 2017).

Για την αποφυγή των φαινομένων αυτών εφαρμόζεται η διεργασία αποκήρωσης με ψύξη, η οποία αποτελεί στάδιο σταθεροποίησης του αιθέριου ελαίου. Η διεργασία βασίζεται στη μείωση της θερμοκρασίας του ελαίου υπό ελεγχόμενες συνθήκες, με σκοπό την πρόκληση κρυστάλλωσης και καθίζησης των κηρωδών συστατικών. (Tetra Pak, 2017)

Η αποκήρωση με ψύξη πραγματοποιείται συνήθως με αποθήκευση του αιθέριου ελαίου σε δεξαμενές, όπου η θερμοκρασία διατηρείται ίση ή χαμηλότερη του 1 °C. Υπό τις συνθήκες αυτές, οι κηροί κρυσταλλώνονται σταδιακά και καθιζάνουν στον πυθμένα των δεξαμενών, σχηματίζοντας στερεό ίζημα. (Tetra Pak, 2017)

Ο χρόνος παραμονής του αιθέριου ελαίου στις δεξαμενές αποκήρωσης εξαρτάται από τη σύσταση του ελαίου και τις συνθήκες ψύξης και είναι συνήθως της τάξης των 30 ημερών ή και μεγαλύτερος. Σε περιπτώσεις εφαρμογής χαμηλότερων θερμοκρασιών, ο απαιτούμενος χρόνος μπορεί να μειωθεί σημαντικά, χωρίς να επηρεάζεται η αποτελεσματικότητα της διεργασίας. (Tetra Pak, 2017)

Μετά την ολοκλήρωση της αποκήρωσης, το σταθεροποιημένο αιθέριο έλαιο απομακρύνεται από τις δεξαμενές με μετάγγιση, ενώ το ίζημα που περιέχει τους κρυσταλλωμένους κηρούς παραμένει στον πυθμένα. Το αποκηρωμένο έλαιο παρουσιάζει βελτιωμένη φυσικοχημική σταθερότητα και μειωμένη τάση θολώματος κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά. (Tetra Pak, 2017)

Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις μεγάλης δυναμικότητας, τα ιζήματα που συλλέγονται από διαφορετικές δεξαμενές αποκήρωσης υποβάλλονται συχνά σε φυγοκεντρικό διαχωρισμό, με στόχο την ανάκτηση τυχόν υπολειμματικού αιθέριου ελαίου. Η πρακτική αυτή συμβάλλει στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης της διεργασίας και στη μείωση των απωλειών προϊόντος (Tetra Pak, 2017).

Η διεργασία αποκήρωσης με ψύξη αποτελεί το τελικό στάδιο σταθεροποίησης του αιθέριου ελαίου

φλούδας πορτοκαλιού και εξασφαλίζει την παραγωγή προϊόντος με σταθερή εμφάνιση, αυξημένη αντοχή σε χαμηλές θερμοκρασίες και καταλληλότητα για μακροχρόνια αποθήκευση και εμπορική αξιοποίηση. (Tetra Pak, 2017)

### 2.5.5 Ανάκτηση d-λιμονενίου από το υδατικό κλάσμα μετά τη φυγοκέντρωση

Κατά την ανάκτηση αιθέριου ελαίου από φλούδες πορτοκαλιού, το υδατικό κλάσμα που προκύπτει από το πρώτο στάδιο φυγοκέντρωσης ανακυκλοφορεί συνήθως προς το στάδιο εκχύλισης (Tetra Pak, 2017). Το ρεύμα αυτό περιέχει διαλυμένες ουσίες, πηκτίνες και μικρές ποσότητες υπολειμματικού ελαίου. Για την αποφυγή υπερβολικής συσσώρευσης αδιάλυτων συστατικών στο κύκλωμα ανακυκλοφορίας, ένα μέρος της ροής, που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 10% και 50%, απομακρύνεται και αντικαθίσταται με φρέσκο νερό (Tetra Pak, 2017).

Το απομακρυνόμενο υδατικό ρεύμα περιέχει υπολειμματικό έλαιο σε ποσοστό περίπου 0,5–1,0%, το οποίο είναι πλούσιο σε d-λιμονένιο. Αντί να οδηγείται απευθείας σε μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων, μπορεί να υποβληθεί σε περαιτέρω επεξεργασία με σκοπό την ανάκτηση του d-λιμονενίου ως προϊόντος προστιθέμενης αξίας. Η πρακτική αυτή συμβάλλει τόσο στην αύξηση της συνολικής ανάκτησης τερπενίων όσο και στη μείωση του οργανικού φορτίου των υγρών αποβλήτων (Tetra Pak, 2017).

Στα συμβατικά συστήματα ανάκτησης d-λιμονενίου, το υδατικό αυτό ρεύμα θερμαίνεται και οδηγείται σε διαδοχικούς θαλάμους στιγμιαίας εκτόνωσης, όπου εξατμίζεται μίγμα νερού και d-λιμονενίου. Οι παραγόμενοι ατμοί συμπυκνώνονται και στη συνέχεια διαχωρίζονται, επιτρέποντας την ανάκτηση κλάσματος πλούσιου σε τερπένια. Η διεργασία βασίζεται στη μεταφορά των πτητικών συστατικών στην αέρια φάση και στην επακόλουθη συμπύκνωσή τους (Tetra Pak, 2017).

Νεότερες διατάξεις αξιοποιούν στήλες κλασματικής απόσταξης αντί των επιμέρους θαλάμων εκτόνωσης, επιτυγχάνοντας υψηλότερες αποδόσεις ανάκτησης και βελτιωμένη καθαρότητα του παραγόμενου d-λιμονενίου. Παράλληλα, παρουσιάζουν πιο συμπαγή σχεδιασμό και μειωμένες απαιτήσεις

σε χώρο εγκατάστασης. Ανάλογα με τη διάταξη της παραγωγικής γραμμής, τα συστήματα ανάκτησης μπορούν να τροφοδοτούνται είτε από το υδατικό ρεύμα που απομακρύνεται μετά το πρώτο στάδιο φυγοκέντρωσης είτε από μεταγενέστερα στάδια καθαρισμού της μονάδας ανάκτησης αιθέριου ελαίου (Tetra Pak, 2017).

### 2.5.6 Ανάκτηση αρωματικών κλασμάτων και σχέση με το αιθέριο έλαιο

Κατά τη θερμική επεξεργασία του χυμού και ειδικότερα κατά τη συμπύκνωση μέσω εξάτμισης, σημαντικό μέρος των πτητικών συστατικών απομακρύνεται μαζί με τους υδρατμούς. Στα πτητικά αυτά συστατικά περιλαμβάνονται ενώσεις που συνδέονται άμεσα με το αρωματικό προφίλ του χυμού, καθώς και ενώσεις συγγενείς ή/και σχετιζόμενες με το αιθέριο έλαιο φλούδας (Tetra Pak, 2017). Για τον περιορισμό των απωλειών αρώματος και τη βελτιστοποίηση του θερμικού και μαζικού ισοζυγίου της διεργασίας, εφαρμόζονται συστήματα ανάκτησης essence, τα οποία θεωρούνται λειτουργικά κρίσιμα στα σύγχρονα συστήματα εξάτμισης (Tetra Pak, 2017).

Το ανακτημένο έλαιο οδηγείται σε διαχωρισμό, παράγοντας συνήθως μία υδατική και μία ελαιώδη φάση. Η ελαιώδης φάση περιέχει συγκεντρωμένα υδρόφοβα πτητικά συστατικά, ενώ η υδατική φάση περιέχει περισσότερο υδατοδιαλυτές πτητικές ενώσεις. Τα κλάσματα αυτά μπορούν να επαναπροστεθούν ελεγχόμενα στον συμπυκνωμένο χυμό ή/και στον ανασυσταθέντα χυμό, με στόχο την αποκατάσταση των απωλειών πτητικών συστατικών και τη διατήρηση του επιθυμητού αρωματικού προφίλ (Tetra Pak, 2017).

Η σχέση των αρωματικών κλασμάτων με το αιθέριο έλαιο είναι διττή: αφενός, μέρος των αρωματικών ενώσεων που ανακτώνται στο έλαιο ανήκουν στο ίδιο «χημικό οικοσύστημα» με τα τερπένια του αιθέριου ελαίου, αφετέρου, η ελαιώδης φάση των κλασμάτων μπορεί να συμβάλει στη συνολική αντίληψη «φρεσκάδας» και στην αισθητηριακή ισορροπία του τελικού προϊόντος. Συνεπώς, η ελεγχόμενη διαχείριση των κλασμάτων ελαίου αποτελεί κρίσιμο σημείο για τη βιομηχανική παραγωγή προϊόντων σταθερής ποιότητας και προβλέψιμων οργανοληπτικών χαρακτηριστικών (Tetra Pak, 2017).

Η ανάκτηση αιθέριου ελαίου, d-λιμονενίου και αρωματικών κλασμάτων από τα επιμέρους ρεύματα της επεξεργασίας πορτοκαλιού βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην εφαρμογή αποδοτικών διεργασιών φυσικού

διαχωρισμού. Οι διεργασίες αυτές επιτρέπουν τον διαχωρισμό φάσεων με μικρές διαφορές πυκνότητας και τη διαχείριση σύνθετων γαλακτωμάτων, τα οποία σχηματίζονται κατά τη χυμοποίηση και την επεξεργασία της φλούδας. (Tetra Pak, 2017)

Κεντρικό ρόλο στις παραπάνω διεργασίες διαδραματίζουν οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται εκτενώς τόσο στην ανάκτηση αιθέριου ελαίου όσο και στον καθαρισμό, τη σταθεροποίηση και την αξιοποίηση παραπροϊόντων υψηλής προστιθέμενης αξίας. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου διαχωριστήρα, καθώς και η κατανόηση της αρχής λειτουργίας του, αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την επίτευξη υψηλής απόδοσης, σταθερής ποιότητας προϊόντος και αξιόπιστης λειτουργίας της γραμμής παραγωγής. (Tetra Pak, 2017)

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνολογία των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων που εφαρμόζονται στη βιομηχανία χυμοποίησης, με έμφαση στους φυγοκεντρικούς διαχωριστήρες δίσκων, την αρχή λειτουργίας τους και τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του διαχωρισμού. (Tetra Pak, 2017)

## 2.6 Τεχνολογία φυγοκεντρικών διαχωριστήρων και αρχή λειτουργίας

Οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες αποτελούν βασικό εξοπλισμό στη βιομηχανία χυμοποίησης εσπεριδοειδών, καθώς χρησιμοποιούνται εκτενώς σε στάδια όπου απαιτείται ο διαχωρισμός φάσεων με μικρές διαφορές πυκνότητας, όπως ο διαχωρισμός ελαίου–νερού και η απομάκρυνση λεπτόκοκκων στερεών από υγρά ρεύματα. Η εφαρμογή τους είναι ιδιαίτερα κρίσιμη στις διεργασίες ανάκτησης αιθέριου ελαίου, στον τελικό καθαρισμό του προϊόντος, καθώς και στη διαχείριση παραπροϊόντων και δευτερευόντων ρευμάτων της γραμμής παραγωγής (Tetra Pak, 2017).

Η λειτουργία των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων βασίζεται στην ανάπτυξη έντονου φυγοκεντρικού πεδίου, το οποίο επιταχύνει τη διαδικασία καθίζησης των φάσεων και επιτρέπει την επίτευξη αποδοτικότερου διαχωρισμού σε σχέση με τις κλασικές βαρυτικές διεργασίες. Μέσω της περιστροφής ενός τυμπάνου υψηλής ταχύτητας, τα σωματίδια ή τα σταγονίδια της βαριάς φάσης υφίστανται μεγαλύτερη

φυγοκεντρική δύναμη και μετακινούνται προς την περιφέρεια του συστήματος, ενώ η ελαφριά φάση τείνει να κινηθεί προς τον άξονα περιστροφής (Svarovsky, 2000).

Η αυξημένη αποδοτικότητα των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων καθιστά δυνατή την επεξεργασία μεγάλων παροχών με περιορισμένο απαιτούμενο όγκο εξοπλισμού, γεγονός που εξηγεί τη ευρεία εφαρμογή τους στη βιομηχανία τροφίμων, ποτών, χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων. Στη βιομηχανία επεξεργασίας πορτοκαλιού, οι διαχωριστήρες αυτοί επιτρέπουν τον αποτελεσματικό έλεγχο της περιεκτικότητας του χυμού σε έλαιο και στερεά, συμβάλλοντας τόσο στη σταθερή ποιότητα του τελικού προϊόντος όσο και στη λειτουργική αξιοπιστία της γραμμής παραγωγής (Tetra Pak, 2017).

### 2.6.1 Φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες δίσκων

Οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες δίσκων αποτελούν έναν από τους πλέον διαδεδομένους τύπους καθιζητικών φυγοκεντρικών διαχωριστήρων και χρησιμοποιούνται εκτενώς στη βιομηχανία τροφίμων, ποτών, χημικών και φαρμακευτικών προϊόντων, λόγω της υψηλής αποδοτικότητας διαχωρισμού και του μικρού απαιτούμενου όγκου εγκατάστασης (Svarovsky, 2000). Η ευρεία εφαρμογή τους οφείλεται στην ικανότητά τους να διαχωρίζουν φάσεις με πολύ μικρές διαφορές πυκνότητας, καθώς και στη δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλων παροχών σε συνεχή λειτουργία. (Tetra Pak, 2017)

Η βασική δομική διαφορά των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων δίσκων σε σχέση με απλούστερους φυγοκεντρικούς διαχωριστήρες έγκειται στην παρουσία συστοιχίας κεκλιμένων δίσκων στο εσωτερικό του περιστρεφόμενου τυμπάνου. Οι δίσκοι αυτοί διαμορφώνουν στενά κανάλια ροής, εντός των οποίων πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των φάσεων. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται σημαντικά η ενεργός επιφάνεια διαχωρισμού και μειώνεται η απόσταση που πρέπει να διανύσουν τα σταγονίδια ή τα σωματίδια της βαριάς φάσης για να καθιζάνουν υπό την επίδραση του φυγοκεντρικού πεδίου (Dong et al., 2024).

Η γεωμετρία της δισκοστοιχίας, σε συνδυασμό με την υψηλή γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου, επιτρέπει την επίτευξη ιδιαίτερα υψηλών επιταχύνσεων, πολλαπλάσιων της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Ως αποτέλεσμα, οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες δίσκων επιτυγχάνουν αποδοτικό διαχωρισμό ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι βαρυτικές διεργασίες καθίζησης θα ήταν πρακτικά ανεφάρμοστες (Svarovsky, 2000).

Στη βιομηχανία χυμοποίησης πορτοκαλιού, οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες δίσκων

χρησιμοποιούνται σε κρίσιμα στάδια της γραμμής παραγωγής, όπως η ανάκτηση αιθέριου ελαίου, ο έλεγχος της περιεκτικότητας του χυμού σε έλαιο και στερεά, καθώς και ο τελικός καθαρισμός διαφόρων ρευμάτων διεργασίας. Η αξιοπιστία και η ευελιξία τους καθιστούν τον συγκεκριμένο τύπο διαχωριστήρα βασικό στοιχείο του τεχνολογικού εξοπλισμού των σύγχρονων εγκαταστάσεων επεξεργασίας εσπεριδοειδών (Tetra Pak, 2017).

## 2.6.2 Αρχή λειτουργίας φυγοκεντρικού διαχωριστήρα δίσκων

Η αρχή λειτουργίας των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων δίσκων βασίζεται στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ των φάσεων που πρόκειται να διαχωριστούν και στην ανάπτυξη ισχυρού φυγοκεντρικού πεδίου μέσω της περιστροφής του τυμπάνου υψηλής ταχύτητας. Το προς επεξεργασία ρευστό εισέρχεται στον διαχωριστήρα μέσω του ουδέτερου πόρου και αποκτά στροβιλώδη κίνηση, ακολουθώντας την περιστροφική κίνηση του συστήματος (Dong et al., 2024).

Στη συνέχεια, το ρευστό κατανέμεται στα στενά κανάλια που σχηματίζονται μεταξύ των κεκλιμένων δίσκων. Υπό την επίδραση της φυγοκεντρικής δύναμης, τα σωματίδια ή τα σταγονίδια της βαριάς φάσης μετακινούνται προς την περιφέρεια του τυμπάνου, ενώ η ελαφριά φάση τείνει να κινηθεί προς τον άξονα περιστροφής. Ο διαχωρισμός ολοκληρώνεται καθώς οι δύο φάσεις συλλέγονται σε διαφορετικές εξόδους του διαχωριστήρα (Dong et al., 2024).

Η παρουσία της δισκοστοιχίας μειώνει σημαντικά τον απαιτούμενο χρόνο και την απόσταση διαχωρισμού, γεγονός που αυξάνει την αποδοτικότητα της διεργασίας. Η ροή εντός των καναλιών χαρακτηρίζεται από συνδυασμό ακτινικής και περιφερειακής συνιστώσας, με την υδροδυναμική συμπεριφορά να επηρεάζει άμεσα την απόδοση και τη σταθερότητα του διαχωρισμού (Dong et al., 2024).

Η κατανόηση της αρχής λειτουργίας των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων δίσκων αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη σωστή επιλογή και ρύθμιση του εξοπλισμού στις βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς μικρές μεταβολές στις λειτουργικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ποιότητα του διαχωρισμού και την αξιοπιστία της διεργασίας. (Tetra Pak, 2017)

### 2.6.3 Κατανομή ροής και συμπεριφορά σταγονιδίων σε διαχωριστήρες δίσκων

Η απόδοση ενός φυγοκεντρικού διαχωριστήρα δίσκων δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος της φυγοκεντρικής επιτάχυνσης που αναπτύσσεται στο τύμπανο, αλλά επηρεάζεται καθοριστικά από τη ροή του ρευστού εντός της δισκοστοιχίας και από τον τρόπο με τον οποίο κατανέμεται η παροχή στα επιμέρους κανάλια διαχωρισμού. Σε ιδανικές συνθήκες, θα αναμενόταν ομοιόμορφη τροφοδότηση όλων των καναλιών. Ωστόσο, αριθμητικές μελέτες έχουν δείξει ότι η κατανομή της παροχής δεν είναι πλήρως ομοιόμορφη: τα ανώτερα κανάλια εμφανίζουν συνήθως μεγαλύτερη παροχή, ενώ τα κατώτερα μικρότερη, γεγονός που αποδίδεται στη γεωμετρία του διαχωριστήρα και στην κατανομή πίεσης στο εσωτερικό του τυμπάνου (Dong et al., 2024). Η ανομοιομορφία αυτή έχει πρακτικές συνέπειες, καθώς οδηγεί σε διαφορετικούς χρόνους παραμονής και διαφορετικές τοπικές συνθήκες διαχωρισμού στα επιμέρους κανάλια, επηρεάζοντας τη συνολική απόδοση. (Tetra Pak, 2017)

Η ροή εντός των καναλιών μεταξύ των δίσκων χαρακτηρίζεται από συνδυασμό περιφερειακής και ακτινικής συνιστώσας. Σε επίπεδο υδροδυναμικής, οι μέγιστες ταχύτητες παρατηρούνται στο κέντρο των καναλιών, ενώ πλησίον των επιφανειών των δίσκων αναπτύσσονται οριακά στρώματα λόγω ιξωδών φαινομένων, με αποτέλεσμα τη μείωση της ταχύτητας (Dong et al., 2024). Η ύπαρξη αυτών των οριακών στρωμάτων επηρεάζει άμεσα τη μεταφορά μάζας και τη σχετική κίνηση των σταγονιδίων ή σωματιδίων σε σχέση με το συνεχές μέσο, καθορίζοντας τελικά το κατά πόσο θα επιτευχθεί αποτελεσματικός διαχωρισμός πριν το ρευστό εξέλθει από τον διαχωριστήρα. (Tetra Pak, 2017)

Σε διεργασίες διαχωρισμού ελαίου–νερού, ιδιαίτερη σημασία έχει η συμπεριφορά των σταγονιδίων της διασπαρμένης φάσης. Κατά τη διέλευση του μίγματος από τον διαχωριστήρα παρατηρούνται φαινόμενα θραύσης και συνένωσης σταγονιδίων, τα οποία επηρεάζουν καθοριστικά το τελικό μέγεθος σταγονιδίων και, κατ' επέκταση, την ευκολία διαχωρισμού. Η θραύση των σταγονιδίων εμφανίζεται κυρίως σε περιοχές υψηλής διατμητικής καταπόνησης (π.χ. σε ζώνες έντονης μεταβολής ταχυτήτων), ενώ η συνένωση λαμβάνει χώρα κατά κύριο λόγο εντός των καναλιών διαχωρισμού, όπου οι σταγονιδιακές συγκρούσεις μπορούν να οδηγήσουν σε σχηματισμό μεγαλύτερων σταγονιδίων που διαχωρίζονται αποτελεσματικότερα υπό την επίδραση του φυγοκεντρικού πεδίου (Dong et al., 2024).

Η σχετική σημασία των μηχανισμών θραύσης και συνένωσης εξαρτάται από τις ιδιότητες του συστήματος (ιξώδες, επιφανειακή τάση, παρουσία επιφανειοδραστικών/φυσικών γαλακτωματοποιητών, περιεκτικότητα σε στερεά), αλλά και από τις λειτουργικές συνθήκες (παροχή, ταχύτητα περιστροφής, γεωμετρία δίσκων). Στην περίπτωση του χυμού πορτοκαλιού και των ρευμάτων που προκύπτουν στη διεργασία ανάκτησης αιθέριου ελαίου, η ύπαρξη φυσικών κολλοειδών και πηκτινών μπορεί να αυξάνει τη σταθερότητα των γαλακτωμάτων, καθιστώντας τη διεργασία διαχωρισμού περισσότερο απαιτητική και ενισχύοντας τη σημασία της σωστής επιλογής και ρύθμισης του διαχωριστήρα (Tetra Pak, 2017).

#### **2.6.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα διαχωρισμού**

Η αποδοτικότητα των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων δίσκων αποτελεί συνάρτηση ενός συνόλου γεωμετρικών και λειτουργικών παραμέτρων, οι οποίες καθορίζουν τόσο τη μορφή του ρεύματος εντός του τυμπάνου όσο και την ικανότητα καθίζησης/μετακίνησης της βαριάς φάσης. Ο σημαντικότερος λειτουργικός παράγοντας είναι η ταχύτητα περιστροφής του τυμπάνου, καθώς η αύξησή της οδηγεί σε ενίσχυση του φυγοκεντρικού πεδίου και επιταχύνει την καθίζηση της βαριάς φάσης προς την περιφέρεια (Dong et al., 2024). Παρότι η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής μπορεί να βελτιώνει την απόδοση, πρακτικοί περιορισμοί όπως η μηχανική αντοχή, η αύξηση της θερμοκρασίας λόγω τριβών και η πιθανή ενίσχυση διατμητικών φαινομένων (που μπορεί να οδηγήσουν σε θραύση σταγονιδίων) καθιστούν αναγκαία τη βέλτιστη, και όχι απλώς τη μέγιστη, επιλογή στροφών. (Tetra Pak, 2017)

Οι συνθήκες εκχύλισης του χυμού επηρεάζουν άμεσα τη σύσταση του μίγματος που οδηγείται στους διαχωριστήρες ανάκτησης αιθέριου ελαίου. Μεταβολές στην πίεση εκχύλισης και στον βαθμό θραύσης των κυτταρικών δομών μπορούν να αυξήσουν την παρουσία αιθέριου ελαίου και στερεών στο μίγμα, μεταβάλλοντας το φορτίο και τις απαιτήσεις λειτουργίας των διαχωριστήρων. Οι διαφοροποιήσεις αυτές ενδέχεται να επηρεάσουν τόσο την αποδοτικότητα διαχωρισμού όσο και τη συχνότητα εμφάνισης φαινομένων όπως φραγές, συσσώρευση στερεών και ανάγκη συχνότερης συντήρησης. (Tetra Pak, 2017)

Εξίσου σημαντική είναι η παροχή τροφοδοσίας, καθώς αυξημένες παροχές μειώνουν τον χρόνο παραμονής του ρευστού εντός των καναλιών διαχωρισμού, περιορίζοντας τον διαθέσιμο χρόνο για καθίζηση ή μετακίνηση της βαριάς φάσης. Η επίδραση αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη όταν ο διαχωρισμός

αφορά μικρά σταγονίδια ή λεπτόκοκκα στερεά, όπου ο απαιτούμενος χρόνος διαχωρισμού είναι μεγαλύτερος. Στην πράξη, η επιλογή παροχής πρέπει να ισορροπεί μεταξύ παραγωγικότητας και απόδοσης διαχωρισμού, με κριτήριο τις απαιτήσεις ποιότητας του τελικού προϊόντος και της διεργασίας (Svarovsky, 2000).

Η γεωμετρία της δισκοστοιχίας (αριθμός δίσκων, γωνία κλίσης, απόσταση μεταξύ δίσκων, σχεδιασμός καναλιών) επηρεάζει άμεσα το διαθέσιμο εμβαδό διαχωρισμού και την υδροδυναμική του ρεύματος. Με την κατάλληλη διαμόρφωση επιτυγχάνεται αύξηση της ενεργού επιφάνειας και μείωση της διαδρομής που πρέπει να διανύσει η βαριά φάση για να απομακρυνθεί από το ρεύμα, γεγονός που οδηγεί σε βελτίωση της θεωρητικής και πρακτικής απόδοσης (Svarovsky, 2000, Dong et al., 2024). Παράλληλα, δομικά στοιχεία όπως νευρώσεις ή διαμορφώσεις επιφανειών μπορούν να μεταβάλλουν το πεδίο ροής, να περιορίσουν ανεπιθύμητες ζώνες υστέρησης και να προάγουν πιο ευνοϊκή κατανομή παροχής στα κανάλια (Dong et al., 2024).

Ιδιαίτερη βαρύτητα έχουν οι ιδιότητες του προς διαχωρισμό μίγματος: η διαφορά πυκνότητας μεταξύ των φάσεων, το ιξώδες του συνεχούς μέσου, η επιφανειακή τάση και η παρουσία κολλοειδών/βιοπολυμερών (όπως πηκτίνες) επηρεάζουν άμεσα τη σταθερότητα του γαλακτώματος και το μέγεθος των σταγονιδίων. Σε ρεύματα χυμού πορτοκαλιού, όπου η σταθεροποίηση γαλακτωμάτων μπορεί να είναι αυξημένη, η λειτουργία του διαχωριστήρα πρέπει να προσαρμόζεται ώστε να αποφεύγονται συνθήκες που οδηγούν σε περαιτέρω θραύση σταγονιδίων και δυσκολότερο διαχωρισμό (Tetra Pak, 2017).

Συνολικά, η βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας σε φυγοκεντρικούς διαχωριστήρες δίσκων δεν μπορεί να βασιστεί σε έναν μόνο παράγοντα. Απαιτείται συνδυαστική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη την ταχύτητα περιστροφής, την παροχή, τη γεωμετρία της δισκοστοιχίας και τις ιδιότητες του μίγματος, με τελικό στόχο την επίτευξη σταθερού διαχωρισμού υπό βιομηχανικές συνθήκες και τη διασφάλιση της ποιότητας του προϊόντος (Svarovsky, 2000, Dong et al., 2024).

## **2.6.5 Τύποι φυγοκεντρικών διαχωριστήρων και κριτήρια επιλογής**

Στη βιομηχανία επεξεργασίας πορτοκαλιού χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι φυγοκεντρικών διαχωριστήρων, οι οποίοι επιλέγονται με βάση τη σύσταση του προς επεξεργασία ρεύματος, το φορτίο

στερεών, την απαιτούμενη καθαρότητα του προϊόντος και τις λειτουργικές ανάγκες της γραμμής παραγωγής. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου διαχωριστήρα αποτελεί κρίσιμο στάδιο σχεδιασμού, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο την αποδοτικότητα της διεργασίας όσο και τη λειτουργική αξιοπιστία της εγκατάστασης (Svarovsky, 2000).

Οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες συμπαγούς κάδου χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές χαμηλής παροχής και περιορισμένου φορτίου στερεών, όπου δεν απαιτείται συνεχής απομάκρυνση της στερεής φάσης. Στη χυμοποίηση πορτοκαλιού, ο τύπος αυτός απαντά συχνά στο στάδιο τελικού καθαρισμού του αιθέριου ελαίου, όπου οι παροχές είναι μικρές και το προϊόν έχει ήδη υποστεί προηγούμενο διαχωρισμό (Tetra Pak, 2017).

Αντίθετα, οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες με αυτόματη απόρριψη στερεών εφαρμόζονται σε ρεύματα με υψηλότερο φορτίο αιωρούμενων στερεών και σε γραμμές μεγάλης δυναμικότητας, καθώς επιτρέπουν συνεχή λειτουργία χωρίς ανάγκη διακοπής για καθαρισμό. Η χρήση τους είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στα αρχικά στάδια ανάκτησης αιθέριου ελαίου και στη διαχείριση δευτερογενών ρευμάτων, όπως το «κίτρινο νερό» (Tetra Pak, 2017).

Επιπλέον, σε ορισμένες εφαρμογές χρησιμοποιούνται τριφασικοί φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες, οι οποίοι επιτρέπουν τον ταυτόχρονο διαχωρισμό ελαίου, νερού και στερεών. Η δυνατότητα αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη βιομηχανία πορτοκαλιού, καθώς συμβάλλει στην απομάκρυνση πηκτινών και λεπτόκοκκων στερεών, βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση ανάκτησης αιθέριου ελαίου και τη σταθερότητα της διεργασίας (Svarovsky, 2000, Tetra Pak, 2017).

#### **2.6.6 Λειτουργικοί περιορισμοί και προβλήματα λειτουργίας φυγοκεντρικών διαχωριστήρων**

Παρά την υψηλή αποδοτικότητά τους, οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες δίσκων παρουσιάζουν ορισμένους λειτουργικούς περιορισμούς, οι οποίοι σχετίζονται τόσο με τις ιδιότητες του προς επεξεργασία ρεύματος όσο και με τις επιλεγμένες συνθήκες λειτουργίας. Στη βιομηχανία επεξεργασίας πορτοκαλιού, οι περιορισμοί αυτοί γίνονται ιδιαίτερα εμφανείς λόγω της παρουσίας φυσικών κολλοειδών, πηκτινών και σταθερών γαλακτωμάτων ελαίου–νερού (Tetra Pak, 2017).

Η αυξημένη διατμητική καταπόνηση εντός του τυμπάνου μπορεί να οδηγήσει σε θραύση των σταγονιδίων αιθέριου ελαίου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρότερων και περισσότερο σταθερών σταγονιδίων, τα οποία διαχωρίζονται δυσκολότερα. Το φαινόμενο αυτό είναι κρίσιμο σε στάδια όπου απαιτείται αυστηρός έλεγχος της περιεκτικότητας του χυμού σε έλαιο, καθώς μπορεί να επηρεάσει τόσο τη σταθερότητα της διεργασίας όσο και την ποιότητα του τελικού προϊόντος (Dong et al., 2024).

Επιπλέον, η υπερβολική αύξηση της παροχής μπορεί να μειώσει τον χρόνο παραμονής του ρευστού εντός των καναλιών διαχωρισμού, περιορίζοντας την αποτελεσματικότητα της καθίζησης της βαριάς φάσης. Σε συνδυασμό με αυξημένο ιξώδες ή υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά, η κατάσταση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της συνολικής απόδοσης και σε αστάθεια της λειτουργίας (Svarovsky, 2000).

Για την αντιμετώπιση των παραπάνω περιορισμών, απαιτείται προσεκτική ρύθμιση των λειτουργικών παραμέτρων, καθώς και σωστή επιλογή του τύπου διαχωριστήρα ανάλογα με την εφαρμογή. Η κατανόηση των πιθανών προβλημάτων λειτουργίας και των αιτιών τους αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση σταθερής απόδοσης και την αποφυγή απωλειών προϊόντος σε βιομηχανικές συνθήκες (Tetra Pak, 2017).

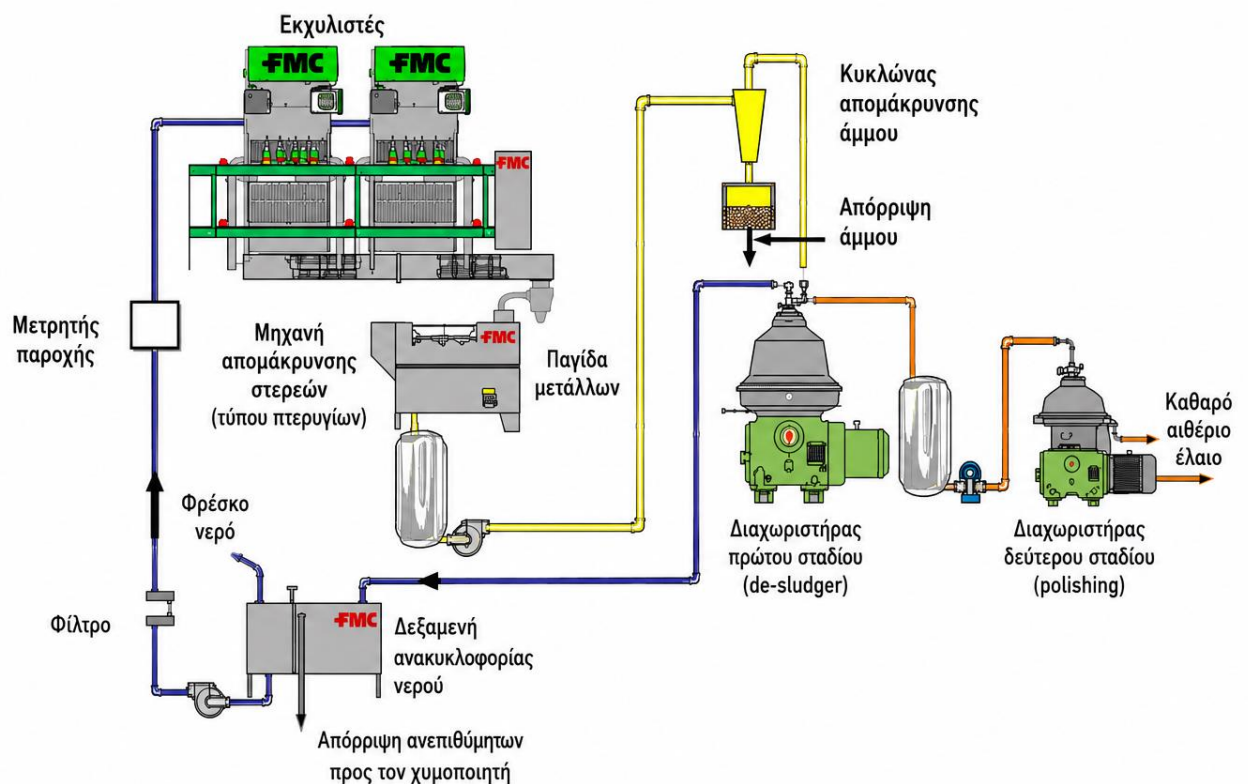
### **2.6.7 Εφαρμογή φυγοκεντρικών διαχωριστήρων στη βιομηχανία επεξεργασίας πορτοκαλιού**

Στη βιομηχανία επεξεργασίας πορτοκαλιού, οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες δίσκων αποτελούν βασικό τμήμα της γραμμής παραγωγής, καθώς εφαρμόζονται σε πολλαπλά στάδια διαχωρισμού με διαφορετικές λειτουργικές απαιτήσεις. Η ευρεία χρήση τους οφείλεται στην ικανότητά τους να επεξεργάζονται γαλακτώματα ελαίου–νερού, λεπτόκοκκα στερεά και σύνθετα ρεύματα που προκύπτουν τόσο κατά τη χυμοποίηση όσο και κατά την ανάκτηση αιθέριου ελαίου (Svarovsky, 2000).

Στο υπό μελέτη εργοστάσιο εφαρμόζεται σύστημα ανάκτησης αιθέριου ελαίου δύο σταδίων, το οποίο περιλαμβάνει στάδια εκχύλισης, απομάκρυνσης στερεών μέσω διαχωριστήρα πτερυγίων, απομάκρυνσης άμμου μέσω κυκλώνα, πρωτογενούς φυγοκεντρικού διαχωρισμού με διαχωριστήρα τύπου de-sludger και τελικού καθαρισμού με φυγοκεντρικό διαχωριστήρα polishing. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη

συνεχή επεξεργασία του γαλακτώματος ελαίου–νερού και τη σταδιακή απομάκρυνση στερεών και ανεπιθύμητων φάσεων, με στόχο την παραγωγή αιθέριου ελαίου υψηλής καθαρότητας. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη συνεχή επεξεργασία του γαλακτώματος ελαίου–νερού και την αποτελεσματική απομάκρυνση στερεών και ανεπιθύμητων φάσεων. Η γενική διάταξη του συστήματος ανάκτησης αιθέριου ελαίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4 (JBT FoodTech, 2008).

## Τυπικό σύστημα ανάκτησης αιθέριου ελαίου πορτοκαλιού



Εικόνα 1 Τυπική διάταξη συστήματος ανάκτησης αιθέριου ελαίου πορτοκαλιού με χρήση φυγοκεντρικών διαχωριστήρων (προσαρμογή από JBT FoodTech, 2008).

Κατά το στάδιο εκχύλισης εφαρμόζεται νερό ψεκασμού στην επιφάνεια του καρπού κατά τη λειτουργία του εκχυλιστή, προκαλώντας θραύση των ελαιοφόρων αδένων της φλούδας και δημιουργία γαλακτώματος ελαίου–νερού. Το γαλάκτωμα αυτό περιέχει μικρά σταγονίδια αιθέριου ελαίου, νερό και στερεά σωματίδια φλούδας, τα οποία οδηγούνται στα επόμενα στάδια επεξεργασίας. Η εφαρμογή νερού κατά το στάδιο εκχύλισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5 (JBT FoodTech, 2008).

Στη συνέχεια, το γαλάκτωμα οδηγείται σε στάδιο απομάκρυνσης στερεών μέσω finisher, όπου απομακρύνονται μεγαλύτερα σωματίδια φλούδας και αιωρούμενα στερεά. Η παρουσία αυξημένων ποσοτήτων στερεών και πηκτικής μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την αποδοτικότητα του φυγοκεντρικού διαχωρισμού, αυξάνοντας το ιξώδες του μίγματος και δυσχεραίνοντας τον διαχωρισμό των φάσεων (JBT FoodTech, 2008).

Κατά το στάδιο της ανάκτησης αιθέριου ελαίου από τη φλούδα πορτοκαλιού, οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες χρησιμοποιούνται αρχικά για τον πρωτογενή διαχωρισμό του γαλακτώματος ελαίου–νερού. Στο στάδιο αυτό, το αιθέριο έλαιο βρίσκεται υπό μορφή λεπτοδιασπαρμένων σταγονιδίων, ενώ παράλληλα το μίγμα περιέχει νερό και στερεά σωματίδια φλούδας. Η επιλογή κατάλληλων λειτουργικών συνθηκών είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς υψηλές διατμητικές καταπονήσεις μπορούν να προκαλέσουν θραύση των σταγονιδίων και δυσχερέστερο διαχωρισμό στα επόμενα στάδια της διεργασίας (Tetra Pak, 2017).

Η αύξηση της παροχής τροφοδοσίας και του φορτίου στερεών στο εισερχόμενο μίγμα αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες υποβάθμισης της αποδοτικότητας των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων. Η λειτουργία εκτός των βέλτιστων συνθηκών μπορεί να μεταβάλει το εσωτερικό πεδίο ροής και να μειώσει την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού, οδηγώντας σε αυξημένες απώλειες προϊόντος (Dong et al., 2024).

Παράλληλα, η υπερβολική συγκέντρωση στερεών αυξάνει τη συχνότητα συσσώρευσης υπολειμμάτων στον κάδο, επιβαρύνοντας τη λειτουργική σταθερότητα του εξοπλισμού και αυξάνοντας τις απαιτήσεις καθαρισμού και συντήρησης. Για τον λόγο αυτό, ο έλεγχος της παροχής τροφοδοσίας, της θερμοκρασίας και της ποιότητας του γαλακτώματος αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση σταθερής απόδοσης κατά τη βιομηχανική λειτουργία (JBT FoodTech, 2008).

Στο πρώτο στάδιο φυγοκέντρωσης χρησιμοποιείται φυγοκεντρικός διαχωριστήρας τύπου de-sludger, όπου πραγματοποιείται απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους της υδατικής φάσης και των στερεών. Από τη διεργασία αυτή παράγεται συμπυκνωμένο γαλάκτωμα πλούσιο σε αιθέριο έλαιο, το οποίο οδηγείται στο

επόμενο στάδιο επεξεργασίας. Ενδεικτική διάταξη de-sludger φυγοκεντρικού διαχωριστήρα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6 (JBT FoodTech, 2008).

Μετά τον πρωτογενή διαχωρισμό, το συμπυκνωμένο ρεύμα αιθέριου ελαίου οδηγείται σε δεύτερο στάδιο φυγοκέντρωσης, γνωστό ως στάδιο τελικού καθαρισμού. Στο στάδιο αυτό, οι παροχές είναι σημαντικά χαμηλότερες σε σχέση με το πρώτο στάδιο, ενώ ο κύριος στόχος είναι η επίτευξη υψηλής καθαρότητας του τελικού προϊόντος. Μέσω της απομάκρυνσης υπολειμματικού νερού και λεπτόκοκκων στερεών επιτυγχάνεται σταθεροποίηση της ποιότητας και βελτίωση των χαρακτηριστικών αποθήκευσης του αιθέριου ελαίου (JBT FoodTech, 2008).

Σε εγκαταστάσεις μεγάλης δυναμικότητας χρησιμοποιούνται συνήθως διαχωριστήρες με αυτόματη απόρριψη στερεών, οι οποίοι επιτρέπουν συνεχή λειτουργία και μειωμένες ανάγκες διακοπής της παραγωγικής διαδικασίας. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου διαχωριστήρα επηρεάζει σημαντικά τόσο την καθαρότητα του τελικού προϊόντος όσο και τη συνολική λειτουργική αποδοτικότητα της εγκατάστασης (Tetra Pak, 2017).

Πέρα από την ανάκτηση αιθέριου ελαίου, οι φυγοκεντρικοί διαχωριστήρες χρησιμοποιούνται και στη διαχείριση δευτερογενών ρευμάτων της διεργασίας, συμβάλλοντας στην ανάκτηση αξιοποιήσιμων συστατικών και στη μείωση του οργανικού φορτίου των απορριπτόμενων ρευμάτων. Η εφαρμογή τους αποτελεί σημαντικό στοιχείο για τη βελτιστοποίηση της συνολικής παραγωγικής διαδικασίας στη βιομηχανία επεξεργασίας πορτοκαλιού (Tetra Pak, 2017).

Συνολικά, η εφαρμογή φυγοκεντρικών διαχωριστήρων στη βιομηχανία επεξεργασίας πορτοκαλιού εκτείνεται σε ολόκληρη τη γραμμή παραγωγής, από το στάδιο δημιουργίας του γαλακτώματος έως τον τελικό καθαρισμό του αιθέριου ελαίου. Η κατανόηση της λειτουργίας, των παραμέτρων που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του διαχωρισμού και των απαιτήσεων της βιομηχανικής διεργασίας αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη διατήρηση σταθερής ποιότητας προϊόντος και αποδοτικής λειτουργίας της εγκατάστασης (Svarovsky, 2000).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

### ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ

#### 3.1 Διαδικασία δειγματοληψίας και μετρήσεων

Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε πραγματικά λειτουργικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από βιομηχανική μονάδα επεξεργασίας εσπεριδοειδών, στην οποία πραγματοποιείται ανάκτηση αιθέριου ελαίου μέσω φυγοκεντρικών διαχωριστήρων συστοιχίας δίσκων. Η διεργασία λειτουργεί σε συνθήκες συνεχούς παραγωγής, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη συστηματική παρακολούθηση των βασικών λειτουργικών παραμέτρων (Montgomery, 2019).

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της παραγωγικής περιόδου των μηνών Δεκεμβρίου, Ιανουαρίου και Φεβρουαρίου, κατά τους οποίους η μονάδα λειτουργούσε σε καθεστώς συνεχούς παραγωγής (24 ώρες ημερησίως). Οι μετρήσεις συλλέγονταν στο πλαίσιο του καθημερινού ελέγχου λειτουργίας της μονάδας από το προσωπικό παραγωγής κατά τη διάρκεια των βάρδιών. Η συχνότητα καταγραφής δεν ήταν σταθερή, ωστόσο πραγματοποιούνταν συνήθως περίπου δύο μετρήσεις ανά βάρδια στις πρωινές και απογευματινές ώρες, ενώ κατά τη νυχτερινή βάρδια ο αριθμός των μετρήσεων ήταν συνήθως μικρότερος. Συνολικά συγκεντρώθηκαν 135 παρατηρήσεις, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη στατιστική επεξεργασία και την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της διεργασίας υπό πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες λειτουργίας.

Οι μετρήσεις προέρχονται από το σύστημα καταγραφής της μονάδας και περιλαμβάνουν βασικές λειτουργικές μεταβλητές της διεργασίας, όπως η παροχή τροφοδοσίας, η συγκέντρωση αιθέριου ελαίου στον χυμό, οι πιέσεις λειτουργίας και άλλες παράμετροι που σχετίζονται με τη λειτουργία των διαχωριστήρων. Η επιλογή των μεταβλητών αυτών βασίστηκε στη σημασία τους για την αξιολόγηση της απόδοσης του διαχωρισμού και της συνολικής σταθερότητας της διεργασίας (Dong et al., 2024).

Η συστηματική δειγματοληψία και καταγραφή των δεδομένων διασφαλίζει τη συγκρισιμότητα των μετρήσεων και επιτρέπει την παρακολούθηση της εξέλιξης της διεργασίας στον χρόνο. Μέσω της ανάλυσης των δεδομένων αυτών καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός τάσεων, αποκλίσεων και πιθανών μεταβολών στη

λειτουργία του συστήματος, οι οποίες μπορεί να σχετίζονται είτε με αλλαγές στις συνθήκες λειτουργίας είτε με τη μηχανική κατάσταση του εξοπλισμού (Montgomery, 2019).

## 3.2 Λειτουργικά δεδομένα και προκαθορισμένα όρια ελέγχου

Η ανάλυση της διεργασίας βασίστηκε σε 135 λειτουργικές μετρήσεις που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της παραγωγικής περιόδου Δεκεμβρίου–Φεβρουαρίου και αντανακλούν τη συμπεριφορά των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν βασικές λειτουργικές μεταβλητές, όπως η παροχή τροφοδοσίας, η παροχή νερού, οι πιέσεις λειτουργίας και οι συγκεντρώσεις αιθέριου ελαίου στις επιμέρους φάσεις της διεργασίας. Οι μεταβλητές αυτές επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικοί δείκτες της λειτουργικής κατάστασης του συστήματος, καθώς επηρεάζουν άμεσα την απόδοση του διαχωρισμού και τη σταθερότητα της παραγωγικής διαδικασίας.

Για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των μεταβλητών χρησιμοποιήθηκαν ακατέργαστα δεδομένα, χωρίς αρχικό φιλτράρισμα ή απομάκρυνση ακραίων τιμών, ώστε να διατηρηθεί η πραγματική εικόνα της διεργασίας. Με βάση τα δεδομένα αυτά υπολογίστηκαν βασικά στατιστικά μεγέθη, όπως η μέση τιμή και η διακύμανση, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό προκαταρκτικών ορίων ελέγχου.

Τα προκαταρκτικά όρια ελέγχου προσδιορίστηκαν με βάση τη στατιστική κατανομή των δεδομένων και χρησιμοποιήθηκαν ως αρχική εκτίμηση της περιοχής φυσιολογικής λειτουργίας της διεργασίας. Η προσέγγιση αυτή αποτελεί βασικό στάδιο της στατιστικής ανάλυσης διεργασιών και χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της σταθερότητας του συστήματος και την περαιτέρω εφαρμογή εργαλείων στατιστικού ελέγχου (Montgomery, 2019).

Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση υπολογιστικών εργαλείων, τα οποία επέτρεψαν την οργάνωση και την ανάλυση των μετρήσεων, καθώς και την απεικόνιση της συμπεριφοράς των μεταβλητών στον χρόνο.

### 3.2.1 Ορισμός μεταβλητών διεργασίας

Κατά τη διάρκεια της παρούσας μελέτης καταγράφηκαν λειτουργικές και παραγωγικές μεταβλητές που σχετίζονται με τη λειτουργία του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα και τη διεργασία ανάκτησης αιθέριου

ελαίου από τα παραπροϊόντα επεξεργασίας εσπεριδοειδών. Η επιλογή των μεταβλητών βασίστηκε στη συμβολή τους στην περιγραφή της συμπεριφοράς της διεργασίας υπό πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες και στη δυνατότητά τους να αποτυπώσουν μεταβολές που επηρεάζουν την αποδοτικότητα του διαχωρισμού και τη συνολική απόδοση της μονάδας. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, η συνεχής παρακολούθηση λειτουργικών μεταβλητών αποτελεί βασικό εργαλείο για τον έλεγχο και τη βελτιστοποίηση βιομηχανικών διεργασιών διαχωρισμού, ιδιαίτερα σε συστήματα επεξεργασίας τροφίμων και υγρών γαλακτωμάτων (Halder et al., 2022, Dong et al., 2024).

Οι βασικές λειτουργικές μεταβλητές που καταγράφηκαν περιλάμβαναν την παροχή νερού, την παροχή τροφοδοσίας του διαχωριστήρα, την πτώση πίεσης ( $\Delta P$ ), τις πιέσεις εξόδου νερού και λαδιού, καθώς και την περιεκτικότητα λαδιού στις επιμέρους φάσεις της διεργασίας. Οι μεταβλητές αυτές σχετίζονται άμεσα με τη λειτουργική κατάσταση του διαχωριστήρα και επηρεάζουν τη συμπεριφορά της ροής και τον βαθμό διαχωρισμού των φάσεων στο εσωτερικό του εξοπλισμού. Η πτώση πίεσης χρησιμοποιήθηκε ως μία από τις σημαντικότερες λειτουργικές παραμέτρους της διεργασίας, καθώς μεταβολές στις τιμές της μπορεί να συνδέονται με αλλαγές στη φόρτιση του συστήματος, στη σταθερότητα της λειτουργίας ή ακόμη και στη συνολική απόδοση του διαχωριστήρα. Αντίστοιχες παράμετροι χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων για την αξιολόγηση και τον έλεγχο φυγοκεντρικών διεργασιών διαχωρισμού (Svarovsky, 2000, Tetra Pak, 2017).

Παράλληλα, ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην παρακολούθηση της περιεκτικότητας λαδιού στις διάφορες φάσεις της διεργασίας, όπως στην είσοδο του διαχωριστήρα, στην έξοδο νερού και στην έξοδο λαδιού. Οι μεταβλητές αυτές χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος διαχωρισμού και για την εκτίμηση πιθανών απωλειών αιθέριου ελαίου κατά τη λειτουργία της διεργασίας. Η διερεύνηση των απωλειών αυτών θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική σε βιομηχανικές εφαρμογές επεξεργασίας εσπεριδοειδών, καθώς επηρεάζει άμεσα τόσο τη συνολική ανάκτηση αιθέριου ελαίου όσο και την οικονομική αποδοτικότητα της παραγωγικής διαδικασίας (Benelli et al., 2020). Επιπλέον, σύμφωνα με πιο πρόσφατες μελέτες, η διερεύνηση των απωλειών λαδιού αποτελεί σημαντικό στοιχείο για τη

βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας και την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των παραπροϊόντων των εσπεριδοειδών (Welti-Chanes et al., 2025).

Για την αξιολόγηση της λειτουργίας του διαχωριστήρα χρησιμοποιήθηκε η μεταβλητή Αποτελεσματικότητα Διαχωρισμού (%), η οποία εκφράζει το ποσοστό απομάκρυνσης του λαδιού από τη φάση του νερού κατά τη διαδικασία διαχωρισμού. Η μεταβλητή αυτή υπολογίστηκε με βάση τη μεταβολή της περιεκτικότητας λαδιού μεταξύ της εισόδου του διαχωριστήρα και της εξόδου νερού, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση.

Αποτελεσματικότητα Διαχωρισμού (%) =  $(S1 - S2) / S1 \times 100$ , όπου:

S1: περιεκτικότητα λαδιού στην είσοδο του διαχωριστήρα

S2: περιεκτικότητα λαδιού στην έξοδο νερού

Υψηλότερες τιμές υποδηλώνουν αποτελεσματικότερο διαχωρισμό και μικρότερες απώλειες αιθέριου ελαίου προς τη φάση του νερού, ενώ χαμηλότερες τιμές ενδέχεται να συνδέονται με αστάθεια της διεργασίας ή με μεταβολές στις λειτουργικές συνθήκες της μονάδας.

Επιπλέον, εξετάστηκε η μεταβλητή Αποτελεσματικότητα Ανάκτησης Λαδιού (%), η οποία εκφράζει τον βαθμό ανάκτησης του αιθέριου ελαίου και χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση πιθανών απωλειών κατά τη λειτουργία της διεργασίας. Η παρακολούθησή της συνέβαλε στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς του συστήματος και στον εντοπισμό αποκλίσεων που ενδέχεται να επηρεάζουν τη συνολική αποδοτικότητα ανάκτησης. Η χρήση αντίστοιχων δεικτών είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη σε βιομηχανικά συστήματα διαχωρισμού, καθώς διευκολύνει την κατανόηση της λειτουργίας της διεργασίας και τον εντοπισμό μεταβολών στις συνθήκες λειτουργίας (Halder et al., 2022).

Για τη συνολική αξιολόγηση της παραγωγικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε επίσης η μεταβλητή Συνολική Απόδοση Διεργασίας (%), η οποία εκφράζει τη συνολική αποδοτικότητα της διεργασίας ανάκτησης αιθέριου ελαίου. Η μεταβλητή αυτή αποτελεί έναν σύνθετο δείκτη, καθώς συνδυάζει

πληροφορίες που σχετίζονται με το ποσοστό νερού που οδηγείται προς τον διαχωριστήρα, την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού και τις απώλειες λαδιού κατά τη λειτουργία της διεργασίας. Ο υπολογισμός της πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση.

$$\text{Συνολική Απόδοση Διεργασίας (\%)} = \frac{W \times E \times (100 - 4L)}{10000}$$

όπου:

W: ποσοστό νερού προς τον διαχωριστήρα

E: αποτελεσματικότητα διαχωρισμού

L: περιεκτικότητα λαδιού στην έξοδο νερού του polisher

Η μεταβλητή αυτή χρησιμοποιήθηκε ως σύνθετος δείκτης αξιολόγησης της διεργασίας, καθώς συνδυάζει πληροφορίες που σχετίζονται με την τροφοδοσία του συστήματος, την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού και τις απώλειες αιθέριου ελαίου προς την υδατική φάση. Με τον τρόπο αυτό παρέχει μια συνολική εικόνα της λειτουργικής απόδοσης της διεργασίας και επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας. Η χρήση σύνθετων δεικτών αξιολόγησης είναι συνηθισμένη σε βιομηχανικές διεργασίες, καθώς διευκολύνει την παρακολούθηση της σταθερότητας του συστήματος και τον εντοπισμό μεταβολών που επηρεάζουν τη συνολική του απόδοση (Montgomery, 2019· Welti-Chanes et al., 2025).

Τέλος, αξιολογήθηκε και η μεταβλητή Απόδοση Αιθέριου Ελαίου (% κ.β. φρούτου), η οποία εκφράζει την ποσότητα αιθέριου ελαίου που ανακτάται σε σχέση με τη μάζα του επεξεργασμένου φρούτου. Η συγκεκριμένη μεταβλητή αποτελεί σημαντικό δείκτη παραγωγικής αξιοποίησης της πρώτης ύλης και συνδέεται άμεσα με τη συνολική παραγωγική απόδοση της μονάδας επεξεργασίας εσπεριδοειδών. Η παρακολούθηση της απόδοσης αυτής θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική τόσο για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας ανάκτησης αιθέριου ελαίου όσο και για τη διερεύνηση της επίδρασης λειτουργικών

παραμέτρων στη συνολική συμπεριφορά της διεργασίας. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η βελτιστοποίηση της απόδοσης ανάκτησης αιθέριων ελαίων αποτελεί βασικό στόχο των σύγχρονων βιομηχανικών εφαρμογών αξιοποίησης παραπροϊόντων εσπεριδοειδών, καθώς συνδέεται τόσο με τη βιωσιμότητα της παραγωγικής διαδικασίας όσο και με τη συνολική οικονομική απόδοση της μονάδας (Benelli et al., 2020, Welti-Chanes et al., 2025).

### 3.3 Καταγραφή και παρακολούθηση συντηρήσεων και βλαβών

Η αξιολόγηση της συντηρησιμότητας των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων βασίζεται στη συστηματική καταγραφή γεγονότων συντήρησης και αστοχίας και στη χρονική συσχέτισή τους με τις λειτουργικές μετρήσεις της διεργασίας. Η προσέγγιση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς η απόδοση των φυγοκεντρικών διαχωριστήρων συστοιχίας δίσκων επηρεάζεται όχι μόνο από τις συνθήκες τροφοδοσίας αλλά και από την τεχνική κατάσταση του εξοπλισμού. Συνεπώς, η ερμηνεία μεταβολών στην αποδοτικότητα του διαχωρισμού απαιτεί τη συνεξέταση πληροφοριών που αφορούν παρεμβάσεις συντήρησης, καθαρισμούς και ενδεχόμενες αστοχίες του συστήματος. Πρόσφατες μελέτες δυναμικής μοντελοποίησης φυγοκεντρικών συστημάτων έχουν δείξει ότι μεταβολές στη λειτουργική κατάσταση του εξοπλισμού μπορούν να οδηγήσουν σε προσωρινές αποκλίσεις της απόδοσης και σε μη σταθερή συμπεριφορά της διεργασίας (Baust et al., 2025).

Για τη διερεύνηση της συντηρησιμότητας συλλέγονται και οργανώνονται δεδομένα συντήρησης από τα αρχεία της βιομηχανικής μονάδας. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν προγραμματισμένες εργασίες προληπτικής συντήρησης, καθαρισμούς εξοπλισμού, αντικαταστάσεις εξαρτημάτων καθώς και διορθωτικές παρεμβάσεις που πραγματοποιούνται μετά από εμφάνιση βλάβης. Κάθε γεγονός συντήρησης καταγράφεται με σαφή χρονική σήμανση, ταυτοποίηση του εξοπλισμού και σύντομη περιγραφή της εργασίας που πραγματοποιήθηκε. Όπου είναι διαθέσιμα, καταγράφονται επίσης στοιχεία σχετικά με την αιτία της παρέμβασης, τα χρησιμοποιούμενα ανταλλακτικά και τη διάρκεια της ακινητοποίησης του εξοπλισμού. Η ύπαρξη χρονικής σήμανσης επιτρέπει τη σύνδεση των γεγονότων συντήρησης με τις αντίστοιχες

χρονοσειρές λειτουργικών δεδομένων και διευκολύνει τη διερεύνηση της επίδρασης των παρεμβάσεων στη μεταβλητότητα της διεργασίας (Shojaee et al., 2024).

Η κατηγοριοποίηση των συμβάντων συντήρησης πραγματοποιείται σε δύο επίπεδα. Σε λειτουργικό επίπεδο διακρίνονται οι προληπτικές ενέργειες, οι οποίες αποσκοπούν στη διατήρηση της ικανότητας λειτουργίας του εξοπλισμού, και οι διορθωτικές ενέργειες που πραγματοποιούνται μετά την εμφάνιση αστοχίας. Σε τεχνικό επίπεδο τα συμβάντα ταξινομούνται σύμφωνα με πιθανούς μηχανισμούς υποβάθμισης περιστρεφόμενου εξοπλισμού, όπως φθορά εδράνων, αστοχίες στεγανοποιήσεων, ανισορροπία περιστρεφόμενων μερών, προβλήματα ευθυγράμμισης ή φαινόμενα επικαθίσεων και φραγών στο εσωτερικό του διαχωριστήρα. Η ταξινόμηση αυτή βασίζεται σε καθιερωμένες πρακτικές παρακολούθησης κατάστασης περιστρεφόμενων μηχανών, όπου οι παραπάνω μηχανισμοί αποτελούν συχνές αιτίες διαταραχών στη λειτουργία και στη σταθερότητα των συστημάτων (Kundu et al., 2024).

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η καταγραφή των συμβάντων συντήρησης συνδέεται άμεσα με την παρακολούθηση αποκλίσεων σε κρίσιμες λειτουργικές μεταβλητές της διεργασίας. Μεταβολές στις πιέσεις λειτουργίας, στις παροχές ή αυξημένες συγκεντρώσεις ελαίου στο ρεύμα εκροής μπορούν να αποτελέσουν ενδείξεις μεταβολής της κατάστασης του εξοπλισμού. Για τον λόγο αυτό εξετάζεται εάν τέτοιες αποκλίσεις εμφανίζονται πριν από διορθωτικές παρεμβάσεις, εάν μειώνονται μετά από εργασίες καθαρισμού ή συντήρησης και εάν επανεμφανίζονται με συγκεκριμένη περιοδικότητα. Η σύνδεση λειτουργικών δεδομένων με γεγονότα συντήρησης αποτελεί βασική αρχή των σύγχρονων προσεγγίσεων ολοκληρωμένης διαχείρισης παραγωγής και συντήρησης, όπου η πολιτική συντήρησης επηρεάζει άμεσα την ποιότητα του προϊόντος και την αποδοτικότητα της παραγωγής (Shojaee et al., 2024).

Η αξιολόγηση της συντηρησιμότητας υποστηρίζεται από την περιγραφική ανάλυση βασικών δεικτών αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας του εξοπλισμού, στο βαθμό που υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία σχετικά με τους χρόνους έναρξης και λήξης των παρεμβάσεων. Σε πρώτο επίπεδο εξετάζεται ο αριθμός των συμβάντων ανά χρονική περίοδο, ο συνολικός χρόνος ακινητοποίησης του εξοπλισμού και η κατανομή των αιτίων βλάβης. Σε δεύτερο επίπεδο, τα στοιχεία αυτά συσχετίζονται με μεταβολές της αποδοτικότητας του διαχωρισμού, του ποσοστού ελαίου στην εκροή και της σταθερότητας των πιέσεων λειτουργίας. Η

προσέγγιση αυτή είναι συμβατή με πρακτικές συντήρησης με βάση την κατάσταση λειτουργίας του εξοπλισμού, όπου η ανίχνευση πρώιμων ενδείξεων μέσω λειτουργικών σημάτων επιτρέπει τη μείωση μη προγραμματισμένων διακοπών λειτουργίας και τη βελτίωση της συνολικής αξιοπιστίας του συστήματος (Kumar et al., 2025).

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η καταγραφή των διαδικασιών καθαρισμού του εξοπλισμού, καθώς σε συστήματα επεξεργασίας τροφίμων οι επικαθίσεις και οι φραγές μπορούν να μεταβάλλουν τη ροϊκή συμπεριφορά του μίγματος και να οδηγήσουν σε αποκλίσεις πιέσεων ή μεταβολές στην αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού. Η υγιεινή σχεδίαση και η αποτελεσματικότητα των διαδικασιών καθαρισμού σε φυγοκεντρικούς διαχωριστήρες δίσκων έχουν αναγνωριστεί ως σημαντικοί παράγοντες για τη διατήρηση σταθερής λειτουργίας και την αποφυγή προβλημάτων στη διεργασία (EHEDG, 2025).

### 3.4 Στατιστική επεξεργασία και μαθηματική θεμελίωση της ανάλυσης

Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων αποσκοπεί στον ποσοτικό χαρακτηρισμό της λειτουργίας της διεργασίας, στην εκτίμηση της φυσικής μεταβλητότητας των μεταβλητών και στην ανίχνευση πιθανών αποκλίσεων που μπορεί να συνδέονται με λειτουργικές ή τεχνικές μεταβολές του συστήματος. Η ανάλυση βασίζεται σε χρονοσειρές μετρήσεων λειτουργικών μεταβλητών και δεικτών αποδοτικότητας, οι οποίες προκύπτουν από συστηματική ισαπέχουσα δειγματοληψία κατά τη διάρκεια κανονικής παραγωγικής λειτουργίας. Η προσέγγιση αυτή είναι συμβατή με τις αρχές του στατιστικού ελέγχου διεργασιών σε περιβάλλοντα συνεχούς παραγωγής, όπου η παρακολούθηση των μεταβολών των δεδομένων επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση αλλαγών στη συμπεριφορά του συστήματος (Salmasnia et al., 2024).

Σε πρώτο στάδιο εφαρμόζεται περιγραφική στατιστική ανάλυση των βασικών μεταβλητών της διεργασίας. Για κάθε μεταβλητή υπολογίζονται δείκτες όπως η αριθμητική μέση τιμή, η διακύμανση και η τυπική απόκλιση. Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν την εκτίμηση της κεντρικής τάσης και της διασποράς των δεδομένων και αποτελούν θεμελιώδη εργαλεία για τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς βιομηχανικών διεργασιών (Montgomery, 2020). Η ποσοτική αποτύπωση της μεταβλητότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική,

καθώς η σταθερότητα μιας διεργασίας δεν αξιολογείται μόνο από τη μέση τιμή αλλά και από το εύρος των διακυμάνσεων γύρω από αυτήν (Salmasnia et al., 2024).

Για την παρακολούθηση της σταθερότητας της διεργασίας χρησιμοποιούνται διαγράμματα ελέγχου μεταβλητών. Στα διαγράμματα αυτά τα ανώτερα και κατώτερα όρια ελέγχου καθορίζονται με βάση τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των δεδομένων. Η χρήση ορίων τριών τυπικών αποκλίσεων επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ φυσικής μεταβλητότητας της διεργασίας και μεταβολών που οφείλονται σε αναθέσιμες αιτίες. Η αρχή αυτή αποτελεί βασικό στοιχείο του στατιστικού ελέγχου ποιότητας και εφαρμόζεται ευρέως σε συστήματα βιομηχανικής παραγωγής (Montgomery, 2020). Η εφαρμογή διαγραμμάτων ελέγχου σε διεργασίες συνεχούς ροής έχει αποδειχθεί αποτελεσματική για την έγκαιρη ανίχνευση μετατοπίσεων της διεργασίας (Salmasnia et al., 2024).

Προκειμένου να αξιολογηθεί η πιθανή επίδραση γεγονότων συντήρησης στην απόδοση της διεργασίας, πραγματοποιείται σύγκριση μέσων τιμών μεταξύ χρονικών περιόδων πριν και μετά από συγκεκριμένες παρεμβάσεις. Η σύγκριση αυτή πραγματοποιείται μέσω παραμετρικού ελέγχου υποθέσεων, υπό την προϋπόθεση ότι τα δεδομένα ακολουθούν κανονική κατανομή. Ο έλεγχος  $t$  για ανεξάρτητα δείγματα χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση πιθανών διαφορών μεταξύ των δύο συνόλων δεδομένων και αποτελεί καθιερωμένη μέθοδο σύγκρισης μέσων τιμών σε δεδομένα βιομηχανικών διεργασιών (Montgomery, 2020).

Η κανονικότητα των δεδομένων εξετάζεται μέσω κατάλληλων στατιστικών δοκιμών κανονικότητας, ώστε να διασφαλιστεί η εγκυρότητα των παραμετρικών ελέγχων. Η επαλήθευση των στατιστικών προϋποθέσεων αποτελεί σημαντικό στάδιο της στατιστικής ανάλυσης, καθώς η εφαρμογή ακατάλληλων μεθόδων μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα σχετικά με τη λειτουργία της διεργασίας (Salmasnia et al., 2024).

## **4.1 Περιγραφή δεδομένων**

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία συλλέχθηκαν κατά την καθημερινή λειτουργία της μονάδας παραγωγής και αφορούν τη διεργασία διαχωρισμού και ανάκτησης αιθέριου ελαίου πορτοκαλιού. Για κάθε χρονική καταγραφή καταχωρήθηκαν λειτουργικές παράμετροι του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα, καθώς και μεταβλητές που σχετίζονται με την απόδοση της διεργασίας.

Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν η παροχή τροφοδοσίας, το ποσοστό νερού, η πτώση πίεσης ( $\Delta P$ ), οι συγκεντρώσεις ελαίου στα ρεύματα εισόδου και εξόδου, καθώς και το ποσοστό πούλπας. Από τις μετρήσεις αυτές υπολογίστηκε η αποδοτικότητα διαχωρισμού (% Efficiency), η οποία χρησιμοποιήθηκε ως βασικός δείκτης αξιολόγησης της λειτουργίας του διαχωριστήρα.

Παράλληλα, υπολογίστηκε η απόδοση αιθέριου ελαίου (%), η οποία εκφράζει την ποσότητα αιθέριου ελαίου που ανακτάται σε σχέση με την ποσότητα επεξεργαζόμενου φρούτου και αποτελεί βασικό δείκτη της συνολικής αποδοτικότητας της παραγωγικής διαδικασίας.

Για τις ανάγκες της στατιστικής ανάλυσης, ορισμένες μεταβλητές ομαδοποιήθηκαν σε κατηγορίες χαμηλών, μεσαίων και υψηλών τιμών, ώστε να διερευνηθεί η επίδρασή τους στην αποδοτικότητα διαχωρισμού. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γραφικής και στατιστικής ανάλυσης των δεδομένων με στόχο την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της διεργασίας και τον εντοπισμό παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοσή της.

## **4.2 Γραφική ανάλυση των δεδομένων της διεργασίας**

Η γραφική ανάλυση αποτελεί βασικό στάδιο της διερευνητικής ανάλυσης δεδομένων και συμβάλλει στην κατανόηση της συμπεριφοράς της διεργασίας πριν από την εφαρμογή πιο εξειδικευμένων στατιστικών εργαλείων. Μέσω της οπτικής απεικόνισης των δεδομένων είναι δυνατό να εντοπιστούν τάσεις, μεταβολές,

ακραίες παρατηρήσεις και πιθανά πρότυπα λειτουργίας που δεν είναι πάντοτε εμφανή από τους αριθμητικούς δείκτες.

Στην παρούσα εργασία η γραφική διερεύνηση επικεντρώνεται κυρίως στην αποδοτικότητα διαχωρισμού και στην απόδοση αιθέριου ελαίου, οι οποίες αποτελούν βασικούς δείκτες αξιολόγησης της διεργασίας. Παράλληλα, εξετάζονται λειτουργικές παράμετροι όπως η παροχή τροφοδοσίας, η πτώση πίεσης, το ποσοστό νερού και η περιεκτικότητα σε πούλπα, καθώς οι μεταβολές τους ενδέχεται να επηρεάζουν την απόδοση του συστήματος.

Για την αξιολόγηση των δεδομένων χρησιμοποιούνται ιστογράμματα κατανομής, θηκογράμματα και διαγράμματα χρονικής εξέλιξης. Τα ιστογράμματα παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη μορφή της κατανομής των τιμών, τα θηκογράμματα επιτρέπουν την αξιολόγηση της διασποράς και τον εντοπισμό πιθανών ακραίων παρατηρήσεων, ενώ τα διαγράμματα χρονικής εξέλιξης διευκολύνουν τη μελέτη της συμπεριφοράς των μεταβλητών στον χρόνο.

Η αρχική αυτή διερεύνηση επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών των δεδομένων και συμβάλλει στην αναγνώριση πιθανών πηγών μεταβλητότητας. Επιπλέον, παρέχει τις απαραίτητες ενδείξεις για την εφαρμογή των εργαλείων Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών (SPC) που παρουσιάζονται στη συνέχεια, καθώς και για τη διερεύνηση της επίδρασης των λειτουργικών παραμέτρων μέσω της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA).

#### 4.2.1 Ανάλυση αποδοτικότητας διαχωρισμού

Η αποδοτικότητα διαχωρισμού αποτελεί βασικό δείκτη αξιολόγησης της λειτουργίας του φυγοκεντρικού διαχωριστή, καθώς εκφράζει την ικανότητα του συστήματος να απομακρύνει το αέριο έλαιο από το ρεύμα του νερού. Η μεταβλητή αυτή χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της διεργασίας και για τη διερεύνηση πιθανών μεταβολών στη λειτουργική συμπεριφορά του εξοπλισμού.

Στην παρούσα εργασία, η αποδοτικότητα διαχωρισμού υπολογίστηκε από τη σχέση:

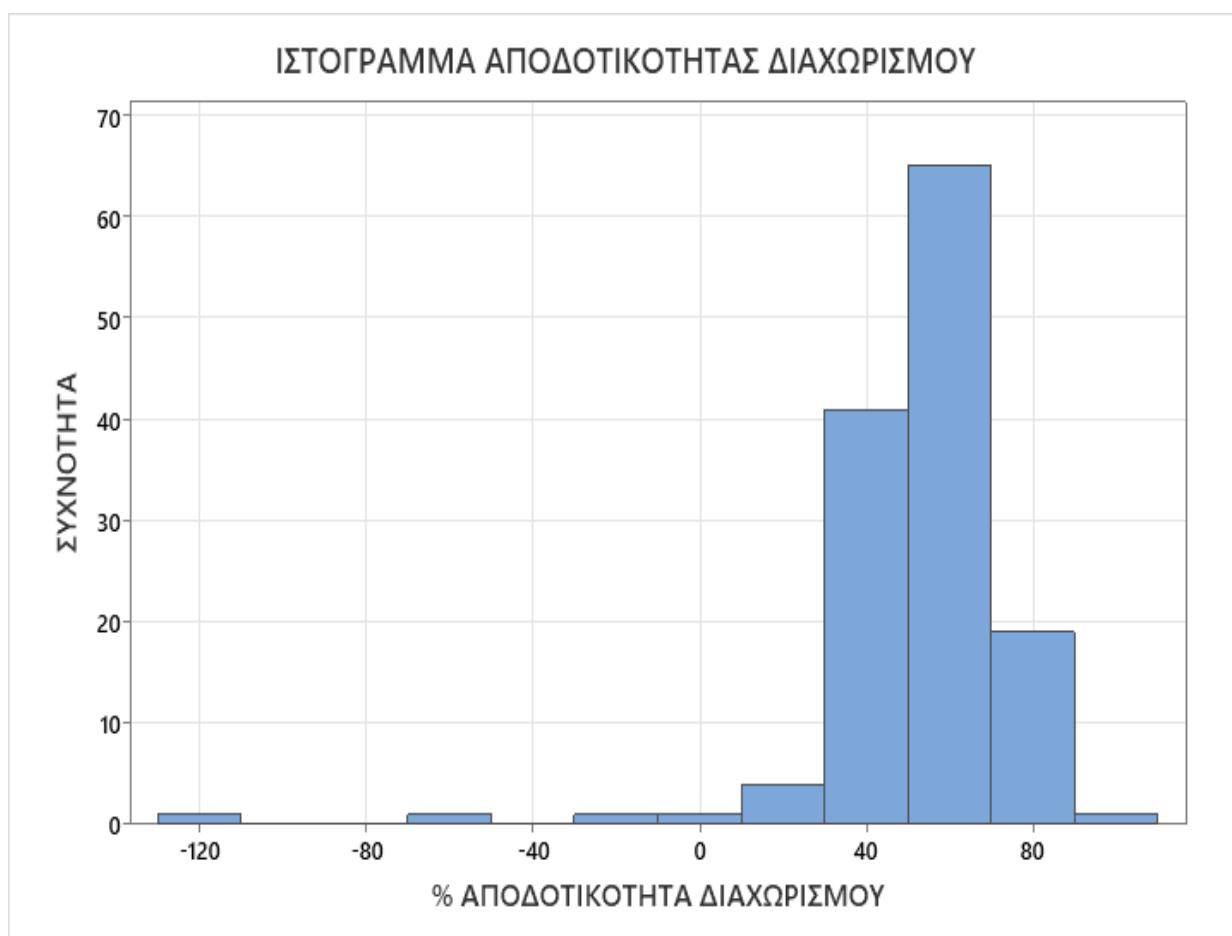
$$\text{Αποδοτικότητα} = \frac{S_1 - S_2}{S_1} \times 100$$

όπου S1 αντιστοιχεί στη συγκέντρωση αερίου ελαίου στην είσοδο του διαχωριστή και S2 στη συγκέντρωση στην έξοδο. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει την ποσοτική εκτίμηση της αποτελεσματικότητας της διεργασίας και τη σύγκριση διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η γραφική διερεύνηση της αποδοτικότητας διαχωρισμού μέσω ιστογράμματος, θηκογράμματος και διαγράμματος χρονικής εξέλιξης, με στόχο την αξιολόγηση της κατανομής, της μεταβλητότητας και της συμπεριφοράς της στον χρόνο.

#### 4.2.1.1 Ιστόγραμμα αποδοτικότητας διαχωρισμού

Για την αρχική διερεύνηση της κατανομής των τιμών της αποδοτικότητας διαχωρισμού κατασκευάστηκε ιστόγραμμα συχνοτήτων (Εικόνα 2). Η αποδοτικότητα διαχωρισμού αποτελεί βασικό δείκτη αξιολόγησης της λειτουργίας του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα, καθώς εκφράζει την ικανότητα του συστήματος να απομακρύνει το αιθέριο έλαιο από το ρεύμα τροφοδοσίας.



## Εικόνα 2 Ιστόγραμμα κατανομής της αποδοτικότητας διαχωρισμού του φυγοκεντρικού

διαχωριστήρα κατά τη βιομηχανική λειτουργία.

Από το ιστόγραμμα προκύπτει ότι η πλειονότητα των παρατηρήσεων συγκεντρώνεται σε ένα σχετικά περιορισμένο εύρος τιμών, περίπου μεταξύ 40% και 75%. Η συγκέντρωση αυτή υποδηλώνει ότι κατά το μεγαλύτερο μέρος της περιόδου παρακολούθησης η διεργασία λειτουργεί εντός ενός σχετικά σταθερού πλαισίου απόδοσης και επιτυγχάνει ικανοποιητικό βαθμό διαχωρισμού του αιθέριου ελαίου.

Παράλληλα, η κατανομή δεν εμφανίζεται απόλυτα συμμετρική, γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη μεταβλητότητας στη λειτουργία της διεργασίας. Η μεταβλητότητα αυτή είναι αναμενόμενη σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες, όπου η απόδοση επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ποιότητα της τροφοδοσίας, οι συνθήκες λειτουργίας του διαχωριστήρα και οι διακυμάνσεις των επιμέρους λειτουργικών παραμέτρων.

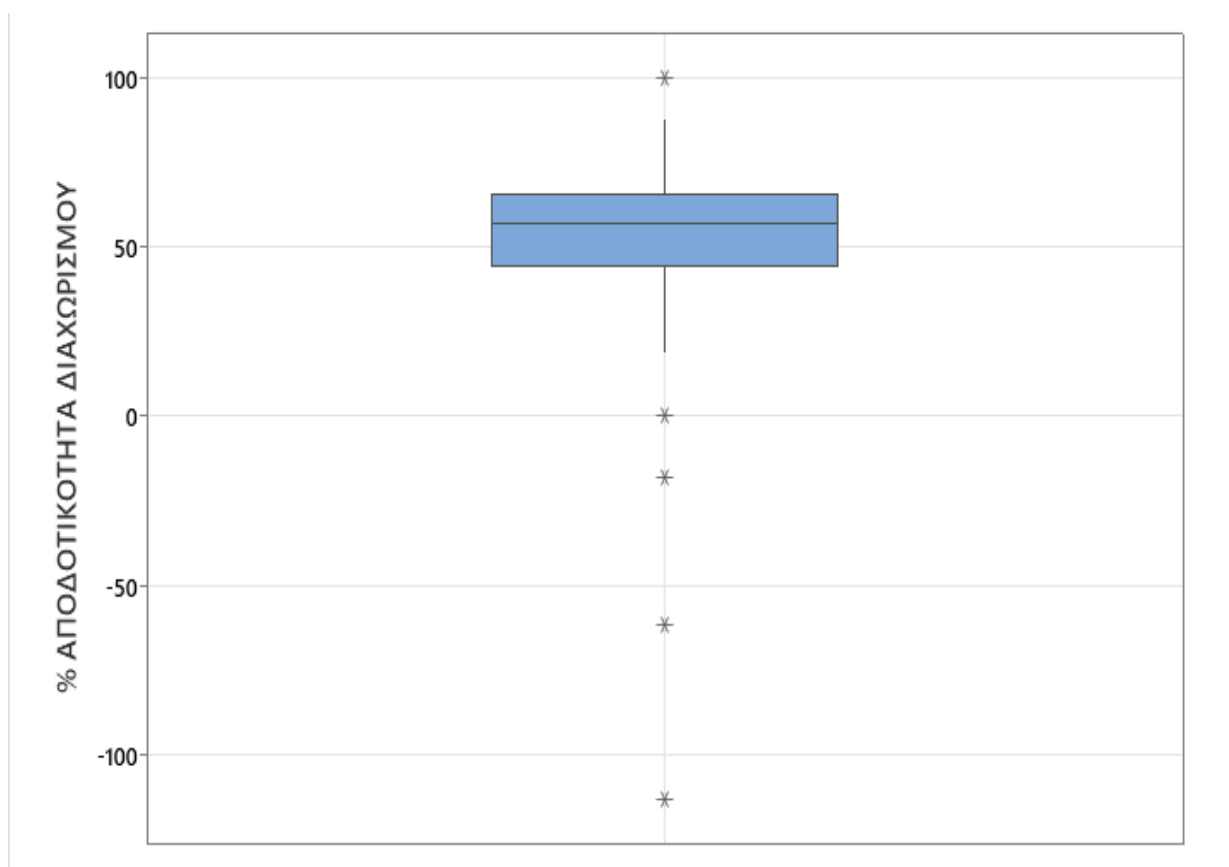
Στο διάγραμμα παρατηρούνται επίσης ορισμένες τιμές που αποκλίνουν από την κύρια περιοχή συγκέντρωσης. Οι παρατηρήσεις αυτές υποδηλώνουν ότι σε ορισμένες χρονικές περιόδους η διεργασία λειτούργησε υπό διαφορετικές συνθήκες από τις συνήθειες, οδηγώντας σε αυξημένη ή μειωμένη αποδοτικότητα διαχωρισμού. Η παρουσία τέτοιων αποκλίσεων αποτελεί ένδειξη ύπαρξης ειδικών αιτίων μεταβλητότητας, τα οποία ενδέχεται να σχετίζονται με μεταβολές στην τροφοδοσία ή με προσωρινές διαφοροποιήσεις στη λειτουργία του εξοπλισμού.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αρνητικές τιμές αποδοτικότητας που εμφανίζονται σε περιορισμένο αριθμό παρατηρήσεων. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε περιπτώσεις όπου η συγκέντρωση αιθέριου ελαίου στο εξερχόμενο ρεύμα εμφανίζεται μεγαλύτερη από την αντίστοιχη συγκέντρωση στην είσοδο. Το φαινόμενο αυτό δεν είναι αναμενόμενο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και πιθανόν σχετίζεται με σφάλματα δειγματοληψίας ή μέτρησης, καθώς και με παροδικές δυσλειτουργίες της διεργασίας.

Συνολικά, το ιστόγραμμα δείχνει ότι η διεργασία λειτουργεί τις περισσότερες φορές εντός αποδεκτού εύρους αποδοτικότητας, παρουσιάζοντας ικανοποιητική λειτουργική σταθερότητα. Ωστόσο, η ύπαρξη αποκλινουσών και αρνητικών τιμών καταδεικνύει ότι εμφανίζονται περιστασιακά ειδικά αίτια μεταβλητότητας, τα οποία χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης μέσω των αναλύσεων που ακολουθούν.

#### 4.2.1.2 Θηκόγραμμα αποδοτικότητας διαχωρισμού

Για τη συμπληρωματική διερεύνηση της μεταβλητότητας της αποδοτικότητας διαχωρισμού και τον εντοπισμό πιθανών ακραίων παρατηρήσεων κατασκευάστηκε θηκόγραμμα (Εικόνα 3).



Εικόνα 3 Θηκόγραμμα της αποδοτικότητας διαχωρισμού του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα κατά τη βιομηχανική λειτουργία

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η διάμεσος της αποδοτικότητας διαχωρισμού κυμαίνεται περίπου μεταξύ 55% και 60%, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διεργασία λειτουργεί το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου με μέτρια έως ικανοποιητική απόδοση. Επιπλέον, το εύρος μεταξύ του πρώτου και του τρίτου

τεταρτημορίου εκτείνεται περίπου από 45% έως 65%, γεγονός που δείχνει ότι η πλειονότητα των παρατηρήσεων συγκεντρώνεται σε σχετικά περιορισμένο εύρος τιμών.

Η εικόνα αυτή υποδηλώνει ότι υπό τις συνήθεις συνθήκες λειτουργίας η διεργασία παρουσιάζει σχετικά σταθερή συμπεριφορά. Ωστόσο, στο διάγραμμα εμφανίζονται αρκετές ακραίες παρατηρήσεις, κυρίως προς χαμηλές και αρνητικές τιμές αποδοτικότητας, οι οποίες αποκλίνουν σημαντικά από το κύριο σώμα των δεδομένων.

Οι αρνητικές τιμές αποδοτικότητας αντιστοιχούν σε περιπτώσεις όπου η συγκέντρωση αιθέριου ελαίου στην έξοδο εμφανίζεται μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στην είσοδο. Το φαινόμενο αυτό δεν θεωρείται αναμενόμενο υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και ενδέχεται να σχετίζεται με σφάλματα μέτρησης, μεταβολές στην τροφοδοσία ή παροδικές αποκλίσεις στη λειτουργία του διαχωριστήρα.

Η παρουσία των ακραίων παρατηρήσεων υποδηλώνει ότι, παρά τη σχετική σταθερότητα που εμφανίζει η διεργασία στο μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων, υπάρχουν χρονικές περίοδοι κατά τις οποίες η συμπεριφορά της διαφοροποιείται σημαντικά από τη συνήθη λειτουργία. Οι αποκλίσεις αυτές χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, καθώς ενδέχεται να συνδέονται με ειδικά αίτια μεταβλητότητας.

Συνολικά, το θηκόγραμμα επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα του ιστογράμματος, αναδεικνύοντας μια γενικά σταθερή λειτουργική συμπεριφορά, αλλά και την παρουσία ορισμένων ακραίων παρατηρήσεων που επηρεάζουν τη συνολική μεταβλητότητα της διεργασίας.

#### **4.2.1.3 Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης αποδοτικότητας διαχωρισμού**

Για τη διερεύνηση της χρονικής μεταβολής της αποδοτικότητας διαχωρισμού κατασκευάστηκε διάγραμμα χρονικής εξέλιξης (Εικόνα 4). Η απεικόνιση των δεδομένων ως συνάρτηση του χρόνου επιτρέπει την παρακολούθηση της συμπεριφοράς της διεργασίας και την αναγνώριση πιθανών μεταβολών ή αποκλίσεων από τη συνήθη λειτουργία.



Εικόνα 4 Διάγραμμα χρονικής εξέλιξης της αποδοτικότητας διαχωρισμού του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα κατά τη διάρκεια της βιομηχανικής λειτουργίας.

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι η αποδοτικότητα διαχωρισμού παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης. Οι τιμές μεταβάλλονται μεταξύ υψηλών και χαμηλών επιπέδων χωρίς να εμφανίζεται σαφής μακροχρόνια ανοδική ή καθοδική τάση, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διεργασία λειτουργεί υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Παρά το γεγονός ότι μεγάλο μέρος των παρατηρήσεων συγκεντρώνεται σε ένα σχετικά σταθερό εύρος τιμών, παρατηρούνται αρκετές απότομες αυξομειώσεις και μεμονωμένες αποκλίσεις από τη συνήθη συμπεριφορά. Οι μεταβολές αυτές υποδηλώνουν ότι η απόδοση της διεργασίας δεν παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της παραγωγικής περιόδου, αλλά επηρεάζεται από παράγοντες που μεταβάλλονται χρονικά. Τα αποτελέσματα του διαγράμματος χρονικής εξέλιξης είναι συνεπή με τα ευρήματα του ιστογράμματος

και του θηκογράμματος, επιβεβαιώνοντας την παρουσία σημαντικής μεταβλητότητας και μεμονωμένων αποκλίσεων στη λειτουργία της διεργασίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι έντονες πτώσεις της αποδοτικότητας, καθώς και οι περιπτώσεις αρνητικών τιμών που παρατηρούνται σε ορισμένα σημεία της χρονοσειράς. Οι αποκλίσεις αυτές διαφοροποιούνται σημαντικά από το γενικό πρότυπο λειτουργίας και υποδηλώνουν την ύπαρξη ειδικών αιτίων μεταβλητότητας τα οποία δεν μπορούν να αποδοθούν αποκλειστικά σε τυχαίες διακυμάνσεις της διεργασίας.

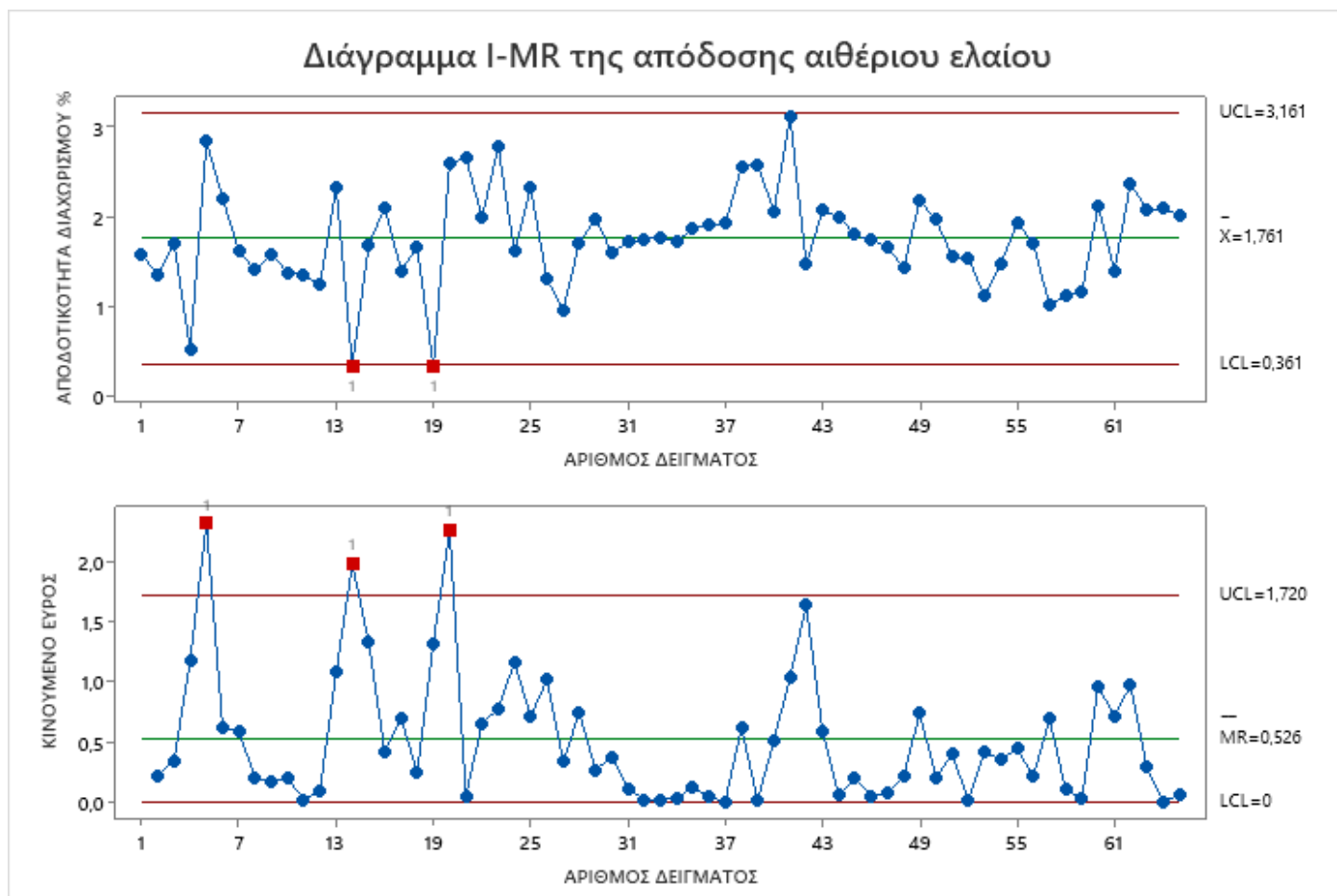
Συνολικά, το διάγραμμα χρονικής εξέλιξης δείχνει ότι, αν και η διεργασία λειτουργεί τις περισσότερες χρονικές περιόδους εντός αποδεκτού εύρους αποδοτικότητας, εμφανίζει κατά διαστήματα σημαντικές αποκλίσεις από τη συνήθη συμπεριφορά. Για τον λόγο αυτό, στην επόμενη ενότητα πραγματοποιείται στατιστικός έλεγχος της διεργασίας μέσω διαγραμμάτων ελέγχου, με στόχο την αξιολόγηση της σταθερότητας της λειτουργίας και τον εντοπισμό πιθανών μη τυχαίων αιτίων μεταβλητότητας.

#### 4.3 Αξιολόγηση σταθερότητας της διεργασίας

Μετά τη γραφική διερεύνηση των δεδομένων, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της σταθερότητας της διεργασίας μέσω διαγράμματος ελέγχου τύπου Individual–Moving Range (I-MR). Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την παρακολούθηση της συμπεριφοράς της απόδοσης αιθέριου ελαίου στον χρόνο και τον εντοπισμό πιθανών μεταβολών που αποκλίνουν από τη συνήθη λειτουργία της διεργασίας.

### 4.3.1 Διάγραμμα I-MR για την απόδοση αιθέριου ελαίου

Προκειμένου να αξιολογηθεί η σταθερότητα της διεργασίας και να διερευνηθεί η συμπεριφορά της απόδοσης αιθέριου ελαίου κατά τη διάρκεια της παραγωγικής περιόδου, κατασκευάστηκε διάγραμμα ελέγχου τύπου Individual–Moving Range (I-MR), το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5 Διάγραμμα I-MR της απόδοσης αιθέριου ελαίου.

Το διάγραμμα ατομικών παρατηρήσεων (I-chart) δείχνει ότι οι τιμές της απόδοσης αιθέριου ελαίου κυμαίνονται γύρω από τη μέση τιμή της διεργασίας, η οποία ανέρχεται σε περίπου 1,76%. Οι περισσότερες παρατηρήσεις συγκεντρώνονται κοντά στη μέση γραμμή, χωρίς να παρατηρούνται συστηματικές τάσεις αύξησης ή μείωσης της απόδοσης κατά τη διάρκεια της περιόδου παρακολούθησης. Επιπλέον, καμία από τις μετρήσεις δεν υπερβαίνει τα ανώτερα ή κατώτερα όρια ελέγχου, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διεργασία διατηρεί γενικά σταθερή μέση συμπεριφορά.

Παρά τη συνολική αυτή εικόνα σταθερότητας, παρατηρούνται ορισμένες έντονες διακυμάνσεις μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων. Οι διακυμάνσεις αυτές αποτυπώνονται σαφέστερα στο διάγραμμα κινούμενου εύρους (MR-chart), το οποίο παρουσιάζει τη μεταβολή μεταξύ δύο διαδοχικών παρατηρήσεων. Στο διάγραμμα αυτό εμφανίζονται τρία σημεία τα οποία υπερβαίνουν το ανώτερο όριο ελέγχου, υποδεικνύοντας χρονικές στιγμές κατά τις οποίες η μεταβολή της απόδοσης ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από αυτή που αναμένεται υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας.

Η παρουσία των συγκεκριμένων σημείων υποδηλώνει την ύπαρξη ειδικών αιτίων μεταβλητότητας, τα οποία επηρεάζουν στιγμιαία τη λειτουργία της διεργασίας. Οι αποκλίσεις αυτές ενδέχεται να σχετίζονται με μεταβολές στην ποιότητα ή στη σύσταση της τροφοδοσίας, με διακυμάνσεις στις λειτουργικές συνθήκες του διαχωριστή ή με άλλους παράγοντες που δεν καταγράφονται άμεσα στα διαθέσιμα δεδομένα. Ωστόσο, οι επιδράσεις αυτές φαίνεται να είναι παροδικές, καθώς δεν οδηγούν σε μόνιμη μετατόπιση της διεργασίας σε διαφορετικό επίπεδο λειτουργίας. Το διάγραμμα I-MR επιβεβαιώνει ότι, παρά τη γενική σταθερότητα της διεργασίας ως προς τη μέση απόδοση αιθέριου ελαίου, εμφανίζονται περιστασιακά ειδικά αίτια μεταβλητότητας που οδηγούν σε σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων.

Συνολικά, η διεργασία παρουσιάζει ικανοποιητική σταθερότητα ως προς τη μέση απόδοση αιθέριου ελαίου, χωρίς ενδείξεις συστηματικής αποσταθεροποίησης. Παρ' όλα αυτά, η εμφάνιση σημείων εκτός ελέγχου στο διάγραμμα κινούμενου εύρους καταδεικνύει ότι υπάρχουν περιστασιακά γεγονότα τα οποία επηρεάζουν τη βραχυχρόνια συμπεριφορά της διεργασίας και αξίζει να διερευνηθούν περαιτέρω στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης της λειτουργίας του συστήματος.

#### 4.4 Συσχέτιση μεταβλητότητας διεργασίας με τις εργασίες συντήρησης

Η ανάλυση που προηγήθηκε ανέδειξε την ύπαρξη μεταβλητότητας στην απόδοση αιθέριου ελαίου, καθώς και την εμφάνιση μεμονωμένων αποκλίσεων από τη συνήθη συμπεριφορά της διεργασίας. Για την πληρέστερη ερμηνεία των ευρημάτων εξετάστηκαν τα διαθέσιμα δελτία συντήρησης των φυγοκεντρικών

διαχωριστήρων κατά την περίοδο συλλογής των δεδομένων, με στόχο να διερευνηθεί κατά πόσο οι παρατηρούμενες μεταβολές σχετίζονται με πραγματικά γεγονότα λειτουργίας του εξοπλισμού.

Η ανασκόπηση των αρχείων συντήρησης έδειξε ότι κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου πραγματοποιήθηκαν επανειλημμένες τεχνικές παρεμβάσεις στους διαχωριστήρες. Ειδικότερα, στις 03/11/2025 καταγράφηκαν εργασίες συντήρησης που περιλάμβαναν έλεγχο του εξοπλισμού, αντικατάσταση τσιμουχών και ρουλεμάν, καθώς και έλεγχο του συστήματος λίπανσης (Παράρτημα Α.2). Αντίστοιχα, στις 10/12/2025 πραγματοποιήθηκε γενικός έλεγχος και προληπτική συντήρηση του διαχωριστή, με αντικατάσταση εξαρτημάτων που υπόκεινται σε φθορά λόγω συνεχούς λειτουργίας (Παράρτημα Α.3).

Παράλληλα, στα αρχεία συντήρησης καταγράφηκαν περιστατικά που συνδέονται με λειτουργικά προβλήματα του εξοπλισμού και απαιτούσαν διορθωτικές παρεμβάσεις (Παράρτημα Α.1). Τα γεγονότα αυτά υποδηλώνουν ότι η λειτουργία του διαχωριστή δεν επηρεάζεται αποκλειστικά από τις μεταβολές της τροφοδοσίας και των λειτουργικών παραμέτρων, αλλά και από την τεχνική κατάσταση των μηχανικών μερών του εξοπλισμού.

Τα ευρήματα αυτά είναι συμβατά με τα αποτελέσματα της γραφικής ανάλυσης και των διαγραμμάτων ελέγχου που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Το ιστόγραμμα, το θηκόγραμμα και το διάγραμμα χρονικής εξέλιξης ανέδειξαν την παρουσία μεταβλητότητας και μεμονωμένων ακραίων παρατηρήσεων, ενώ το διάγραμμα I-MR έδειξε την ύπαρξη χρονικών περιόδων κατά τις οποίες η μεταβολή μεταξύ διαδοχικών μετρήσεων ήταν μεγαλύτερη από τη συνήθη συμπεριφορά της διεργασίας. Η χρονική συσχέτιση των αποκλίσεων αυτών με τις καταγεγραμμένες εργασίες συντήρησης υποδηλώνει ότι μέρος της μεταβλητότητας ενδέχεται να συνδέεται με την κατάσταση και τη λειτουργική επιβάρυνση του εξοπλισμού.

Ωστόσο, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα δεν είναι δυνατή η ποσοτική εκτίμηση της επίδρασης κάθε εργασίας συντήρησης ξεχωριστά στην απόδοση της διεργασίας. Παρ' όλα αυτά, η συνδυαστική αξιολόγηση των λειτουργικών μετρήσεων και των αρχείων συντήρησης αναδεικνύει τη σημασία της συστηματικής

παρακολούθησης και της προληπτικής συντήρησης για τη διατήρηση σταθερών συνθηκών λειτουργίας και την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων στην απόδοση του διαχωριστή.

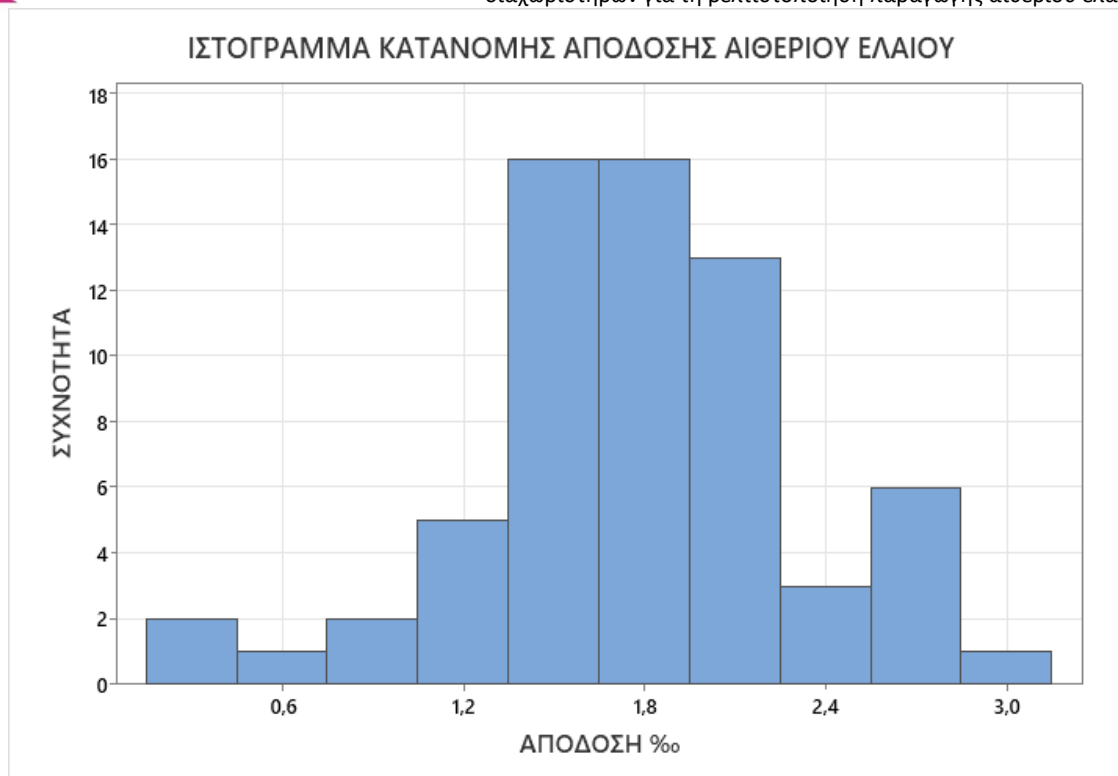
## 4.5 Στατιστική διερεύνηση της απόδοσης αιθέριου ελαίου

Πέρα από την αποδοτικότητα διαχωρισμού, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η απόδοση αιθέριου ελαίου, η οποία εκφράζει την ποσότητα αιθέριου ελαίου που ανακτάται σε σχέση με την ποσότητα της επεξεργαζόμενης πρώτης ύλης. Η μεταβλητή αυτή αποτελεί σημαντικό δείκτη της συνολικής παραγωγικής απόδοσης της διεργασίας, καθώς συνδέεται άμεσα με την αξιοποίηση της πρώτης ύλης και την οικονομική αποδοτικότητα της παραγωγικής διαδικασίας.

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς της μεταβλητής πραγματοποιήθηκε γραφική ανάλυση της κατανομής των δεδομένων μέσω ιστογράμματος και θηκογράμματος, με στόχο τη διερεύνηση της διασποράς των τιμών, της συμμετρίας της κατανομής και της παρουσίας πιθανών ακραίων παρατηρήσεων.

### 4.5.1 Ιστόγραμμα κατανομής απόδοσης αιθέριου ελαίου

Η διερεύνηση της κατανομής της απόδοσης αιθέριου ελαίου πραγματοποιήθηκε μέσω ιστογράμματος συχνοτήτων, το οποίο παρέχει μια συνοπτική εικόνα της συχνότητας εμφάνισης των τιμών της μεταβλητής και επιτρέπει την αξιολόγηση της μορφής της κατανομής, της διασποράς των δεδομένων και της παρουσίας πιθανών ακραίων παρατηρήσεων.



Εικόνα 6 Ιστόγραμμα κατανομής της απόδοσης αιθέριου ελαίου (%) κατά τη βιομηχανική λειτουργία της διεργασίας.

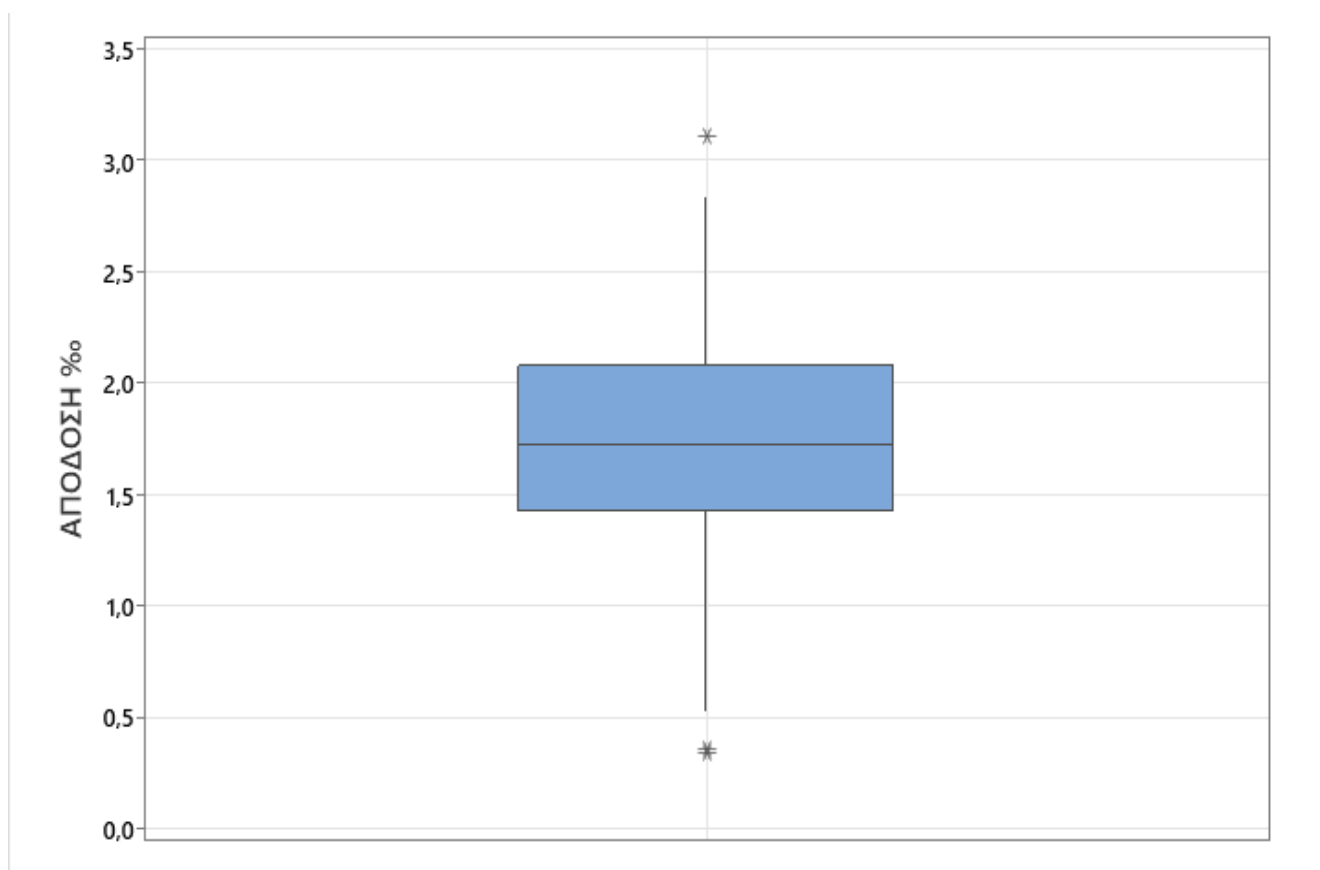
Από το ιστόγραμμα προκύπτει ότι η πλειονότητα των παρατηρήσεων συγκεντρώνεται σε σχετικά περιορισμένο εύρος τιμών, περίπου μεταξύ 1,3‰ και 2,2‰. Η μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης παρατηρείται γύρω από τις τιμές 1,6‰–1,9‰, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διεργασία λειτουργεί συνήθως κοντά σε αυτό το επίπεδο απόδοσης. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου η διεργασία λειτούργησε υπό σχετικά ομοιογενείς συνθήκες, χωρίς ενδείξεις ύπαρξης διαφορετικών καθεστώτων λειτουργίας ως προς την παραγωγή αιθέριου ελαίου.

Παράλληλα, παρατηρούνται περιορισμένες περιπτώσεις χαμηλών και υψηλών τιμών σε σχέση με την κύρια περιοχή συγκέντρωσης. Οι αποκλίσεις αυτές αντανακλούν τη φυσική μεταβλητότητα της διεργασίας και ενδέχεται να σχετίζονται με μεταβολές στα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης, όπως η περιεκτικότητα του φρούτου σε αιθέριο έλαιο, ο βαθμός ωρίμανσης ή άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την ανακτώμενη ποσότητα ελαίου.

Συνολικά, το ιστόγραμμα δείχνει ότι η απόδοση αιθέριου ελαίου παρουσιάζει σχετικά σταθερή συμπεριφορά, με τις περισσότερες παρατηρήσεις να συγκεντρώνονται γύρω από μία χαρακτηριστική περιοχή τιμών και χωρίς να εμφανίζονται ενδείξεις έντονης αστάθειας στη λειτουργία της διεργασίας.

#### 4.5.2 Θηκόγραμμα απόδοσης αιθέριου ελαίου

Για τη συμπληρωματική αξιολόγηση της μεταβλητότητας της απόδοσης αιθέριου ελαίου κατασκευάστηκε θηκόγραμμα, το οποίο παρουσιάζεται στην Εικόνα 7. Σε σχέση με το ιστόγραμμα, το θηκόγραμμα επιτρέπει την πιο άμεση εκτίμηση της διασποράς των τιμών, της θέσης της διαμέσου και της ύπαρξης ακραίων παρατηρήσεων.



Εικόνα 7 Θηκόγραμμα κατανομής της απόδοσης αιθέριου ελαίου (%).

Από το θηκόγραμμα προκύπτει ότι η διάμεσος της απόδοσης αιθέριου ελαίου βρίσκεται περίπου στο 1,7%, τιμή που αντιστοιχεί στην κεντρική περιοχή όπου συγκεντρώνεται και η πλειονότητα των παρατηρήσεων στο ιστόγραμμα. Το εύρος μεταξύ του πρώτου και του τρίτου τεταρτημορίου είναι σχετικά

περιορισμένο, γεγονός που δείχνει ότι το μεγαλύτερο μέρος των μετρήσεων παρουσιάζει συγκρίσιμη συμπεριφορά και δεν αποκλίνει έντονα από το συνηθισμένο επίπεδο απόδοσης της διεργασίας.

Η θέση της διαμέσου στο εσωτερικό του κουτιού και η σχετική συμμετρία των απολήξεων δείχνουν ότι η κατανομή των τιμών δεν παρουσιάζει έντονη ασυμμετρία. Αυτό σημαίνει ότι οι τιμές της απόδοσης αιθέριου ελαίου κατανέμονται σχετικά ισορροπημένα γύρω από την κεντρική περιοχή, χωρίς να διαφαίνεται σταθερή μετατόπιση της διεργασίας προς ιδιαίτερα χαμηλά ή ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα απόδοσης.

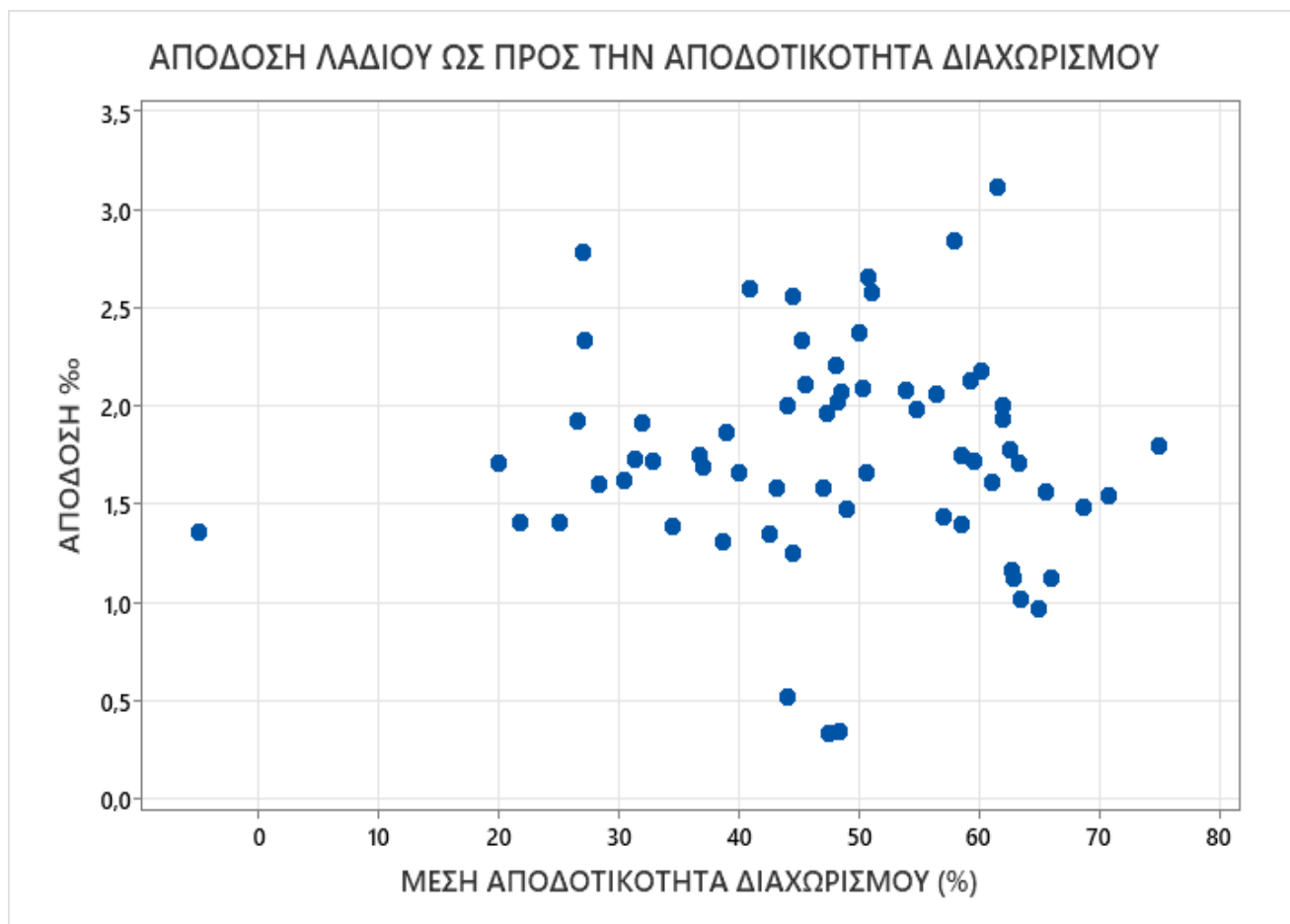
Παρά τη γενικά συγκεντρωμένη εικόνα των δεδομένων, στο θηκόγραμμα εμφανίζονται δύο ακραίες παρατηρήσεις, μία προς το κατώτερο και μία προς το ανώτερο άκρο της κατανομής. Η ύπαρξη τόσο χαμηλής όσο και υψηλής ακραίας τιμής είναι σημαντική, διότι υποδηλώνει ότι η μεταβλητότητα της απόδοσης δεν εκδηλώνεται μόνο προς μία κατεύθυνση. Δεν παρατηρείται δηλαδή αποκλειστικά τάση απώλειας απόδοσης ή αποκλειστικά τάση υψηλότερης ανάκτησης, αλλά περιστασιακές αποκλίσεις και προς τις δύο πλευρές της κατανομής. Το στοιχείο αυτό ενισχύει την άποψη ότι η απόδοση αιθέριου ελαίου επηρεάζεται από μεταβαλλόμενους παράγοντες της παραγωγικής διαδικασίας, όπως τα χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης, η ποσότητα του επεξεργαζόμενου φρούτου και οι συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού.

Συνολικά, το θηκόγραμμα επιβεβαιώνει ότι η απόδοση αιθέριου ελαίου παρουσιάζει ικανοποιητική σταθερότητα για το μεγαλύτερο μέρος των παρατηρήσεων, καθώς οι τιμές συγκεντρώνονται γύρω από τη διάμεσο και εμφανίζουν περιορισμένη διασπορά. Παράλληλα, οι μεμονωμένες ακραίες τιμές υποδεικνύουν ότι η διεργασία επηρεάζεται περιστασιακά από ειδικούς ή μη σταθερούς παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω σε συνδυασμό με τα λειτουργικά δεδομένα, την ποιότητα της τροφοδοσίας και τις καταγραφές συντήρησης του εξοπλισμού.

## **4.6 Διερεύνηση της σχέσης μεταξύ αποδοτικότητας διαχωρισμού και απόδοσης αιθέριου ελαίου**

Προκειμένου να διερευνηθεί κατά πόσο η αποδοτικότητα διαχωρισμού συνδέεται με την τελική απόδοση αιθέριου ελαίου, εξετάστηκε η σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών μέσω διαγράμματος διασποράς.

Επειδή η αποδοτικότητα διαχωρισμού καταγραφόταν περισσότερες από μία φορές ανά ημέρα, ενώ η απόδοση αιθέριου ελαίου υπολογιζόταν σε ημερήσια βάση, χρησιμοποιήθηκε η μέση ημερήσια τιμή της αποδοτικότητας ώστε να καταστεί δυνατή η αντιστοίχιση των δεδομένων.



Εικόνα 8 Διάγραμμα διασποράς μεταξύ της απόδοσης αιθέριου ελαίου και της μέσης αποδοτικότητας διαχωρισμού.

Από το διάγραμμα προκύπτει ότι δεν διαμορφώνεται σαφές πρότυπο γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των δύο μεταβλητών. Τα δεδομένα εμφανίζονται διασκορπισμένα σε ολόκληρο το εύρος των παρατηρήσεων, χωρίς να παρατηρείται συγκέντρωση των σημείων γύρω από κάποια εμφανή ανοδική ή καθοδική τάση.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι για παρόμοια επίπεδα αποδοτικότητας

διαχωρισμού καταγράφονται σημαντικά διαφορετικές τιμές απόδοσης αιθέριου ελαίου. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η τελική ποσότητα ανακτώμενου αιθέριου ελαίου δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την αποτελεσματικότητα του διαχωριστή, αλλά επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες της παραγωγικής διαδικασίας.

Παράλληλα, παρατηρείται ότι ακόμη και στις περιπτώσεις όπου η αποδοτικότητα διαχωρισμού λαμβάνει σχετικά υψηλές τιμές, η απόδοση αιθέριου ελαίου δεν παρουσιάζει αντίστοιχα σταθερή συμπεριφορά. Αντίθετα, εμφανίζει αισθητή διακύμανση, γεγονός που υποδηλώνει ότι η βελτίωση της αποδοτικότητας δεν συνεπάγεται κατ' ανάγκη ανάλογη αύξηση της τελικής απόδοσης.

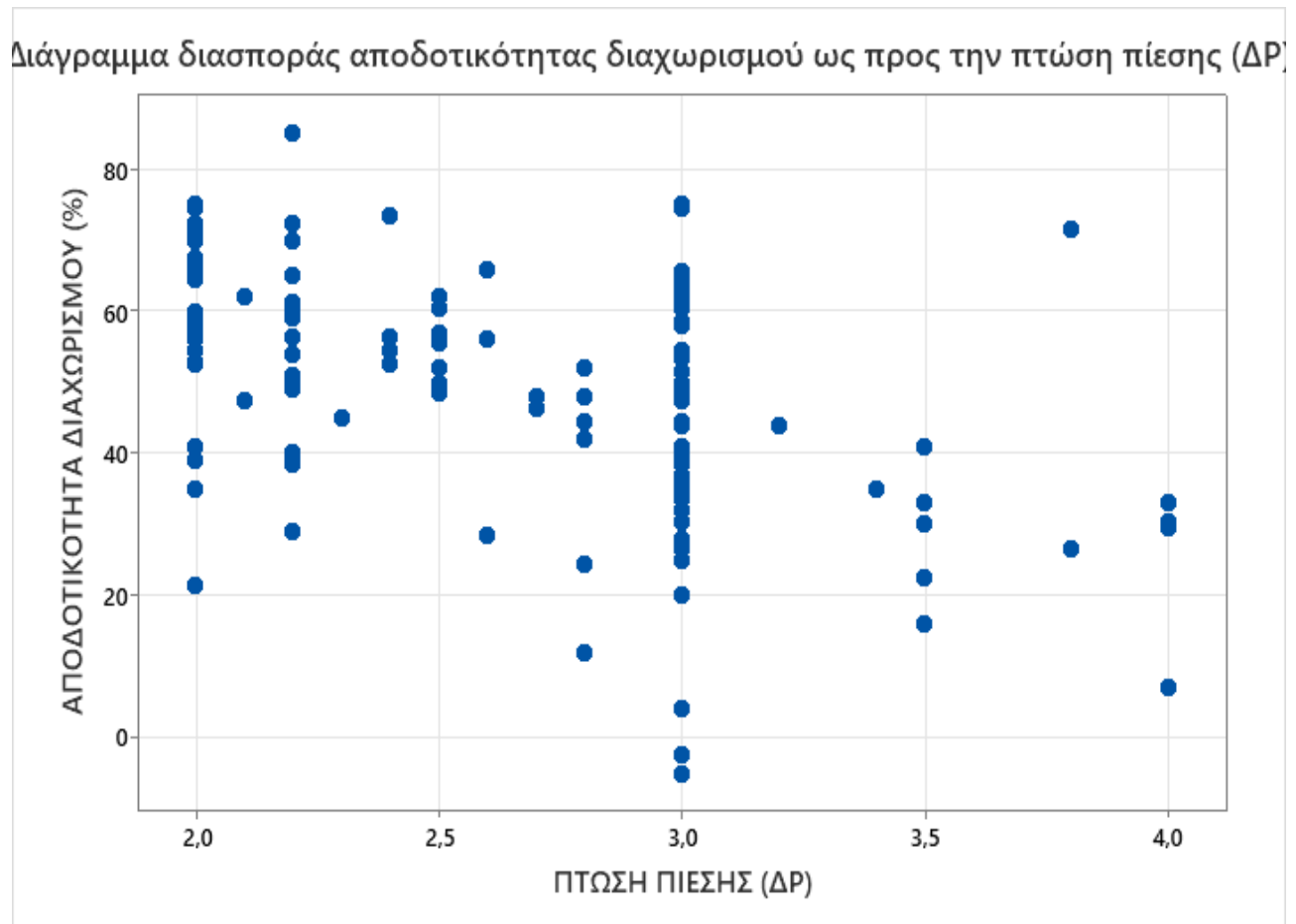
Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στη σύνθετη φύση της διεργασίας ανάκτησης αιθέριου ελαίου. Η περιεκτικότητα του φρούτου σε αιθέριο έλαιο, ο βαθμός ωρίμανσης, οι μεταβολές στην ποιότητα της πρώτης ύλης, καθώς και λειτουργικές παράμετροι του εξοπλισμού είναι πιθανό να επηρεάζουν σημαντικά την τελική απόδοση. Επομένως, η αποδοτικότητα διαχωρισμού αποτελεί μόνο έναν από τους παράγοντες που συμβάλλουν στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος.

Συνολικά, η ανάλυση δείχνει ότι η σχέση μεταξύ μέσης αποδοτικότητας διαχωρισμού και απόδοσης αιθέριου ελαίου είναι περιορισμένη και δεν μπορεί να θεωρηθεί επαρκής για την πρόβλεψη της απόδοσης της διεργασίας. Το αποτέλεσμα αυτό αναδεικνύει την ανάγκη ταυτόχρονης αξιολόγησης περισσότερων λειτουργικών και ποιοτικών παραμέτρων, προκειμένου να κατανοηθεί πληρέστερα η συμπεριφορά του συστήματος και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάκτηση αιθέριου ελαίου.

## **4.7 Επίδραση της πτώσης πίεσης ( $\Delta P$ ) στην αποδοτικότητα διαχωρισμού**

Η πτώση πίεσης ( $\Delta P$ ) αποτελεί μία από τις βασικές λειτουργικές παραμέτρους του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα, καθώς συνδέεται με τις συνθήκες ροής του μίγματος κατά τη διάρκεια της διεργασίας. Για τον λόγο αυτό εξετάστηκε η πιθανή σχέση της με την αποδοτικότητα διαχωρισμού, με στόχο να διερευνηθεί

κατά πόσο μεταβολές στην πτώση πίεσης συνοδεύονται από αντίστοιχες μεταβολές στην απόδοση του διαχωρισμού.



Εικόνα 9 Διάγραμμα διασποράς μεταξύ πτώσης πίεσης ( $\Delta P$ ) και αποδοτικότητας διαχωρισμού.

Από το διάγραμμα διασποράς προκύπτει ότι οι τιμές της αποδοτικότητας εμφανίζουν σημαντική διακύμανση σε όλο το εύρος των τιμών της πτώσης πίεσης. Για παρόμοιες τιμές  $\Delta P$  καταγράφονται αρκετά διαφορετικές τιμές αποδοτικότητας, γεγονός που δείχνει ότι η σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών δεν είναι άμεσα εμφανής.

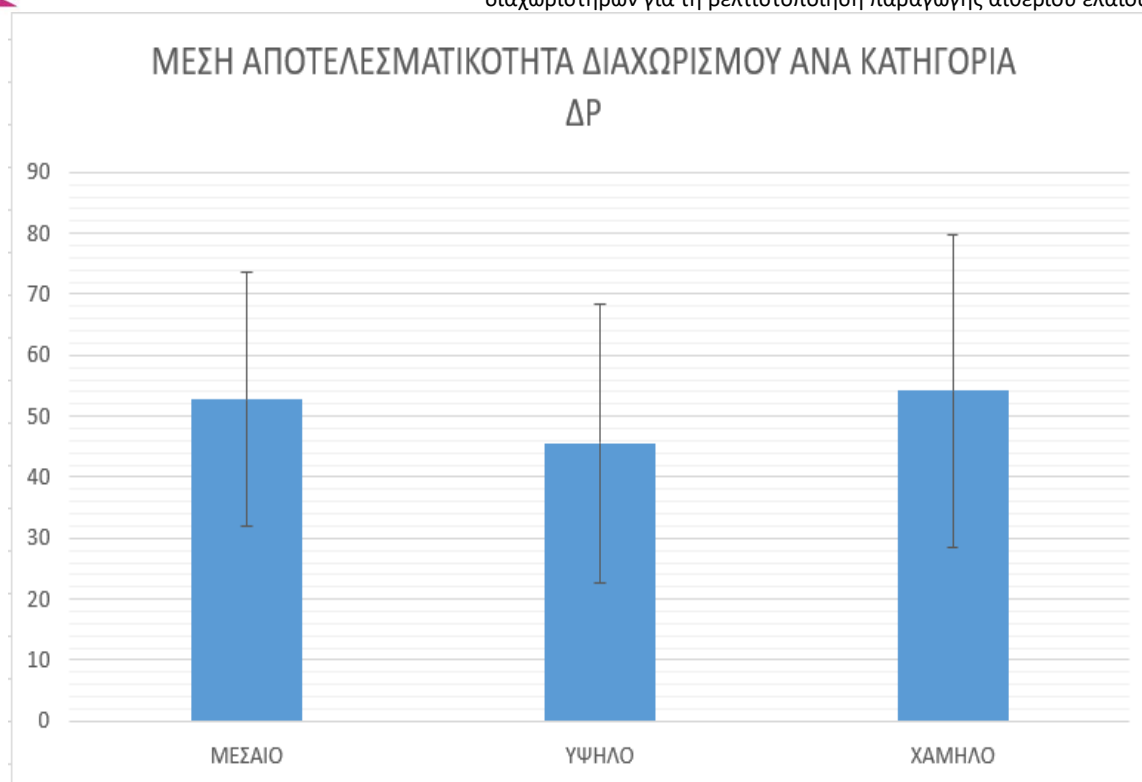
Η μεγαλύτερη συγκέντρωση μετρήσεων εντοπίζεται γύρω από ενδιάμεσες τιμές πτώσης πίεσης, όπου παρατηρείται μεγάλο εύρος αποδοτικότητας. Η εικόνα αυτή δείχνει ότι η πτώση πίεσης από μόνη της δεν μπορεί να ερμηνεύσει πλήρως τη συμπεριφορά της διεργασίας και ότι στην τελική αποδοτικότητα συμμετέχουν και άλλοι παράγοντες που σχετίζονται τόσο με την τροφοδοσία όσο και με τις συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού.

Με βάση τα αποτελέσματα του διαγράμματος κρίθηκε σκόπιμη η περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της πτώσης πίεσης μέσω ομαδοποίησης των τιμών της σε κατηγορίες και εφαρμογής ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA), ώστε να αξιολογηθεί με μεγαλύτερη σαφήνεια η επίδρασή της στη μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού.

#### **4.7.1 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία ΔΡ**

Για την περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της πτώσης πίεσης στην αποδοτικότητα διαχωρισμού, οι τιμές της ΔΡ ομαδοποιήθηκαν σε τρεις κατηγορίες λειτουργίας: χαμηλή, μεσαία και υψηλή πτώση πίεσης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη σύγκριση της μέσης αποδοτικότητας μεταξύ διαφορετικών περιοχών λειτουργίας του συστήματος και διευκολύνει την ανάδειξη πιθανών τάσεων που δεν είναι εύκολα ορατές στο διάγραμμα διασποράς.

Για κάθε κατηγορία υπολογίστηκε η μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού καθώς και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση, ώστε να αποτυπωθεί τόσο η μέση συμπεριφορά της διεργασίας όσο και η διακύμανση των μετρήσεων.



Εικόνα 10 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία πτώσης πίεσης (ΔΡ) με ράβδους τυπικής απόκλισης

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 10, η υψηλότερη μέση αποδοτικότητα καταγράφηκε στην κατηγορία χαμηλής πτώσης πίεσης, με τιμή περίπου 54,2%, ενώ η κατηγορία μεσαίας πτώσης πίεσης παρουσίασε παρόμοια μέση τιμή, περίπου 52,8%. Αντίθετα, στην κατηγορία υψηλής πτώσης πίεσης η μέση αποδοτικότητα ήταν χαμηλότερη και διαμορφώθηκε περίπου στο 45,6%.

Τα αποτελέσματα δείχνουν μια γενική τάση μείωσης της μέσης αποδοτικότητας καθώς αυξάνεται η πτώση πίεσης. Ενώ οι κατηγορίες χαμηλής και μεσαίας ΔΡ παρουσιάζουν παρόμοιες μέσες τιμές αποδοτικότητας, η κατηγορία υψηλής ΔΡ εμφανίζει αισθητά χαμηλότερη μέση τιμή. Παράλληλα, οι ράβδοι τυπικής απόκλισης υποδηλώνουν σημαντική διασπορά των μετρήσεων σε όλες τις κατηγορίες, γεγονός που δείχνει ότι ακόμη και για παρόμοια επίπεδα πτώσης πίεσης καταγράφονται διαφορετικά επίπεδα αποδοτικότητας. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η συμπεριφορά της διεργασίας δεν καθορίζεται

αποκλειστικά από την πτώση πίεσης, αλλά επηρεάζεται και από άλλες λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος.

Συνολικά, η ομαδοποίηση των δεδομένων αναδεικνύει ορισμένες διαφορές μεταξύ των κατηγοριών λειτουργίας, χωρίς όμως να επιτρέπει από μόνη της την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων σχετικά με τη στατιστική σημαντικότητα των διαφορών αυτών. Για τον λόγο αυτό ακολουθεί ανάλυση διακύμανσης (ANOVA), με στόχο να αξιολογηθεί αν οι παρατηρούμενες μεταβολές της μέσης αποδοτικότητας μεταξύ των κατηγοριών ΔΡ είναι στατιστικά σημαντικές.

#### **4.7.2 Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την επίδραση της πτώσης πίεσης (ΔΡ)**

Για την αξιολόγηση των διαφορών που παρατηρήθηκαν μεταξύ των κατηγοριών πτώσης πίεσης εφαρμόστηκε ανάλυση διακύμανσης κατά έναν παράγοντα (One-Way ANOVA). Ως εξαρτημένη μεταβλητή χρησιμοποιήθηκε η αποδοτικότητα διαχωρισμού, ενώ ως παράγοντας ομαδοποίησης η κατηγορία της πτώσης πίεσης (ΧΑΜΗΛΗ, ΜΕΣΑΙΑ και ΥΨΗΛΗ ΔΡ). Το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε σε  $\alpha = 0,05$ .

|                                              |         |                      |            |            |        |            |
|----------------------------------------------|---------|----------------------|------------|------------|--------|------------|
| Ανάλυση<br>διακύμανσης κατά<br>ένα παράγοντα |         |                      |            |            |        |            |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ                                   |         |                      |            |            |        |            |
| Ομάδες                                       | Πλήθος  | Άθροισμα             | Μέσος όρος | Διακύμανση |        |            |
| Στήλη 1                                      | 33,0    | 1666,9               | 50,5       | 1070,8     |        |            |
| Στήλη 2                                      | 12,0    | 588,0                | 49,0       | 144,9      |        |            |
| Στήλη 3                                      | 2,0     | 90,0                 | 45,0       | 162,0      |        |            |
|                                              |         |                      |            |            |        |            |
|                                              |         |                      |            |            |        |            |
| ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ                          |         |                      |            |            |        |            |
| Προέλευση<br>διακύμανσης                     | SS      | βαθμοί<br>ελευθερίας | MS         | F          | τιμή-P | κριτήριο F |
| Μεταξύ ομάδων                                | 70,0    | 2,0                  | 35,0       | 0,0        | 1,0    | 3,2        |
| Μέσα στις ομάδες                             | 36020,1 | 44,0                 | 818,6      |            |        |            |
|                                              |         |                      |            |            |        |            |
| Σύνολο                                       | 36090,1 | 46,0                 |            |            |        |            |

Εικόνα 11 Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) της αποδοτικότητας διαχωρισμού ως προς την πτώση πίεσης (ΔΡ)

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η κατηγορία χαμηλής πτώσης πίεσης παρουσίασε τη μεγαλύτερη μέση αποδοτικότητα (54,19%), ενώ η κατηγορία υψηλής πτώσης πίεσης τη χαμηλότερη (45,58%). Η κατηγορία μεσαίας πτώσης πίεσης εμφάνισε ενδιάμεση μέση τιμή (52,73%). Παρότι οι μέσες τιμές δείχνουν μια τάση μείωσης της αποδοτικότητας όσο αυξάνεται η πτώση πίεσης, η παρατήρηση αυτή δεν είναι από μόνη της αρκετή για να τεκμηριώσει στατιστικά σημαντική επίδραση της μεταβλητής.

Η τιμή  $p$  που προέκυψε από την ανάλυση ήταν 0,535, σημαντικά μεγαλύτερη από το επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha = 0,05$ . Επομένως, δεν προκύπτουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων τιμών αποδοτικότητας των τριών κατηγοριών ΔΡ. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι οι διαφορές που παρατηρούνται στα δεδομένα είναι πιθανό να οφείλονται στη φυσική διακύμανση της διεργασίας και όχι αποκλειστικά στην επίδραση της πτώσης πίεσης.

Παράλληλα, οι τιμές διακύμανσης μέσα σε κάθε κατηγορία παραμένουν σχετικά υψηλές, γεγονός που υποδηλώνει ότι ακόμη και για παρόμοια επίπεδα πτώσης πίεσης η αποδοτικότητα μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις. Η εικόνα αυτή συμφωνεί με τα ευρήματα των προηγούμενων αναλύσεων, όπου είχε ήδη διαπιστωθεί σημαντική διασπορά των μετρήσεων σε όλο το εύρος λειτουργίας του συστήματος.

Συνολικά, η ανάλυση δεν έδειξε στατιστικά σημαντική επίδραση της πτώσης πίεσης στην αποδοτικότητα διαχωρισμού για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων. Αν και στις υψηλότερες τιμές ΔΡ παρατηρούνται γενικά χαμηλότερες τιμές αποδοτικότητας, η τάση αυτή δεν τεκμηριώνεται στατιστικά. Το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι η αποδοτικότητα του διαχωρισμού αποτελεί πολυπαραγοντικό μέγεθος, το οποίο επηρεάζεται από τον συνδυασμό λειτουργικών και ποιοτικών παραμέτρων της διεργασίας και δεν μπορεί να ερμηνευθεί επαρκώς από μία μόνο μεταβλητή.

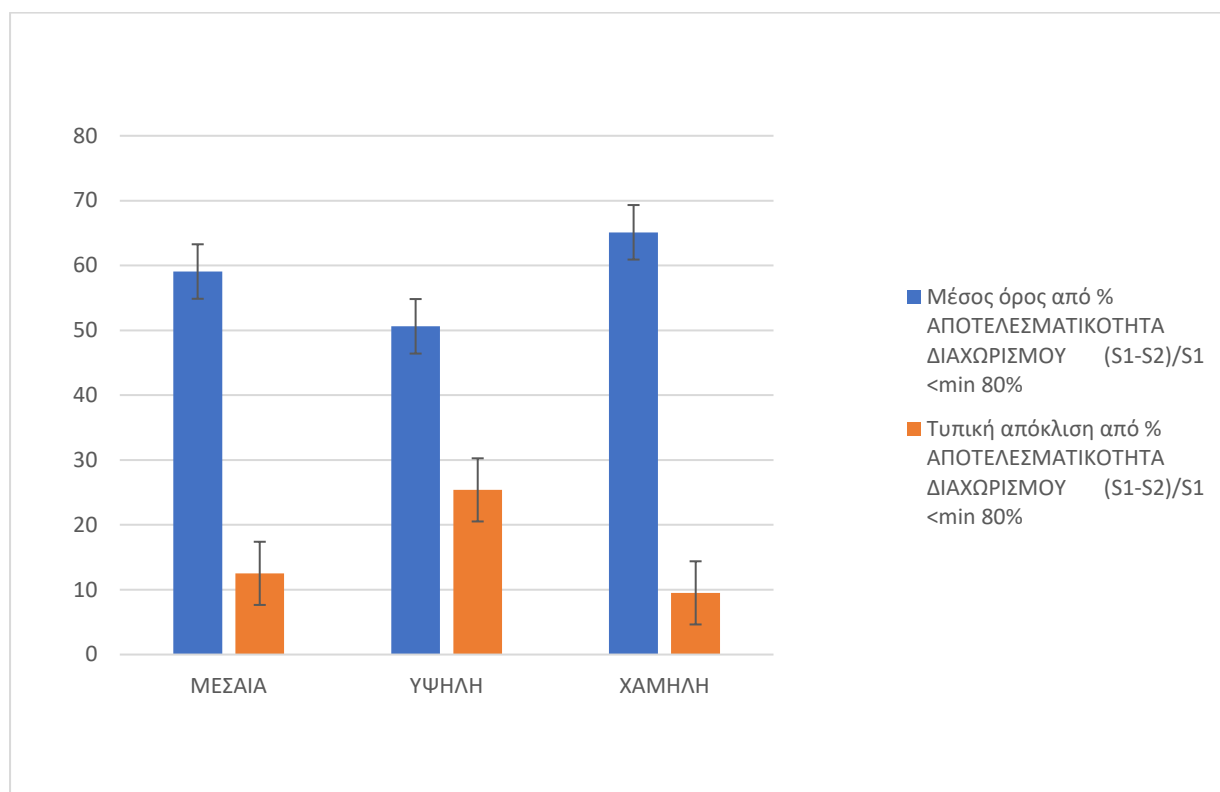
#### 4.8 Επίδραση παροχής τροφοδοσίας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού

Η παροχή τροφοδοσίας αποτελεί μία από τις σημαντικότερες λειτουργικές παραμέτρους ενός φυγοκεντρικού διαχωριστήρα, καθώς καθορίζει τον ρυθμό με τον οποίο το μίγμα εισέρχεται στο σύστημα και επηρεάζει άμεσα τις συνθήκες λειτουργίας της διεργασίας. Μεταβολές στην παροχή είναι δυνατόν να επηρεάσουν την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού, καθώς σχετίζονται με τον χρόνο παραμονής του μίγματος στον εξοπλισμό και με την ανάπτυξη των υδροδυναμικών συνθηκών που επικρατούν κατά τη λειτουργία.

Για τον λόγο αυτό εξετάστηκε η σχέση μεταξύ παροχής τροφοδοσίας και αποδοτικότητας διαχωρισμού, ώστε να αξιολογηθεί κατά πόσο διαφορετικά επίπεδα παροχής συνοδεύονται από μεταβολές στην απόδοση του συστήματος. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε μέσω ομαδοποίησης των τιμών της παροχής σε κατηγορίες λειτουργίας και σύγκρισης της αποδοτικότητας που επιτυγχάνεται σε κάθε μία από αυτές.

#### 4.8.1 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία παροχής τροφοδοσίας

Για την αξιολόγηση της επίδρασης της παροχής τροφοδοσίας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού, οι τιμές της παροχής ομαδοποιήθηκαν σε τρεις κατηγορίες λειτουργίας: χαμηλή, μεσαία και υψηλή παροχή. Για κάθε κατηγορία υπολογίστηκαν η μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση των μετρήσεων.



Εικόνα 12 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία παροχής τροφοδοσίας με ράβδους τυπικής απόκλισης.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 12, η υψηλότερη μέση αποδοτικότητα καταγράφηκε στην κατηγορία χαμηλής παροχής, με τιμή περίπου 65,1%. Στη μεσαία κατηγορία η μέση αποδοτικότητα διαμορφώθηκε στο 59,1%, ενώ στην υψηλή παροχή μειώθηκε στο 50,6%.

Η σύγκριση των μέσων τιμών δείχνει ότι η αποδοτικότητα του διαχωρισμού ακολουθεί πτωτική πορεία καθώς αυξάνεται η παροχή τροφοδοσίας. Η διαφορά μεταξύ χαμηλής και υψηλής παροχής

υπερβαίνει τις 14 ποσοστιαίες μονάδες, γεγονός που υποδηλώνει ότι η συγκεκριμένη λειτουργική παράμετρος επηρεάζει αισθητά την απόδοση του συστήματος.

Παράλληλα, οι ράβδοι τυπικής απόκλισης δείχνουν ότι η μεταβλητότητα των μετρήσεων αυξάνεται στις υψηλότερες παροχές. Η κατηγορία χαμηλής παροχής παρουσίασε τη μικρότερη τυπική απόκλιση (9,5), ενώ στην υψηλή παροχή η τυπική απόκλιση ήταν σημαντικά μεγαλύτερη (25,4). Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι στις υψηλές παροχές η λειτουργία του διαχωριστήρα γίνεται λιγότερο σταθερή, με μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις στην αποδοτικότητα μεταξύ των επιμέρους μετρήσεων.

Συνολικά, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι χαμηλότερες παροχές συνδέονται με υψηλότερες και πιο σταθερές αποδοτικότητες διαχωρισμού. Ωστόσο, η αξιολόγηση των μέσων τιμών δεν επαρκεί για να διαπιστωθεί αν οι παρατηρούμενες διαφορές είναι στατιστικά σημαντικές. Για τον λόγο αυτό ακολουθεί ανάλυση διακύμανσης (ANOVA).

#### **4.8.2 Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την επίδραση της παροχής τροφοδοσίας**

Για να αξιολογηθεί αν οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των κατηγοριών παροχής τροφοδοσίας είναι στατιστικά σημαντικές, εφαρμόστηκε ανάλυση διακύμανσης κατά έναν παράγοντα (One-Way ANOVA). Ως εξαρτημένη μεταβλητή χρησιμοποιήθηκε η αποδοτικότητα διαχωρισμού, ενώ ως παράγοντας ομαδοποίησης οι τρεις κατηγορίες παροχής (ΧΑΜΗΛΗ, ΜΕΣΑΙΑ και ΥΨΗΛΗ). Το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε σε  $\alpha = 0,05$ .

|                                           |        |                  |               |            |        |            |
|-------------------------------------------|--------|------------------|---------------|------------|--------|------------|
| Ανάλυση διακύμανσης<br>κατά ένα παράγοντα |        |                  |               |            |        |            |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ                                |        |                  |               |            |        |            |
| Ομάδες                                    | Πλήθος | Άθροισμα         | Μέσος<br>όρος | Διακύμανση |        |            |
| Στήλη 1                                   | 12     | 781,4            | 65,1          | 90,5       |        |            |
| Στήλη 2                                   | 16     | 945,0            | 59,1          | 156,8      |        |            |
| Στήλη 3                                   | 106    | 5365,6           | 50,6          | 644,8      |        |            |
| ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ                       |        |                  |               |            |        |            |
| Πρόελευση διακύμανσης                     | SS     | εθμοί ελευθερίας | MS            | F          | τιμή-P | κριτήριο F |
| Μεταξύ ομάδων                             | 2950,1 | 2                | 1475,0        | 2,7        | 0,1    | 3,1        |
| Μέσα στις ομάδες                          | 71052  | 131              | 542,4         |            |        |            |
| Σύνολο                                    | 74002  | 133              |               |            |        |            |

Εικόνα 13 Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης (One-Way ANOVA) για την επίδραση της παροχής τροφοδοσίας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η υψηλότερη μέση αποδοτικότητα καταγράφηκε στην κατηγορία χαμηλής παροχής, ενώ η χαμηλότερη στην κατηγορία υψηλής παροχής. Η τάση αυτή είναι συνεπής με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, όπου παρατηρήθηκε μείωση της αποδοτικότητας με την αύξηση της παροχής τροφοδοσίας.

Η ανάλυση έδωσε τιμή  $F = 2,72$  και τιμή  $p = 0,0696$ . Δεδομένου ότι η τιμή  $p$  είναι μεγαλύτερη από το επίπεδο σημαντικότητας ( $\alpha = 0,05$ ), δεν προκύπτουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μέσων τιμών αποδοτικότητας των τριών κατηγοριών παροχής για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων.

Ωστόσο, η τιμή  $p$  βρίσκεται κοντά στο όριο στατιστικής σημαντικότητας, γεγονός που υποδηλώνει ότι η παροχή τροφοδοσίας ενδέχεται να επηρεάζει την αποδοτικότητα του διαχωρισμού, χωρίς όμως η επίδραση αυτή να μπορεί να τεκμηριωθεί με επαρκή στατιστική βεβαιότητα στο επίπεδο σημαντικότητας που επιλέχθηκε. Το εύρημα αυτό υποδεικνύει ότι η συγκεκριμένη μεταβλητή παρουσιάζει ισχυρότερη τάση συσχέτισης με την αποδοτικότητα σε σύγκριση με άλλες λειτουργικές παραμέτρους που εξετάστηκαν.

Παράλληλα, η αυξημένη διασπορά των μετρήσεων στις υψηλές παροχές δείχνει ότι η συμπεριφορά της διεργασίας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την παροχή τροφοδοσίας, αλλά επηρεάζεται και από άλλους λειτουργικούς παράγοντες. Η παρατήρηση αυτή ενισχύει την άποψη ότι η αποδοτικότητα διαχωρισμού αποτελεί πολυπαραγοντικό μέγεθος, το οποίο διαμορφώνεται από την αλληλεπίδραση πολλών μεταβλητών λειτουργίας.

Συνολικά, παρότι η ανάλυση διακύμανσης δεν κατέδειξε στατιστικά σημαντική επίδραση της παροχής τροφοδοσίας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού για επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha = 0,05$ , η τάση που παρατηρείται στα δεδομένα υποδηλώνει ότι η παράμετρος αυτή διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη λειτουργία του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα και αξίζει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη βελτιστοποίηση της διεργασίας.

## 4.9 Επίδραση παρουσίας πούλπας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού

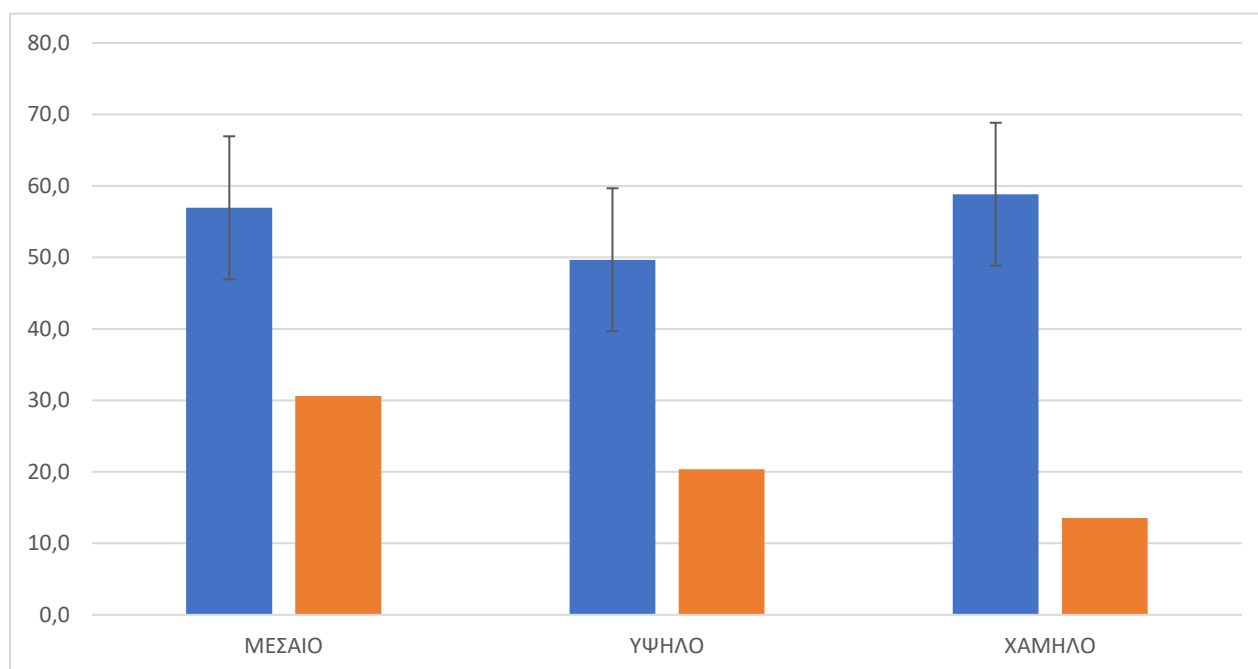
Η παρουσία πούλπας στην τροφοδοσία αποτελεί μία από τις παραμέτρους που ενδέχεται να επηρεάζουν τη λειτουργία του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα και την αποτελεσματικότητα του διαχωρισμού. Για τον λόγο αυτό διερευνήθηκε η πιθανή σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης πούλπας και της αποδοτικότητας διαχωρισμού, με στόχο να αξιολογηθεί κατά πόσο η παρουσία στερεών υλικών επηρεάζει τη συνολική συμπεριφορά της διεργασίας.

Αρχικά εξετάζεται η μεταβολή της μέσης αποδοτικότητας διαχωρισμού για διαφορετικά επίπεδα παρουσίας πούλπας, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την αξιολόγηση της στατιστικής σημαντικότητας των διαφορών που παρατηρούνται.

### 4.9.1 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία παρουσίας πούλπας

Για τη διερεύνηση της επίδρασης της παρουσίας πούλπας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού, οι μετρήσεις ομαδοποιήθηκαν σε τρεις κατηγορίες: ΧΑΜΗΛΗ, ΜΕΣΑΙΑ και ΥΨΗΛΗ παρουσία πούλπας.

Για κάθε κατηγορία υπολογίστηκε η μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση των μετρήσεων.



Εικόνα 14 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία παρουσίας πούλπας με ράβδους τυπικής απόκλισης.

Από τα αποτελέσματα της Εικόνας 15 προκύπτει ότι η υψηλότερη μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού καταγράφηκε στην κατηγορία χαμηλής πούλπας, με τιμή περίπου 58,8%. Στη μεσαία κατηγορία η μέση αποδοτικότητα διαμορφώθηκε στο 56,9%, ενώ στην κατηγορία υψηλής πούλπας μειώθηκε στο 49,7%.

Η εικόνα των δεδομένων δείχνει μια γενική τάση μείωσης της αποδοτικότητας καθώς αυξάνεται η παρουσία πούλπας στην τροφοδοσία. Η μεγαλύτερη διαφορά παρατηρείται μεταξύ της χαμηλής και της υψηλής κατηγορίας, όπου η μέση αποδοτικότητα εμφανίζεται μειωμένη κατά περίπου 9 ποσοστιαίες μονάδες. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η αυξημένη παρουσία στερεών υλικών ενδέχεται να δυσχεραίνει την αποτελεσματική λειτουργία του διαχωριστήρα.

Εκτός από τις διαφορές στις μέσες τιμές, παρατηρούνται διαφοροποιήσεις και στη μεταβλητότητα των μετρήσεων. Η χαμηλή πούλπα παρουσίασε τη μικρότερη τυπική απόκλιση (13,5), γεγονός που δείχνει

πιο σταθερή συμπεριφορά της διεργασίας. Αντίθετα, στη μεσαία κατηγορία καταγράφηκε η μεγαλύτερη τυπική απόκλιση (30,6), ενώ και η υψηλή πούλπα εμφάνισε σχετικά αυξημένη μεταβλητότητα (20,4).

Η αυξημένη διασπορά που παρατηρείται στις δύο τελευταίες κατηγορίες δείχνει ότι η συμπεριφορά της διεργασίας γίνεται λιγότερο ομοιόμορφη όσο αυξάνεται η παρουσία πούλπας. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι η αποδοτικότητα δεν επηρεάζεται μόνο από την ποσότητα των στερεών, αλλά και από άλλες λειτουργικές παραμέτρους που δρουν ταυτόχρονα κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Η εικόνα αυτή δείχνει ότι στην περιοχή αυτή η διεργασία είναι πιθανό να επηρεάζεται περισσότερο από τις εκάστοτε συνθήκες λειτουργίας, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται σημαντικές αποκλίσεις μεταξύ των μετρήσεων.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις πούλπας συνδέονται με υψηλότερες μέσες αποδοτικότητες και μικρότερη μεταβλητότητα. Αντίθετα, η αύξηση της παρουσίας στερεών στην τροφοδοσία συνοδεύεται από χαμηλότερες τιμές αποδοτικότητας και λιγότερο σταθερή λειτουργία του συστήματος. Για να αξιολογηθεί αν οι διαφορές αυτές είναι στατιστικά σημαντικές, ακολουθεί ανάλυση διακύμανσης (ANOVA).

#### **4.9.2 Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την επίδραση της πούλπας**

Για να αξιολογηθεί εάν οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των κατηγοριών παρουσίας πούλπας είναι στατιστικά σημαντικές, πραγματοποιήθηκε ανάλυση διακύμανσης κατά έναν παράγοντα (One-Way ANOVA). Ως εξαρτημένη μεταβλητή χρησιμοποιήθηκε η αποδοτικότητα διαχωρισμού, ενώ ως παράγοντας ομαδοποίησης χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις κατηγορίες παρουσίας πούλπας (ΧΑΜΗΛΗ, ΜΕΣΑΙΑ και ΥΨΗΛΗ). Το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε σε  $\alpha = 0,05$ .

|                                           |         |                      |            |            |        |            |
|-------------------------------------------|---------|----------------------|------------|------------|--------|------------|
| Ανάλυση διακύμανσης<br>κατά ένα παράγοντα |         |                      |            |            |        |            |
|                                           |         |                      |            |            |        |            |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ                                |         |                      |            |            |        |            |
| Ομάδες                                    | Πλήθος  | Άθροισμα             | Μέσος όρος | Διακύμανση |        |            |
| Στήλη 1                                   | 15,0    | 882,6                | 58,8       | 183,3      |        |            |
| Στήλη 2                                   | 41,0    | 2334,8               | 56,9       | 936,3      |        |            |
| Στήλη 3                                   | 78,0    | 3874,6               | 49,7       | 415,2      |        |            |
|                                           |         |                      |            |            |        |            |
|                                           |         |                      |            |            |        |            |
| ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ                       |         |                      |            |            |        |            |
| Προέλευση διακύμανσης                     | SS      | βαθμοί<br>ελευθερίας | MS         | F          | τιμή-P | κριτήριο F |
| Μεταξύ ομάδων                             | 2011,7  | 2,0                  | 1005,8     | 1,8        | 0,2    | 3,1        |
| Μέσα στις ομάδες                          | 71990,5 | 131,0                | 549,5      |            |        |            |
|                                           |         |                      |            |            |        |            |
| Σύνολο                                    | 74002,1 | 133,0                |            |            |        |            |

Εικόνα 15 Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης (One-Way ANOVA) για την επίδραση της παρουσίας πούλπας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η κατηγορία χαμηλής πούλπας παρουσίασε τη μεγαλύτερη μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού (58,8%), ακολουθούμενη από τη μεσαία κατηγορία (56,9%), ενώ η κατηγορία υψηλής πούλπας εμφάνισε τη χαμηλότερη μέση τιμή (49,7%). Η εικόνα αυτή συμφωνεί με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, όπου παρατηρήθηκε μείωση της αποδοτικότητας όσο αυξανόταν η παρουσία πούλπας στην τροφοδοσία.

Ωστόσο, από την ανάλυση διακύμανσης προέκυψε τιμή  $F = 1,8$  και τιμή  $p = 0,20$ . Δεδομένου ότι η τιμή  $p$  είναι μεγαλύτερη από το επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha = 0,05$ , η μηδενική υπόθεση δεν απορρίπτεται. Συνεπώς, οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των μέσων τιμών των τριών κατηγοριών δεν μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων.

Παράλληλα, οι σχετικά υψηλές τιμές διακύμανσης που εμφανίζονται εντός των επιμέρους κατηγοριών δείχνουν ότι η αποδοτικότητα παρουσιάζει σημαντική μεταβλητότητα ακόμη και για παρόμοια επίπεδα παρουσίας πούλπας. Το εύρημα αυτό υποδηλώνει ότι η συμπεριφορά της διεργασίας δεν

καθορίζεται αποκλειστικά από την ποσότητα των στερεών υλικών στην τροφοδοσία, αλλά επηρεάζεται και από άλλες λειτουργικές παραμέτρους που μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια της παραγωγής.

Επομένως, παρότι παρατηρείται τάση μείωσης της μέσης αποδοτικότητας στις υψηλότερες κατηγορίες πούλπας, η επίδραση αυτή δεν τεκμηριώνεται στατιστικά με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η παρουσία πούλπας αποτελεί μία παράμετρο που ενδέχεται να επηρεάζει τη λειτουργία του διαχωριστήρα, χωρίς όμως να μπορεί να θεωρηθεί από μόνη της καθοριστικός παράγοντας της αποδοτικότητας διαχωρισμού.

## **4.10 Επίδραση του ποσοστού νερού τροφοδοσίας στην αποδοτικότητα διαχωρισμού**

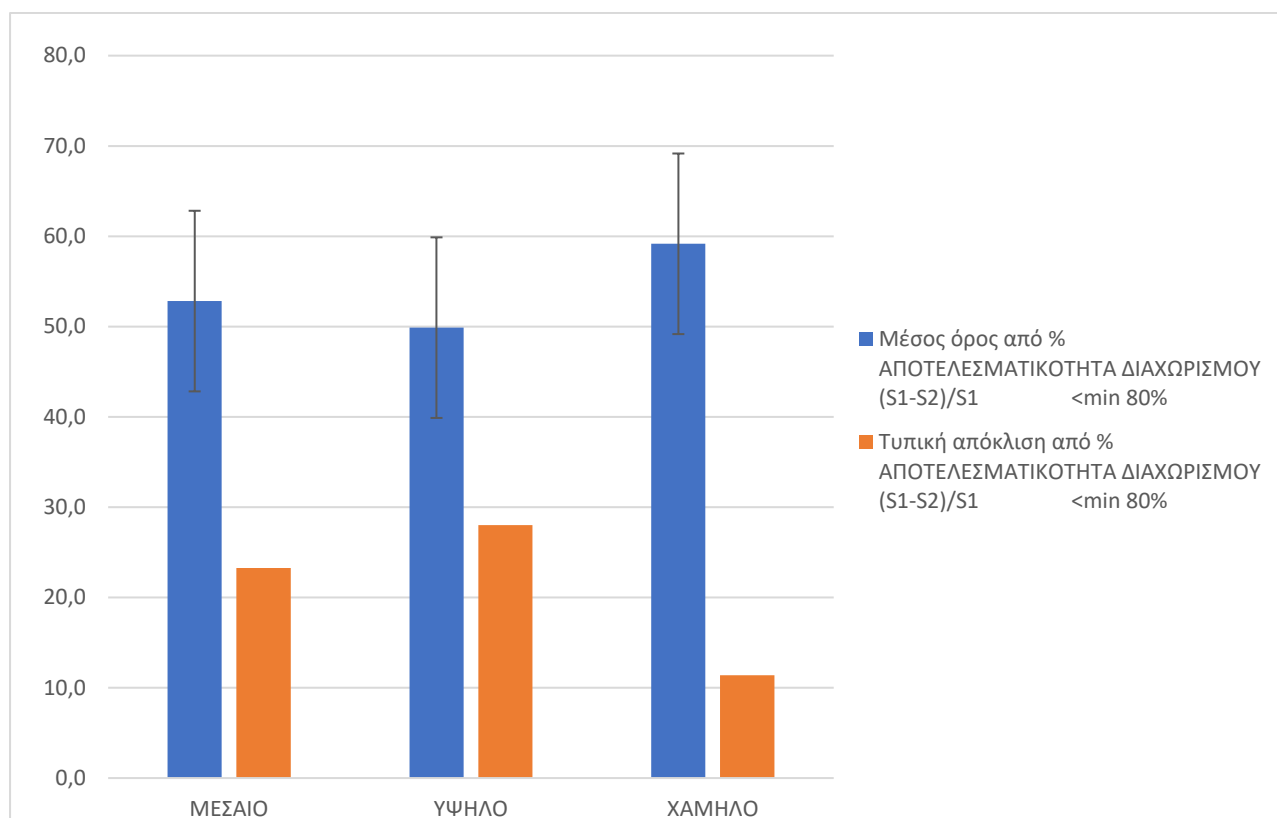
Το ποσοστό νερού στην τροφοδοσία αποτελεί μία από τις λειτουργικές παραμέτρους που ενδέχεται να επηρεάζουν την απόδοση του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα. Η μεταβολή της περιεκτικότητας σε νερό μπορεί να τροποποιήσει τα χαρακτηριστικά του μίγματος και να επηρεάσει τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των φάσεων.

Για τον λόγο αυτό διερευνήθηκε η πιθανή σχέση μεταξύ του ποσοστού νερού και της αποδοτικότητας διαχωρισμού, με στόχο να αξιολογηθεί κατά πόσο διαφορετικά επίπεδα περιεκτικότητας σε νερό συνδέονται με μεταβολές στη λειτουργική συμπεριφορά του συστήματος.

Αρχικά εξετάζεται η μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού για διαφορετικές κατηγορίες ποσοστού νερού, καθώς και η μεταβλητότητα των αντίστοιχων μετρήσεων. Στη συνέχεια πραγματοποιείται ανάλυση διακύμανσης (ANOVA), προκειμένου να αξιολογηθεί εάν οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ των κατηγοριών είναι στατιστικά σημαντικές.

#### 4.10.1 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία ποσοστού νερού

Για κάθε κατηγορία ποσοστού νερού υπολογίστηκε η μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού και η αντίστοιχη τυπική απόκλιση των μετρήσεων, ώστε να αξιολογηθεί τόσο η αποτελεσματικότητα όσο και η σταθερότητα της διεργασίας υπό διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.



Εικόνα 16 Μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού ανά κατηγορία ποσοστού νερού με ράβδους τυπικής απόκλισης.

Από τα αποτελέσματα της Εικόνας 17 προκύπτει ότι η κατηγορία χαμηλού ποσοστού νερού παρουσίασε τη μεγαλύτερη μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού, η οποία διαμορφώθηκε περίπου στο 59,2%. Αντίθετα, στις κατηγορίες μεσαίου και υψηλού ποσοστού νερού οι αντίστοιχες μέσες τιμές ήταν χαμηλότερες, περίπου 52,8% και 49,9%.

Η σύγκριση των τριών κατηγοριών δείχνει μια σαφή τάση μείωσης της αποδοτικότητας όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα της τροφοδοσίας σε νερό. Η διαφορά μεταξύ της χαμηλής και της υψηλής

κατηγορίας προσεγγίζει τις 9 ποσοστιαίες μονάδες, γεγονός που υποδηλώνει ότι η παρουσία αυξημένων ποσοτήτων νερού συνδέεται με λιγότερο αποτελεσματικό διαχωρισμό.

Εκτός από τις διαφορές στις μέσες τιμές, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η μεταβλητότητα των μετρήσεων. Η κατηγορία χαμηλού ποσοστού νερού εμφάνισε τη μικρότερη τυπική απόκλιση (περίπου 11,4), γεγονός που υποδηλώνει πιο σταθερή και επαναλαμβανόμενη λειτουργία του συστήματος. Αντίθετα, η κατηγορία υψηλού ποσοστού νερού παρουσίασε τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση (περίπου 28,0), ενώ η κατηγορία μεσαίου ποσοστού νερού εμφάνισε ενδιάμεση μεταβλητότητα (περίπου 23,1).

Η εικόνα αυτή δείχνει ότι η αύξηση της περιεκτικότητας σε νερό δεν συνοδεύεται μόνο από χαμηλότερες μέσες τιμές αποδοτικότητας, αλλά και από μεγαλύτερη διασπορά των αποτελεσμάτων. Με άλλα λόγια, στις υψηλότερες συγκεντρώσεις νερού η διεργασία εμφανίζει λιγότερο σταθερή συμπεριφορά, γεγονός που δυσκολεύει τη διατήρηση σταθερών συνθηκών λειτουργίας.

Το αποτέλεσμα αυτό πιθανόν σχετίζεται με τις μεταβολές που προκαλεί το νερό στα χαρακτηριστικά του μίγματος και στις συνθήκες διαχωρισμού στο εσωτερικό του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα. Η αυξημένη περιεκτικότητα σε νερό ενδέχεται να επηρεάζει τη διαμόρφωση των φάσεων και να μειώνει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας, οδηγώντας σε χαμηλότερες αποδοτικότητες και μεγαλύτερη μεταβλητότητα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις νερού συνδέονται με καλύτερη και πιο σταθερή λειτουργία του συστήματος. Αντίθετα, όσο αυξάνεται το ποσοστό νερού στην τροφοδοσία, παρατηρείται σταδιακή μείωση της αποδοτικότητας και αύξηση της μεταβλητότητας των μετρήσεων. Η στατιστική αξιολόγηση των διαφορών αυτών παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα μέσω ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA).

#### 4.10.2 Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για την επίδραση του ποσοστού νερού

Για να διερευνηθεί εάν οι διαφορές που παρατηρήθηκαν μεταξύ των κατηγοριών ποσοστού νερού είναι στατιστικά σημαντικές, πραγματοποιήθηκε ανάλυση διακύμανσης κατά έναν παράγοντα (One-Way ANOVA). Ως μεταβλητή απόκρισης χρησιμοποιήθηκε η αποδοτικότητα διαχωρισμού, ενώ ως παράγοντας ομαδοποίησης οι τρεις κατηγορίες ποσοστού νερού (ΧΑΜΗΛΟ, ΜΕΣΑΙΟ και ΥΨΗΛΟ). Το επίπεδο σημαντικότητας ορίστηκε σε  $\alpha = 0,05$ .

**H<sub>0</sub>:** Η μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού είναι ίδια για όλες τις κατηγορίες ποσοστού νερού.

**H<sub>1</sub>:** Τουλάχιστον μία κατηγορία ποσοστού νερού παρουσιάζει διαφορετική μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού.

|                                           |         |                   |            |            |        |            |
|-------------------------------------------|---------|-------------------|------------|------------|--------|------------|
| Ανάλυση διακύμανσης<br>κατά ένα παράγοντα |         |                   |            |            |        |            |
|                                           |         |                   |            |            |        |            |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ                                |         |                   |            |            |        |            |
| Ομάδες                                    | Πλήθος  | Άθροισμα          | Μέσος όρος | Διακύμανση |        |            |
| Στήλη 1                                   | 24,0    | 1419,9            | 59,2       | 129,3      |        |            |
| Στήλη 2                                   | 63,0    | 3327,8            | 52,8       | 541,3      |        |            |
| Στήλη 3                                   | 47,0    | 2344,3            | 49,9       | 784,8      |        |            |
|                                           |         |                   |            |            |        |            |
|                                           |         |                   |            |            |        |            |
| ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ                       |         |                   |            |            |        |            |
| Προέλευση διακύμανσης                     | SS      | βαθμοί ελευθερίας | MS         | F          | τιμή-P | κριτήριο F |
| Μεταξύ ομάδων                             | 1371,0  | 2,0               | 685,5      | 1,2        | 0,3    | 3,1        |
| Μέσα στις ομάδες                          | 72631,1 | 131,0             | 554,4      |            |        |            |
|                                           |         |                   |            |            |        |            |
| Σύνολο                                    | 74002,1 | 133,0             |            |            |        |            |

Εικόνα 17 Αποτελέσματα ανάλυσης διακύμανσης (One-Way ANOVA) για την επίδραση του ποσοστού νερού στην αποδοτικότητα διαχωρισμού.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης, η κατηγορία χαμηλού ποσοστού νερού παρουσίασε τη μεγαλύτερη μέση αποδοτικότητα διαχωρισμού (59,2%), ενώ η κατηγορία υψηλού ποσοστού νερού τη χαμηλότερη (49,9%). Η κατηγορία μεσαίου ποσοστού νερού εμφάνισε ενδιάμεση μέση τιμή (52,8%). Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με την εικόνα που προέκυψε από τη γραφική ανάλυση της προηγούμενης ενότητας, όπου παρατηρήθηκε τάση μείωσης της αποδοτικότητας καθώς αυξανόταν το ποσοστό νερού.

Η ανάλυση διακύμανσης έδωσε τιμή F ίση με 1,2 και τιμή p ίση με 0,30. Επειδή η τιμή p είναι μεγαλύτερη από το επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha = 0,05$ , οι διαφορές μεταξύ των τριών κατηγοριών ποσοστού νερού δεν μπορούν να θεωρηθούν στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων.

Παρότι παρατηρείται τάση χαμηλότερων τιμών αποδοτικότητας στις υψηλότερες συγκεντρώσεις νερού, η στατιστική αξιολόγηση δείχνει ότι η τάση αυτή δεν είναι αρκετά ισχυρή ώστε να τεκμηριωθεί ως πραγματική διαφορά μεταξύ των ομάδων. Παράλληλα, οι σχετικά υψηλές τιμές διακύμανσης εντός των κατηγοριών υποδηλώνουν ότι η αποδοτικότητα επηρεάζεται και από άλλους λειτουργικούς παράγοντες της διεργασίας.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το ποσοστό νερού ενδέχεται να επηρεάζει τη λειτουργία του διαχωριστήρα, χωρίς όμως η επίδρασή του να αποδεικνύεται στατιστικά σημαντική στο επίπεδο  $\alpha = 0,05$ . Η αποδοτικότητα του διαχωρισμού φαίνεται να διαμορφώνεται από τον συνδυασμό πολλών λειτουργικών παραμέτρων και δεν μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά στο ποσοστό νερού της τροφοδοσίας.

## Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα και προτάσεις

### 5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως κύριο στόχο τη μελέτη της λειτουργίας φυγοκεντρικού διαχωριστήρα που χρησιμοποιείται στη διεργασία ανάκτησης αιθέριου ελαίου κατά την παραγωγή χυμού πορτοκαλιού. Η διερεύνηση βασίστηκε σε πραγματικά βιομηχανικά δεδομένα λειτουργίας και πραγματοποιήθηκε με τη χρήση εργαλείων στατιστικής ανάλυσης και Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών (SPC), με σκοπό την αξιολόγηση της αποδοτικότητας διαχωρισμού και τη διερεύνηση της επίδρασης βασικών λειτουργικών μεταβλητών στη συμπεριφορά της διεργασίας.

Από τη συνολική ανάλυση των δεδομένων προέκυψε ότι η λειτουργία του διαχωριστήρα παρουσιάζει γενικά σταθερή συμπεριφορά, χωρίς συστηματικές αποκλίσεις εκτός των ορίων ελέγχου. Τα διαγράμματα SPC έδειξαν ότι η πλειονότητα των μετρήσεων παραμένει εντός των αναμενόμενων ορίων λειτουργίας, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διεργασία βρίσκεται σε κατάσταση σχετικού στατιστικού ελέγχου. Παράλληλα, σε ορισμένες χρονικές περιόδους παρατηρήθηκαν αυξημένες διακυμάνσεις στην αποδοτικότητα διαχωρισμού, οι οποίες αποδίδονται τόσο στη φυσική μεταβλητότητα της παραγωγικής διαδικασίας όσο και σε μεταβολές των συνθηκών λειτουργίας.

Η στατιστική επεξεργασία των δεδομένων ανέδειξε σημαντική διασπορά των τιμών αποδοτικότητας. Τα ιστογράμματα, τα θηκογράμματα και τα διαγράμματα μέσων τιμών έδειξαν ότι, παρότι το σύστημα λειτουργεί συνολικά σε ικανοποιητικά επίπεδα απόδοσης, η συμπεριφορά του διαφοροποιείται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει ότι η αποδοτικότητα διαχωρισμού δεν επηρεάζεται από μία μόνο μεταβλητή, αλλά από την αλληλεπίδραση πολλών παραμέτρων της διεργασίας.

Η διερεύνηση της επίδρασης της πτώσης πίεσης ( $\Delta P$ ) έδειξε ότι στις υψηλότερες τιμές της παρατηρούνται γενικά χαμηλότερες τιμές αποδοτικότητας και μεγαλύτερη μεταβλητότητα των μετρήσεων. Ωστόσο, η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) δεν έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των κατηγοριών πτώσης πίεσης για επίπεδο σημαντικότητας  $\alpha = 0,05$ . Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι η

πτώση πίεσης ενδέχεται να επηρεάζει τη λειτουργία του συστήματος, χωρίς όμως η επίδρασή της να αποδεικνύεται στατιστικά σημαντική για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων.

Αντίστοιχα, η μελέτη της παροχής τροφοδοσίας έδειξε ότι οι χαμηλότερες παροχές συνδέονται με υψηλότερες μέσες τιμές αποδοτικότητας και πιο σταθερή λειτουργία του συστήματος. Στις υψηλότερες παροχές παρατηρήθηκε μεγαλύτερη διασπορά των μετρήσεων και χαμηλότερη μέση αποδοτικότητα, γεγονός που πιθανόν σχετίζεται με τη μικρότερη διάρκεια παραμονής του γαλακτώματος στο εσωτερικό του διαχωριστήρα. Παρόλα αυτά, οι διαφορές αυτές δεν αποδείχθηκαν στατιστικά σημαντικές μέσω της ανάλυσης ANOVA.

Η διερεύνηση της επίδρασης της περιεκτικότητας σε πούλπα έδειξε ότι οι υψηλότερες συγκεντρώσεις στερεών συνοδεύονται από χαμηλότερη αποδοτικότητα και αυξημένη μεταβλητότητα της διεργασίας. Αντίθετα, στις χαμηλές συγκεντρώσεις πούλπας παρατηρήθηκε πιο σταθερή λειτουργική συμπεριφορά. Η παρουσία αυξημένης ποσότητας στερεών ενδέχεται να επηρεάζει τη διαστρωμάτωση των φάσεων και να δυσχεραίνει τον διαχωρισμό, χωρίς όμως οι παρατηρούμενες διαφορές να αποδεικνύονται στατιστικά σημαντικές με βάση τα αποτελέσματα της ANOVA.

Παρόμοια εικόνα προέκυψε και από τη μελέτη της περιεκτικότητας του μίγματος σε νερό. Οι χαμηλότερες συγκεντρώσεις νερού συνδέθηκαν με υψηλότερες μέσες τιμές αποδοτικότητας διαχωρισμού, ενώ στις υψηλότερες συγκεντρώσεις παρατηρήθηκε τάση χαμηλότερης αποδοτικότητας. Ωστόσο, η ανάλυση ANOVA έδειξε ότι οι διαφορές αυτές δεν είναι στατιστικά σημαντικές για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων.

Συνολικά, η ανάλυση όλων των μεταβλητών έδειξε ότι η λειτουργία του φυγοκεντρικού διαχωριστήρα αποτελεί ένα σύνθετο και πολυπαραγοντικό σύστημα. Καμία από τις εξεταζόμενες μεταβλητές δεν φάνηκε να επηρεάζει από μόνη της την αποδοτικότητα διαχωρισμού με στατιστικά σημαντικό τρόπο. Παρόλα αυτά, η παροχή τροφοδοσίας και το ποσοστό νερού παρουσίασαν τις εντονότερες τάσεις διαφοροποίησης της αποδοτικότητας μεταξύ των κατηγοριών που εξετάστηκαν.

Το σημαντικότερο συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η αποδοτικότητα διαχωρισμού δεν καθορίζεται από μία μόνο λειτουργική παράμετρο, αλλά από τη συνδυασμένη επίδραση της πτώσης πίεσης, της παροχής τροφοδοσίας, της περιεκτικότητας σε πούλπα, του ποσοστού νερού και των συνολικών συνθηκών λειτουργίας της εγκατάστασης. Η αποτελεσματική παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της διεργασίας απαιτεί συνεπώς συνδυαστική αξιολόγηση όλων των κρίσιμων παραμέτρων και όχι μεμονωμένη εξέταση κάθε μεταβλητής.

Παράλληλα, η εργασία ανέδειξε τη σημασία της εφαρμογής στατιστικών εργαλείων στη βιομηχανική πράξη. Η αξιοποίηση διαγραμμάτων ελέγχου και μεθόδων στατιστικής ανάλυσης συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς της διεργασίας, στον έγκαιρο εντοπισμό αποκλίσεων και στη συνεχή βελτίωση της λειτουργίας του συστήματος.

## 5.2 Προτάσεις βελτιστοποίησης της διεργασίας

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, η βελτιστοποίηση της διεργασίας ανάκτησης αιθέριου ελαίου προϋποθέτει τη συστηματική παρακολούθηση και τον συνδυαστικό έλεγχο των βασικών λειτουργικών παραμέτρων του συστήματος.

Αρχικά, ιδιαίτερη σημασία φαίνεται να έχει η διατήρηση όσο το δυνατόν πιο σταθερής παροχής τροφοδοσίας προς τον διαχωριστήρα. Από τα αποτελέσματα φάνηκε ότι οι υψηλές παροχές συνοδεύονται από αυξημένη μεταβλητότητα και λιγότερο σταθερή λειτουργία της διεργασίας. Για τον λόγο αυτό, η λειτουργία σε πιο σταθερές συνθήκες παροχής ενδέχεται να συμβάλει στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης και στη μείωση των διακυμάνσεων της διεργασίας.

Παράλληλα, σημαντική φαίνεται να είναι και η συνεχής παρακολούθηση της πτώσης πίεσης. Αν και η μεταβλητή αυτή δεν παρουσίασε στατιστικά σημαντική επίδραση, οι υψηλές τιμές  $\Delta P$  συνδέθηκαν με τάση μείωσης της αποδοτικότητας και μεγαλύτερη διασπορά των μετρήσεων. Επομένως, η διατήρηση της πίεσης σε σταθερά επίπεδα μπορεί να βοηθήσει στη σταθεροποίηση της λειτουργίας του συστήματος.

Επιπλέον, ιδιαίτερη προσοχή θα πρέπει να δοθεί στον έλεγχο της συγκέντρωσης πούλπας πριν από τον διαχωριστήρα. Η υψηλή περιεκτικότητα σε στερεά σωματίδια φαίνεται να δυσκολεύει τη διαδικασία διαχωρισμού και να αυξάνει τη μεταβλητότητα της διεργασίας. Για τον λόγο αυτό, η καλύτερη προεπεξεργασία της τροφοδοσίας ή η εφαρμογή σταδίων απομάκρυνσης στερεών πριν από τον διαχωριστήρα θα μπορούσε να συμβάλει στη βελτίωση της λειτουργικής συμπεριφοράς του συστήματος.

Αντίστοιχα, η καλύτερη ρύθμιση της περιεκτικότητας του μίγματος σε νερό ενδέχεται να περιορίσει τις διακυμάνσεις της αποδοτικότητας και να βελτιώσει τη σταθερότητα της διεργασίας. Η παρακολούθηση της μεταβλητής αυτής σε πραγματικό χρόνο θα μπορούσε να βοηθήσει στην έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων και στην προσαρμογή των συνθηκών λειτουργίας.

Παράλληλα, η εργασία έδειξε ότι η αξιοποίηση εργαλείων Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών (SPC) μπορεί να αποτελέσει ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο παρακολούθησης της παραγωγικής διαδικασίας. Η συνεχής καταγραφή και επεξεργασία των δεδομένων λειτουργίας μπορεί να συμβάλει στον έγκαιρο εντοπισμό μεταβολών της διεργασίας, στη μείωση των απωλειών και στη βελτίωση της συνολικής λειτουργικής αξιοπιστίας του συστήματος.

Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η συλλογή μεγαλύτερου αριθμού δεδομένων λειτουργίας και η εφαρμογή πιο σύνθετων πολυπαραγοντικών στατιστικών μοντέλων, ώστε να διερευνηθεί πιο αναλυτικά η αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβλητών. Επιπλέον, η αξιοποίηση τεχνικών μηχανικής μάθησης και μοντέλων πρόβλεψης θα μπορούσε να συμβάλει στην ανάπτυξη συστημάτων έγκαιρης ανίχνευσης αποκλίσεων και στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας των διαχωριστήρων σε πραγματικές βιομηχανικές συνθήκες.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνόγλωσση βιβλιογραφία

- 1) Σαρού, Ε.Ε. (2013) Μελέτη παραγόντων που επηρεάζουν τη συγκέντρωση των αντιοξειδωτικών συστατικών και το περιεχόμενο και τη σύσταση των αιθέριων ελαίων διαφόρων ειδών εσπεριδοειδών (Citrus). Διδακτορική διατριβή, ΑΠΘ.

### Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- 2) Baust, H.K. et al. (2025) Development of a dynamic process model for mechanical fluid separation in disk stack centrifuges, Separation and Purification Technology, 377, 134230.
- 3) Dong, H. et al. (2024) Numerical study of internal flow field in a disc stack centrifuge based on Mixture–PBM model, Applied Sciences, 14, 8070.
- 4) Esmaeilnejad-Ahranjani, P. and Hajimoradi, E. (2022) Analysis of centrifugal separation performance under varying feed compositions, Chemical Engineering Research and Design, 180, pp. 158–172.
- 5) Halder, K. et al. (2022) ‘Production of cream with size differentiated milk fat globules using modified centrifugal separation’, Journal of Food Processing and Preservation, 46(9), e17275.
- 6) Jia, M. et al. (2022) Citrus juice off-flavor during processing and storage: Formation pathways and analytical techniques, Food Chemistry, 370, 130989.
- 7) John Bean Technologies Corporation (2018) Citrus peel oil recovery systems: Operations manual. Lakeland, FL: JBT Corporation.
- 8) Kimball, D.A. (1989) Citrus processing: Quality control and technology. New York: Van Nostrand Reinhold.
- 9) Kundu, P. (2024) Condition monitoring and fault diagnosis in rotating equipment using advanced sensing, Expert Systems with Applications, 212, 118292.

- 10) Kumar, A. (2025) Vibration analysis and maintenance strategies for industrial machinery, *Advanced Engineering Informatics*, 59, 101103.
- 11) Miller, R. and Freund, M. (2014) *Centrifugal separation in industrial processes*. Elsevier.
- 12) Montaña, A. (2024) The oil:water ratio in the vertical centrifuge separator, *Agriculture*, 6(1), 19. Available at: [MDPI Article](#) (Accessed: Feb. 2026).
- 13) Montgomery, D.C. (2019) *Introduction to Statistical Quality Control*. Wiley.
- 14) Ninga, G.T., Adegbesan, A.O. and Oluwole, O.O. (2022) Influence of feed concentration and flow rate on centrifugal separator efficiency, *Journal of Food Engineering*, 315, 110754.
- 15) Oakland, J.S. (2007) *Statistical Process Control*. Butterworth-Heinemann.
- 16) Pukkella, A.K. et al. (2023) ‘A comprehensive review and recent advances in dry classification technologies’, *Minerals Engineering*, 205, 108430.
- 17) Quinino, R., Fernandez, L. and Oliveira, M. (2021) Control charts for process performance evaluation in continuous production lines, *Journal of Manufacturing Systems*, 59, pp. 214–229.
- 18) Salmasnia, R. and Gernaey, K.V. (2023) Multivariate statistical process control for real-time monitoring of chemical processes, *Chemical Engineering Science*, 285, 119259.
- 19) Salmasnia, R., Smith, J., Lee, Y. and Patel, K. (2024) Statistical process monitoring and control in continuous manufacturing: Methods and case studies, *Journal of Process Control*, 115, pp. 45–67.
- 20) Salvatore, M. M., Andolfi, A., & Ercolini, D. (2022). *Essential oils in citrus fruit ripening and postharvest quality*. *Horticulturae*, 8(5), 396
- 21) Shojaee, M. (2024) Integration of production–maintenance planning and quality control for industrial processes, *Computers & Industrial Engineering*, 175, 109316.

22) Svarovsky, L. (2000) Solid–liquid separation. Butterworth-Heinemann.

23) Tetra Pak (n.d.) Orange Book – Fruit processing: Industry technical handbook. Available at: [Tetra Pak Orange Book](#) (Accessed: Jan. 2026).

24) Tetra Pak Processing Systems AB (2017) The Orange Book (3rd ed.). Lund: Tetra Pak.

25) Vasquez-Gomez, K.L. et al. (2024) Exploring chemical properties of essential oils from citrus peels using green solvent, Heliyon, 10, e40088.

26) Welte-Chanes, J. et al. (2025) ‘Dual process for improved recovery of essential oil and pectin from citrus waste’, Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 100(5), pp. 1–14.

27) Zema, D.A., Lampert, S. and Gonzalez, J. (2020) Valorization of citrus by-products: Process optimization for essential oil recovery, Food and Bioproducts Processing, 124, pp. 143–155.

28) Zamorano, M. (2022) Indirect monitoring applications for centrifugal separator condition analysis, Journal of Marine Engineering & Technology, 10(9), 1199. Available at: [MDPI Article](#) (Accessed: Feb. 2026).

29) Zwetsloot, I.M., Jones-Farmer, L.A. and Woodall, W.H. (2024) Monitoring univariate processes using control charts: Practical issues and advice, Quality Engineering, 36(5), pp. 312–328.

30) JBT FoodTech (2008) Citrus Peel Oil Recovery Systems: A Manual Describing the Operation of JBT FoodTech’s Cold-Pressed Citrus Oil Recovery Systems. Lakeland, Florida, USA: JBT FoodTech.

## **Καταγραφές συντήρησης φυγοκεντρικών διαχωριστήρων**

### **Παράρτημα Α.1 – Καταγραφή τεχνικής επέμβασης (17-11-2025)**

Η ακόλουθη καταγραφή αφορά τεχνική επέμβαση που πραγματοποιήθηκε σε φυγοκεντρικό διαχωριστή της γραμμής παραγωγής στις 17-11-2025. Η επέμβαση σχετιζόταν με δυσλειτουργία στη διαχείριση της φάσης εκροής του διαχωριστή και περιλάμβανε έλεγχο και αντικατάσταση μηχανικών εξαρτημάτων.

| ΔΕΛΤΙΟ ΑΠΑΣΧΟΛΗΣΕΩΣ<br>(SERVICE REPORT)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                  | ΕΝΤΟΛΗ ΕΡΓΟΥ<br>WORK ORDER<br>APPL: ΜΑΣΤΡΟΠΑΝΩΣΗΣ<br>AL TECHN: ΤΖΙΓΚΩΝΗΣ<br>INT. DEMAND BY / DATE 17-11-25                             |                                        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| No 3837                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                  |                                                                                                                                        |                                        |
| ΣΚΟΠΟΣ / Reason: ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΑΚ/ΡΑ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                                                                                                  |                                                                                                                                        |                                        |
| HEO AT: ΑΦΟΙ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ΔΕΥΟ / ADDRESS: Κ. ΤΡΙΑΔΑ                                                                        | ΑΡΧΟΝΙΔΑ                                                                                                                               | ΤΟΠΗ / TOWN                            |
| PLANT / VESSEL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | RESPONSIBLE / POSITION                                                                           | ΤΗΛ / PHONE                                                                                                                            |                                        |
| MACHINE / TYPE / SER No: Ρκ - 810                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | SU: 4246919                                                                                      |                                                                                                                                        |                                        |
| <p>Στον διαχωριστήρα μετά την λειτουργία του, αντικαταστάθηκαν στα τμήματα όλα τα o-rings μέχρι και την κεντρομύδα αυτής. Αντικαταστάθηκε και το σύστημα ο διαχωριστήρα δοκιμάστηκε με νερό, με παραγωγή 7hm<sup>3</sup> και τα νερά λειτουργούν στα 0,9 bar. Στα 2 bar back pressure ο διαχωριστήρας χάνει νερό από το καρβανά της βαριά φάσης που τον κυκλώνει πάνω στο σώμα των τμημάτων.</p> <p>Πραγματοποιήθηκε μέτρηση κραδωμάτων με προϊόν στα 7,5 m<sup>3</sup> με 2 bar back pressure χωρίς διαροή βαριά φάσης στον κυκλώνα.</p> |                                                                                                  |                                                                                                                                        |                                        |
| ΚΩΔΙΚΟΣ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | ΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΑ / SPARE PARTS                                                                       | T                                                                                                                                      | X =                                    |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Πρέπει να αντικατασταθεί το impeller bottom part με κωδικό 54052705 στα καρβανά της βαριάς φάσης |                                                                                                                                        |                                        |
| ΑΠΑΣΧΟΛΗΣΗ / SERVICE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                  | ΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΑ SPARE PARTS                                                                                                               |                                        |
| ΗΜΕΡΟΜΗΡΙΑ DATE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 16-11-25                                                                                         | ΦΠΑ %                                                                                                                                  |                                        |
| ΗΜΕΡΑ DAY                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | ΣΑΒΒΑΤΟ                                                                                          | ΣΥΝ ΑΝΚΟΝ Α TOTAL PARTS                                                                                                                |                                        |
| ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΑΦ. WORK OF TRAVEL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | OPER KAN. NORMAL HRS                                                                             | -                                                                                                                                      | OPER KAN. NORMAL HRS                   |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | OPER YTEP. OVERT. HRS                                                                            | 6                                                                                                                                      | OPER YTEP. OVERTIME HRS                |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ΑΡΧΗ START                                                                                       | -                                                                                                                                      |                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ΤΕΛΟΣ STOP                                                                                       | -                                                                                                                                      |                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | ΑΡΧΗ START                                                                                       | 14:00                                                                                                                                  | ΗΜ ΑΜΟΙΒΗ DAILY ALLOWANCE              |
| ΤΕΛΟΣ STOP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 20:00                                                                                            | ΔΑΠΑΝΗ ΣΕΝ HOTEL COST                                                                                                                  |                                        |
| ΧΙΛΟΜΕΤΡΑ / KM DAY                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                  | ΧΙΛΟΜΕΤΡΑ KILOMETERS                                                                                                                   |                                        |
| TO BE INVOICE / ΧΡΕΩΣΗ ΣΕ                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                  | ΑΠΑΣΧΟΛΗΣΗ SERVICE                                                                                                                     |                                        |
| ADDRESS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                  | ΦΠΑ %                                                                                                                                  |                                        |
| Α.Φ.Μ.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                  | ΣΥΝ ΑΠΑΣΧ. B TOTAL SERVICE                                                                                                             |                                        |
| ATT:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                  | REF:                                                                                                                                   |                                        |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                  | <p>ΑΦΟΙ ΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ Α-Β<br/>ΔΙΟΜΗΚΑΝΙΑ ΚΥΜΗΝ ΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΜΕΛΙ<br/>ΚΑΡΑ &amp; ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗ ΑΕ. ΜΑΡΑ ΜΑΥΡΑΝΗΣ<br/>Τ.Κ. 213 00 ΚΥΜΗΝ</p> |                                        |
| ΥΠΟΓΡ.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | ΠΛΗΡΩΜΗ                                                                                          | ΗΜΕΡ.                                                                                                                                  | ΑΠ/ΜΕΘΑ ΑΝΩΤΕΡΩ ΥΠΟΓΡ./ΟΝΟΜΑ           |
| AL TECH                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | PAYMENT                                                                                          | DATE                                                                                                                                   | WE ACCEPT THE ABOVE ST. RESP. / SIGNAT |

1. ΛΕΥΚΟ, ΠΕΛΑΓΙΝΗ  
2. ΛΕΥΚΟ, ΛΟΓΙΣΤΗΡΙΟ / ΣΤΕΛΕΧΟΣ  
3. ΡΟΖ, ΦΑΚΕΛΟΣ ΠΕΛΑΤΗ  
4. ΚΙΤΡΙΝΟ, ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ



## Παράρτημα Α.2 – Εργασίες συντήρησης και καθαρισμού (03-11-2025)

Η ακόλουθη καταγραφή αφορά εργασίες προληπτικής συντήρησης και καθαρισμού που πραγματοποιήθηκαν στις 03-11-2025 σε φυγοκεντρικό διαχωριστή της παραγωγικής διαδικασίας. Οι εργασίες περιλάμβαναν καθαρισμό του εξοπλισμού, έλεγχο βασικών μηχανικών μερών και αντικατάσταση φθαρμένων εξαρτημάτων.

| ΕΝΤΥΠΟ ΕΝΤΟΛΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ Ή ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ                                                                                                                                    |         |                                                                                                                                  |                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Κωδ. Αρ.: ΕΔ500-1                                                                                                                                                        | Έκδ.: 1 | Τροπ.: 0                                                                                                                         | Ισχύει από: 20/04/2014 |
|                                                                                                                                                                          |         |                                                                                                                                  | Σελ.: 1 από 1          |
| ΟΝΟΜΑ ΤΕΧΝΙΤΗ Η ΒΟΗΘΟΥ: <u>ΡΑΜΠΕΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΝΙΚΟΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ</u>                                                                                                    |         | ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: <u>3/11/25</u>                                                                                                       |                        |
| ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: <u>ΓΕΝΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΙΝΩΣΗΣ 2 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ-ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΚΡΑΠΟΝ (ΡΙΝΟΥΧΕΣ) ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΟΛΟΚΙΩΝ, ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΡΟΧΑΛΙΩΝ-ΙΜΑΝΤΩΝ ΚΙΝΗΣΗΣ</u>   |         |                                                                                                                                  |                        |
| ΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ: <u>55-68-10 (27x) 47-65-8 (97x) ΡΟΛΟΚΙΑΝ 99250/17x</u>                                                                                |         |                                                                                                                                  |                        |
| ΟΛΟΚΛΗΡΩΘΗΚΕ - ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ ΑΠΟ: <u>ΚΑΡΑΜΑΝΟΣ ΠΑΥΛΟΣ</u>                                                                                                                    |         | ΥΠΟΓΡΑΦΗ:                                   |                        |
| ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΘΑΡΙΟΤΗΤΑΣ - ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ ΑΠΟ: <u>ΚΑΡΑΜΑΝΟΣ ΠΑΥΛΟΣ</u>                                                                                                          |         | ΥΠΟΓΡΑΦΗ:                                   |                        |
| ΤΕΛΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: <u>ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΘΗΚΑΝ 2 ΡΙΝΟΥΧΕΣ. ΤΟ ΑΒΡΟ ΡΟΛΟΚΙΑΝ ΗΤΑΝ ΚΑΜΟ. ΑΝΑΦΕΡΕ ΜΟΝΟ ΤΟ ΠΡΟ. ΙΜΑΝΤΕΣ ΚΙΝΗΣΗΣ-ΤΡΟΧΑΛΙΕΣ ΟΚ. ΣΦΙΞΕΡΧΑΣΤΗΚΕ Η ΞΙΤΑ.</u> |         |                                                                                                                                  |                        |
| ΥΠΟΓΡΑΦΗ:                                                                             |         |                                                                                                                                  |                        |
| Συντάχθηκε από: <u>Αυδούση Παν/τη</u>                                                 |         | Εγκρίθηκε από: <u>Χριστοδούλου Νικόλαο</u>  |                        |

## Παράρτημα Α.3 – Τεχνικός έλεγχος και αντικατάσταση εξαρτημάτων (10-12-2025)

Η ακόλουθη καταγραφή αφορά τεχνική επέμβαση συντήρησης που πραγματοποιήθηκε στις 10-12-2025 σε φυγοκεντρικό διαχωριστή της γραμμής παραγωγής. Στο πλαίσιο της επέμβασης πραγματοποιήθηκε έλεγχος της μηχανικής κατάστασης του εξοπλισμού, αντικατάσταση εξαρτημάτων και αξιολόγηση της λειτουργίας του διαχωριστή μετά την ολοκλήρωση των εργασιών.

|                                                                                                                                                                                                                                                 |                                            |                                                                                                 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ΕΝΤΥΠΟ ΕΝΤΟΛΗΣ ΕΠΙΣΚΕΥΗΣ Ή ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ                                                                                                                                                                                                           |                                            |                                                                                                 |
| Κωδ. Αρ.: ΕΔ500-1                                                                                                                                                                                                                               | Έκδ.: 1 Τροπ.: 0                           | Ισχύει από: 20/04/2014 Σελ.: 1 από 1                                                            |
| ΟΝΟΜΑ ΤΕΧΝΙΤΗ Η ΒΟΗΘΟΥ: <u>ΡΑΜΠΟΤΗΣ ΝΟΥΚΑΣ - ΝΤΟΛΕΜΟΝΙΔΗΣ</u> ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: <u>10-12-25</u>                                                                                                                                                       |                                            |                                                                                                 |
| ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: <u>ΓΕΝΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ FINISHER 1 ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ</u><br><u>ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΕΓΑΝΩΝ - ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΥΛΕΜΑΤΩΝ - ΤΑΥΙΣΗ ΙΜΑΝΤΩΝ ΚΑΥΤΗΣΕ</u><br><u>ΕΛΕΓΧΟΣ ΓΡΑΦΜΙΣΗ ΤΡΟΧΑΛΩΝ - ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΡΟΣΙΜΑΤΟΣ</u> |                                            |                                                                                                 |
| ΑΝΤΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ: <u>2 ΤΙΜΑΝΤΕΣ Α69 1/2 ΡΟΥΛΕΜΑΤΩΝ 22260 / ΙΜΑΝΤΩΝ 3208B</u><br><u>ΤΙΜΟΝΙΧΕΣ 35-63-7 (2ΤΗΧ) 47-65-8 (2ΤΗΧ)</u>                                                                                                 |                                            |                                                                                                 |
| ΟΛΟΚΛΗΡΩΘΗΚΕ - ΕΛΕΓΧΘΗΚΕ ΑΠΟ: <u>ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ</u>                                                                                                                                                                                      |                                            | ΥΠΟΓΡΑΦΗ:  |
| ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΘΑΡΙΟΤΗΤΑΣ - ΑΠΟΛΥΜΑΝΣΗΣ ΑΠΟ: <u>ΠΑΠΑΓΕΩΡΓΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ</u>                                                                                                                                                                            |                                            | ΥΠΟΓΡΑΦΗ:  |
| ΤΕΛΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ - ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ: <u>ΑΝΑΦΕΡΑΝ ΤΙΜΟΝΙΧΕΣ ΚΑΙ ΡΟΥΛΕΜΑΤΩΝ - ΟΙ ΤΡΟΧΑΛΕΣ ΉΤΑΝ</u><br><u>ΕΝΤΑΞΕΙ - ΠΡΟΔΗΛΩΤΙΚΗ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΜΑΝΤΩΝ ΚΑΥΤΗΣΕ</u>                                                                                       |                                            |                                                                                                 |
| ΥΠΟΓΡΑΦΗ:                                                                                                                                                    |                                            |                                                                                                 |
| Συντάχθηκε από: <u>Αυδούση Παν/τη</u>                                                                                                                                                                                                           | Εγκρίθηκε από: <u>Χριστοδούλου Νικόλαο</u> |                                                                                                 |

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β – Πρωτογενή δεδομένα λειτουργίας διεργασίας ανάκτησης αιθέριου ελαίου

Τα δεδομένα του παρόντος παραρτήματος αποτελούν τις πρωτογενείς καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν για τη στατιστική επεξεργασία και τις αναλύσεις του Κεφαλαίου 4.

| ΗΜ/ΝΙΑ         | ΦΡΟΥΤΟ            | ΩΡ<br>Α   | ΑΡ/ΜΟΣ<br>FMC ΣΕ<br>ΛΕΙΤΟΥΡ<br>ΓΙΑ | ΠΑΡΟΧΗ<br>ΝΕΡΟΥ<br>ΑΠΟ<br>ΡΟΟΜΕΤ<br>ΡΟ (m³/h)<br>(F2) | ΠΑΡΟΧΗ<br>ΔΙΑΧΩΡΙΣΤ<br>ΗΡΑ (m³/h)<br>(G2) | °BRI<br>X | ΠΙΕΣΗ<br>ΕΞΟΔ<br>ΟΥ<br>ΝΕΡΟ<br>Υ (bar) | ΠΙΕΣΗ<br>ΕΞΟΔ<br>ΟΥ<br>ΛΑΔΙΟ<br>Υ (bar) | Δ<br>Ρ  | % ΛΑΔΙ<br>ΕΙΣΟΔ<br>ΟΥ<br>ΔΙΑΧ/Ρ<br>Α<br>(S1) 1-<br>2% | %<br>ΛΑΔΙ<br>ΕΞΟΔ<br>ΟΥ<br>ΝΕΡΟ<br>Υ (S2)<br>0.25 -<br>0.5% | %<br>ΛΑΔΙ<br>ΕΞΟΔ<br>ΟΥ<br>ΛΑΔΙΟ<br>Υ ©<br>50 - 75<br>% | %<br>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟ<br>ΤΗΤΑ<br>ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΥ<br>(S1-S2)/S1<br><min 80% | % ΛΑΔΙ<br>ΕΞΟΔΟ<br>Σ<br>ΝΕΡΟΥ<br>POLISH<br>ER max<br>2% | %<br>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟ<br>ΤΗΤΑ ΑΝΑΚΤΗΣΗΣ<br>ΛΑΔΙΟΥ | %<br>PUL<br>P<br>(S1) | %<br>PUL<br>P<br>(S2) |
|----------------|-------------------|-----------|------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------|----------------------------------------|-----------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1/12/202<br>5  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 9:45      | 6                                  | 8,1                                                   | 7                                         | 5,9       | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,39                                                  | 0,64                                                        | 90                                                      | 54                                                                   | 1,64                                                    | 30,5                                            | 5                     | 5                     |
| 1/12/202<br>5  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 13:0<br>0 | 6                                  | 8,1                                                   | 7,5                                       | 7,06      | 2                                      | 5                                       | 3       | 0,73                                                  | 0,45                                                        | 93                                                      | 38                                                                   | 0,54                                                    | 63,5                                            | 8                     | 9                     |
| 3/12/202<br>5  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 11:2<br>0 | 6                                  | 7,9                                                   | 7                                         | 6         | 2                                      | 5                                       | 3       | 2,1                                                   | 0,92                                                        | 95                                                      | 56                                                                   | 0,36                                                    | -5,0                                            | 5                     | 12                    |
| 4/12/202<br>5  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 10:5<br>0 | 6                                  | 8,3                                                   | 7                                         | 5,59      | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,6                                                   | 0,68                                                        | 90                                                      | 58                                                                   | 0,53                                                    | 20,0                                            | 6                     | 10                    |
| 5/12/202<br>5  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 12:4<br>0 | 6                                  | 8,1                                                   | 7,3                                       | 4,84      | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,12                                                  | 0,37                                                        | 96                                                      | 67                                                                   | 0,6                                                     | 44,0                                            | 6                     | 4                     |
| 8/12/202<br>5  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 14:1<br>5 | 6                                  | 8,2                                                   | 8                                         | 5,98      | 2                                      | 5                                       | 3       | 0,84                                                  | 0,47                                                        | 96                                                      | 44                                                                   | 0,64                                                    | 58,0                                            | 9                     | 10                    |
| 9/12/202<br>5  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 10:0<br>0 | 5                                  | 7,2                                                   | 5,9                                       |           | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,11                                                  | 0,56                                                        |                                                         | 50                                                                   | 0,5                                                     | 44,5                                            |                       |                       |
| 9/12/202<br>5  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 14:0<br>0 | 5                                  | 7,2                                                   | 6,4                                       | 7,05      | 2                                      | 5                                       | 3       | 0,97                                                  | 0,39                                                        | 98                                                      | 60                                                                   | 0,46                                                    | 51,5                                            | 7                     | 10                    |
| 10/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 10:1<br>0 | 5                                  | 7                                                     | 5,7                                       | 5,65      | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,39                                                  | 0,48                                                        | 98                                                      | 65                                                                   | 0,23                                                    | 30,5                                            | 5                     | 8                     |
| 11/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 10:2<br>5 | 6                                  | 8                                                     | 6                                         | 5,35      | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,5                                                   | 0,38                                                        | 92                                                      | 75                                                                   | 0,27                                                    | 25,0                                            | 6                     | 8                     |
| 12/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 9:20      | 5                                  | 6,5                                                   | 4,9                                       | 6,05      | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,29                                                  | 0,42                                                        | 90                                                      | 67                                                                   | 0,34                                                    | 35,5                                            | 5                     | 8                     |
| 12/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 12:0<br>5 | 5                                  | 6,6                                                   | 4,8                                       | 6,6       | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,46                                                  | 0,4                                                         | 90                                                      | 73                                                                   | 0,17                                                    | 27,0                                            | 6                     | 8                     |
| 12/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 16:1<br>5 | 5                                  | 6,4                                                   | 4,7                                       | 5,56      | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,29                                                  | 0,43                                                        | 82                                                      | 67                                                                   | 0,34                                                    | 35,5                                            | 6                     | 7                     |
| 12/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 19:3<br>0 | 5                                  | 6,5                                                   | 5,6                                       | 4,78      | 3                                      | 5                                       | 2       | 0,76                                                  | 0,25                                                        | 68                                                      | 67                                                                   | 0,81                                                    | 74,7                                            | 7                     | 7                     |
| 13/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 11:4<br>0 | 5                                  | 7,2                                                   | 5,1                                       | 4,8       | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,21                                                  | 0,32                                                        | 76                                                      | 74                                                                   | 2,36                                                    | 39,5                                            | 5                     | 8                     |
| 13/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 13:3<br>0 | 5                                  | 7,3                                                   | 4,6                                       | 5,5       | 2                                      | 6                                       | 4       | 1,41                                                  | 0,34                                                        | 75                                                      | 76                                                                   | 5,37                                                    | 29,5                                            | 6                     | 8                     |
| 15/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 9:25      | 5                                  | 9,1                                                   | 5,5                                       | 3,96      | 2                                      | 6                                       | 4       | 1,39                                                  | 0,41                                                        | 96                                                      | 71                                                                   | 0,89                                                    | 30,5                                            | 4                     | 4                     |
| 15/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 13:2<br>0 | 5                                  | 6,2                                                   | 4,7                                       | 5,32      | 2                                      | 5,5                                     | 3,<br>5 | 1,55                                                  | 0,5                                                         | 90                                                      | 68                                                                   | 0,22                                                    | 22,5                                            | 4                     | 4                     |
| 15/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 19:0<br>0 | 6                                  | 8,2                                                   | 7,1                                       | 5,5       | 2                                      | 5                                       | 3       | 0,51                                                  | 0,22                                                        | 95                                                      | 57                                                                   | 1,27                                                    | 74,5                                            | 4                     | 6                     |
| 16/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 9:45      | 5                                  | 6,8                                                   | 5,5                                       | 5,2       | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,02                                                  | 0,4                                                         | 94                                                      | 61                                                                   | 0,22                                                    | 49,0                                            | 3                     | 3                     |
| 16/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 14:0<br>5 | 7                                  | 8,2                                                   | 7,4                                       | 5,94      | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,05                                                  | 0,33                                                        | 76                                                      | 69                                                                   | 1,25                                                    | 47,5                                            | 6                     | 10                    |
| 16/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 19:1<br>5 | 6                                  | 7,2                                                   | 6,3                                       | 7,04      | 2                                      | 5                                       | 3       | 1,26                                                  | 0,41                                                        | 66                                                      | 67                                                                   | 0,55                                                    | 37,0                                            | 8                     | 12                    |
| 17/12/20<br>25 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 9:20      | 6                                  | 8,5                                                   | 7,2                                       | 5,4       | 2                                      | 5,5                                     | 3,<br>5 | 1,4                                                   | 0,8                                                         | 92                                                      | 43                                                                   | 0,51                                                    | 30,0                                            | 10                    | 7                     |
| 17/12/20       | ΠΟΡΤΟΚΑ           | 14:3      |                                    | 8,5                                                   | 8                                         | 4,92      | 2                                      | 5                                       | 3       | 0,91                                                  | 0,45                                                        | 86                                                      | 51                                                                   | 0,27                                                    | 54,5                                            | 6                     | 10                    |

|            |                |       |   |     |     |      |   |     |     |      |      |    |    |      |      |    |    |  |
|------------|----------------|-------|---|-----|-----|------|---|-----|-----|------|------|----|----|------|------|----|----|--|
| 25         | ΛΙ             | 0     |   |     |     |      |   |     |     |      |      |    |    |      |      |    |    |  |
| 17/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 16:50 | 6 | 7,1 | 6,3 | 5,76 | 2 | 5   | 3   | 1,47 | 0,34 | 64 | 77 | 5,79 | 26,5 | 8  | 8  |  |
| 17/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 18:25 | 6 | 6,9 | 6   | 6,74 | 2 | 5   | 3   | 2,05 | 0,57 | 64 | 72 | 0,9  | -2,5 | 8  | 8  |  |
| 18/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 15:45 | 6 | 7,5 | 6,9 | 3,4  | 3 | 5,2 | 2,2 | 1,16 | 0,24 | 80 | 79 | 5,24 | 61,3 | 0  | 5  |  |
| 18/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 18:55 | 6 | 7,5 | 6,8 | 6,7  | 2 | 5   | 3   | 1,29 | 0,52 | 80 | 60 | 0,34 | 35,5 | 8  | 4  |  |
| 19/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 9:35  | 6 | 6,9 | 7,8 | 5,54 | 2 | 5   | 3   | 0,92 | 0,49 | 86 | 47 | 0,32 | 54,0 | 7  | 14 |  |
| 19/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ ΒΙΟ | 18:30 | 7 | 9,2 | 8,6 | 6,4  | 2 | 5   | 3   | 1,6  | 0,81 | 60 | 49 | 2,17 | 20,0 | 12 | 12 |  |
| 20/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 10:10 | 6 | 7   | 6,9 | 4,01 | 2 | 5   | 3   | 1    | 0,38 | 64 | 62 | 0,39 | 50,0 | 4  | 4  |  |
| 20/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 14:05 | 6 | 6,9 | 5,8 | 6,82 | 2 | 5   | 3   | 1,18 | 0,66 | 70 | 44 | 5,72 | 41   | 12 | 12 |  |
| 22/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ ΒΙΟ | 11:30 | 6 | 8   | 6,8 | 6,3  | 2 | 5   | 3   | 1,92 | 0,99 | 62 | 48 | 24,9 | 4    | 12 | 10 |  |
| 22/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 19:00 | 6 | 8   | 6,3 | 6,51 | 2 | 5   | 3   | 1,21 | 0,63 | 62 | 48 | 4,54 | 39,5 | 14 | 13 |  |
| 23/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 10:00 | 6 | 9,5 | 7,5 | 9,67 | 2 | 5   | 3   | 1,29 | 0,76 | 52 | 41 | 2,78 | 35,5 | 22 | 26 |  |
| 23/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 12:30 | 6 | 9,3 | 8,5 | 7,2  | 2 | 5   | 3   | 0,71 | 0,33 | 64 | 54 | 4,87 | 64,5 | 18 | 18 |  |
| 23/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 16:15 | 6 | 9,1 | 8,5 | 5,8  | 2 | 5   | 3   | 0,72 | 0,39 | 68 | 46 | 0,59 | 64   | 12 | 12 |  |
| 23/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 19:35 | 6 | 8,8 | 7,6 | 7,17 | 2 | 5   | 3   | 1,23 | 0,73 | 75 | 41 | 36,7 | 38,5 | 12 | 12 |  |
| 27/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ ΒΙΟ | 11:00 | 6 | 9,2 | 8   | 7,5  | 2 | 6   | 4   | 1,34 | 0,76 | 41 | 43 | 0,45 | 33   | 14 | 14 |  |
| 27/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 13:30 | 6 | 9   | 8   | 10   | 2 | 5   | 3   | 0,76 | 0,49 | 84 | 36 | 0,17 | 62   | 24 | 24 |  |
| 29/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ ΒΙΟ | 12:30 | 6 | 8,4 | 7,5 | 6,09 | 2 | 5,8 | 3,8 | 0,57 | 0,57 | 82 | 0  | 0,31 | 71,5 | 8  | 10 |  |
| 29/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ ΒΙΟ | 16:25 | 6 | 8,2 | 7,5 | 8,3  | 2 | 5,5 | 3,5 | 1,68 | 1,05 | 66 | 38 | 0,29 | 16   | 16 | 18 |  |
| 29/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ ΒΙΟ | 19:05 | 6 | 8,3 | 7,4 | 6,85 | 2 | 5   | 3   | 1,3  | 0,78 | 60 | 40 | 0,22 | 35   | 14 | 14 |  |
| 30/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 11:25 | 6 | 8,3 | 7,2 | 7,06 | 2 | 5   | 3   | 1,18 | 0,5  | 78 | 58 | 0,23 | 41   | 13 | 13 |  |
| 30/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 15:48 | 6 | 8,6 | 7,5 | 6,62 | 2 | 5   | 3   | 0,79 | 0,37 | 96 | 53 | 0,15 | 60,5 | 14 | 14 |  |
| 31/12/2025 | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ     | 10:40 | 6 | 9,4 | 8,3 | 7,06 | 2 | 5,2 | 3,2 | 1,12 | 0,66 | 70 | 41 | 2,61 | 44   | 8  | 10 |  |
| 2/1/2026   | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ ΒΙΟ | 10:10 | 7 | 9,5 | 8,5 | 7,66 | 2 | 6   | 4   | 1,86 | 0,82 | 72 | 56 | 6,38 | 7    | 14 | 17 |  |
| 2/1/2026   | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ ΒΙΟ | 16:05 | 6 | 8,4 | 8,2 | 5,9  | 2 | 5,5 | 3,5 | 1,34 | 0,62 | 66 | 54 | 4    | 33   | 14 | 10 |  |
| 2/1/2026   | ΠΟΡΤΟΚΑ ΛΙ ΒΙΟ | 18:30 | 5 | 6,9 | 6,5 | 8,3  | 2 | 5,5 | 3,5 | 1,18 | 0,76 | 70 | 36 | 3,4  | 41   | 18 | 20 |  |

|           |                   |           |   |      |     |       |   |     |     |      |      |    |      |      |      |    |    |
|-----------|-------------------|-----------|---|------|-----|-------|---|-----|-----|------|------|----|------|------|------|----|----|
| 3/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 12:4<br>0 | 7 | 10   | 9,2 | 9,08  | 2 | 5   | 3   | 0,78 | 0,56 | 94 | 28   | 0,5  | 61   | 20 | 22 |
| 5/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 10:0<br>0 | 6 | 9,5  | 8,2 | 6,3   | 2 | 4,8 | 2,8 | 0,96 | 0,39 | 4  | 59   | 3,46 | 52   | 10 | 10 |
| 5/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 14:5<br>0 | 6 | 9,8  | 9,1 | 5,17  | 2 | 4,5 | 2,5 | 0,89 | 0,32 | 44 | 64   | 0,23 | 55,5 | 8  | 10 |
| 5/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 18:1<br>5 | 5 | 7,7  | 6,8 | 7,27  | 2 | 5   | 3   | 1,44 | 0,77 | 72 | 47   | 0,35 | 28   | 14 | 10 |
| 7/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 9:45      | 7 | 10,9 | 10  | 9     | 2 | 4,2 | 2,2 | 1    | 0,67 | 72 | 33   | 0,15 | 50   | 28 | 30 |
| 7/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 12:5<br>0 | 6 | 9,5  | 8,1 | 10,85 | 2 | 4   | 2   | 0,71 | 0,84 | 60 | -18  | 0,17 | 64,5 | 48 | 40 |
| 7/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 16:0<br>5 | 7 | 10,2 | 9,7 | 9,94  | 2 | 5   | 3   | 1,6  | 0,92 |    | 43   | 1,9  | 20   |    |    |
| 7/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 18:5<br>0 | 6 | 9,1  | 8,4 | 7,19  | 2 | 5   | 3   | 1,6  | 0,8  | 60 | 50   | 0,44 | 20   | 18 | 18 |
| 8/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 14:4<br>0 | 6 | 9,1  | 8,4 | 8,07  | 2 | 4,2 | 2,2 | 0,87 | 0,42 | 80 | 52   | 1,82 | 56,5 |    |    |
| 8/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 18:1<br>0 | 4 | 6,9  | 7,5 | 5,25  | 2 | 4,4 | 2,4 | 0,53 | 0,31 | 78 | 42   | 0,49 | 73,5 | 14 | 18 |
| 9/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 15:5<br>5 | 6 | 8,8  | 8,7 | 7,04  | 2 | 4   | 2   | 0,82 | 0,49 | 68 | 40   | 0,82 | 59   | 20 | 26 |
| 9/1/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 18:5<br>0 | 7 | 10,2 | 10  | 6,94  | 2 | 4   | 2   | 0,65 | 0,4  | 62 | 38   | 0,63 | 67,5 | 20 | 24 |
| 10/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 9:25      | 6 | 9,2  | 8,6 | 8,54  | 2 | 4   | 2   | 0,95 | 0,38 | 48 | 60   | 4,6  | 52,5 | 18 | 20 |
| 10/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 12:5<br>0 | 5 | 8,5  | 7,7 | 8,15  | 2 | 4   | 2   | 0,86 | 0,42 | 84 | 51   | 1,56 | 57   | 20 | 20 |
| 12/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 9:15      | 6 | 9,2  | 8,6 | 8,24  | 2 | 4,2 | 2,2 | 1,42 | 0,91 | 54 | 36   | 0,9  | 29   | 18 | 18 |
| 12/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 13:4<br>0 | 7 | 10   | 9,5 | 9,24  | 2 | 4   | 2   | 1,57 | 0,95 | 62 | 39   | 1,23 | 21,5 | 18 | 18 |
| 12/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 17:3<br>0 | 7 | 9,9  | 9,5 | 9,4   | 2 | 4,2 | 2,2 | 1,23 | 0,73 | 80 | 41   | 5,3  | 38,5 | 16 | 18 |
| 12/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 19:3<br>0 | 7 | 9,5  | 9,3 | 10,5  | 2 | 4,8 | 2,8 | 1,51 | 0,84 | 64 | 44   | 6,65 | 24,5 | 24 | 30 |
| 13/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 10:3<br>0 | 6 | 9    | 8,7 | 7,22  | 2 | 4   | 2   | 1,3  | 0,82 | 70 | 37   | 3,35 | 35   | 14 | 14 |
| 13/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 17:1<br>0 | 6 | 9    | 7   | 6,75  | 2 | 5,4 | 3,4 | 1,3  | 0,69 | 76 | 47   | 3,99 | 35   | 8  | 10 |
| 13/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 19:1<br>0 | 6 | 9,1  | 8,2 | 8     | 2 | 4,6 | 2,6 | 1,43 | 0,78 | 60 | 45   | 7,24 | 28,5 | 12 | 14 |
| 14/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 11:4<br>0 | 6 | 9,4  | 8,6 |       | 2 | 5   | 3   | 1,31 | 0,42 | 60 | 68   | 1,64 | 34,5 | 8  | 16 |
| 14/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 16:1<br>0 | 6 | 9,1  | 8,6 | 9,9   | 2 | 4,2 | 2,2 | 1,22 | 0,72 | 62 | 41   | 3,54 | 39   | 28 | 32 |
| 15/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 10:3<br>0 | 6 | 9    | 8,3 | 7,6   | 2 | 4,2 | 2,2 | 0,3  | 0,64 | 60 | -113 | 0,31 | 85   | 6  | 14 |
| 15/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 16:1<br>0 | 6 | 8,8  | 7,5 | 7,75  | 2 | 4,8 | 2,8 | 1,04 | 0,57 | 66 | 45   | 1,56 | 48   | 10 | 4  |
| 15/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ           | 19:1      | 6 | 8,8  | 8   | 8,27  | 2 | 4,4 | 2,2 | 0,91 | 0,67 | 60 | 26   | 3,32 | 54,5 | 10 | 14 |

|           |         |      |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
|-----------|---------|------|---|------|-----|------|---|-----|-----|------|------|----|-----|-------|------|----|----|
| 6         | ΛΙ      | 0    |   |      |     |      |   |     | 4   |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 16/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 11:0 | 6 | 9    | 8,4 | 4,09 | 2 | 5   | 3   | 1,03 | 0,37 | 60 | 64  | 0,53  | 48,5 | 8  | 8  |
| 6         | ΛΙ ΒΙΟ  | 0    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 16/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 16:3 | 6 | 9    | 8,2 | 6,4  | 2 | 5   | 3   | 1,33 | 0,16 | 70 | 88  | 3,65  | 33,5 | 10 | 12 |
| 6         | ΛΙ      | 0    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 16/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 19:0 | 6 | 9    | 7,3 | 9,3  | 2 | 4,8 | 2,8 | 1,76 | 0,54 | 64 | 69  | 5,58  | 12   | 14 | 18 |
| 6         | ΛΙ      | 5    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 17/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 8:50 | 6 | 9    | 8,3 | 8,73 | 2 | 4   | 2   | 1,22 | 0,71 | 32 | 42  | 0,56  | 39   | 18 | 18 |
| 6         | ΛΙ      |      |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 20/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 7:30 | 6 | 8,9  | 8,4 |      | 2 | 5   | 3   | 1,36 | 1,02 | 64 | 25  | 4,49  | 32   |    |    |
| 6         | ΛΙ      |      |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 21/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 10:0 | 6 | 8,9  | 7,7 | 8,77 | 2 | 5,8 | 3,8 | 1,47 | 1,2  | 70 | 18  | 3,04  | 26,5 | 16 | 14 |
| 6         | ΛΙ      | 5    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 22/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 10:2 | 6 | 8,9  | 7,6 | 7,2  | 2 | 4,8 | 2,8 | 1,11 | 0,45 | 66 | 59  | 7,2   | 44,5 | 15 | 10 |
| 6         | ΛΙ      | 5    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 23/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 10:2 | 6 | 9,4  | 8,4 | 7,32 | 2 | 4,2 | 2,2 | 0,98 | 0,34 | 58 | 65  | 10,1  | 51   | 7  | 7  |
| 6         | ΛΙ      | 5    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 24/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 11:0 | 6 | 9,8  | 8,8 | 7,92 | 2 | 4,4 | 2,4 | 0,87 | 0,35 | 60 | 60  | 2,12  | 56,5 | 10 | 10 |
| 6         | ΛΙ      | 0    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 26/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 10:4 | 6 | 10   | 8,1 | 7,3  | 2 | 4   | 2   | 0,94 | 0,45 | 60 | 52  | 3,45  | 53   | 8  | 12 |
| 6         | ΛΙ ΒΙΟ  | 5    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 26/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 15:2 | 6 | 10   | 8,2 | 6,7  | 2 | 4   | 2   | 0,6  | 0,24 | 70 | 60  | 0,28  | 70   | 8  | 8  |
| 6         | ΛΙ ΒΙΟ  | 7    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 27/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 9:50 | 6 | 10   | 8,7 | 8,1  | 2 | 4,2 | 2,2 | 1,02 | 0,4  | 60 | 61  | 17,22 | 49   | 8  | 14 |
| 6         | ΛΙ      |      |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 29/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 13:1 | 6 | 10,1 | 8,4 | 6,6  | 2 | 4,5 | 2,5 | 1,03 | 0,39 | 56 | 62  | 18,2  | 48,5 | 7  | 8  |
| 6         | ΛΙ ΒΙΟ  | 5    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 30/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 17:5 | 7 | 10,5 | 9,4 | 8    | 2 | 5   | 3   | 0,76 | 0,31 | 76 | 59  | 0,25  | 62   | 10 | 12 |
| 6         | ΛΙ      | 5    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 31/1/2026 | ΠΟΡΤΟΚΑ | 12:1 | 6 | 10,1 | 8,8 | 8,35 | 2 | 5   | 3   | 0,5  | 0,81 | 72 | -62 | 0,45  | 75   | 14 | 12 |
| 6         | ΛΙ      | 0    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 2/2/2026  | ΒΙΟ     |      |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 2/2/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ | 10:5 | 7 | 10,7 | 9,2 | 8,69 | 2 | 5   | 3   | 0,83 | 0,35 | 62 | 58  | 0,37  | 58,5 | 12 | 14 |
|           | ΛΙ      | 5    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 3/2/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ | 12:0 | 6 | 10   | 9,3 | 8,85 | 2 | 4,2 | 2,2 | 1,2  |      | 70 | 100 | 0,89  | 40   | 10 | 16 |
|           | ΛΙ      | 0    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 4/2/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ | 9:10 | 6 | 10   | 9,6 | 8,65 | 2 | 4   | 2   | 0,82 | 0,31 | 80 | 62  | 0,32  | 59   | 12 | 14 |
|           | ΛΙ      |      |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 4/2/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ | 16:2 | 6 | 9,9  | 9,2 | 7,8  | 2 | 4   | 2   | 0,83 | 0,4  | 72 | 52  | 0,47  | 58,5 | 8  | 14 |
|           | ΛΙ      | 0    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 4/2/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ | 19:5 | 6 | 9,9  | 8,2 | 7,69 | 2 | 5   | 3   | 0,93 | 0,47 | 70 | 49  | 6,97  | 53,5 | 10 | 10 |
|           | ΛΙ      | 0    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 5/2/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ | 11:1 | 6 | 10   | 9,5 | 8,9  | 2 | 4,2 | 2,2 | 0,92 | 0,32 | 72 | 65  | 0,65  | 54   | 10 | 14 |
|           | ΛΙ ΒΙΟ  | 5    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 5/2/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ | 14:1 | 6 | 10   | 9,3 | 7,73 | 2 | 4   | 2   | 0,68 | 0,29 | 56 | 57  | 0,61  | 66   | 12 | 10 |
|           | ΛΙ ΒΙΟ  | 0    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 5/2/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ | 19:1 | 6 | 9,9  | 8,3 | 6,75 | 2 | 4,5 | 2,5 | 0,79 | 0,33 | 70 | 58  | 10,73 | 60,5 | 9  | 9  |
|           | ΛΙ ΒΙΟ  | 0    |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 6/2/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ | 9:20 | 6 | 10   | 9,5 | 8,4  | 2 | 4,2 | 2,2 | 0,82 | 0,3  | 78 | 63  | 10,73 | 59   | 12 | 14 |
|           | ΛΙ      |      |   |      |     |      |   |     |     |      |      |    |     |       |      |    |    |
| 6/2/2026  | ΠΟΡΤΟΚΑ | 11:2 | 6 | 10   | 9,3 | 8,7  | 2 | 4   | 2   | 1,18 | 0,36 | 70 | 69  | 0,41  | 41   | 12 | 16 |

|           |                   |           |   |      |      |       |   |     |         |      |      |    |    |       |      |    |    |
|-----------|-------------------|-----------|---|------|------|-------|---|-----|---------|------|------|----|----|-------|------|----|----|
| 6/2/2026  | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>16:3 | 6 | 10,2 | 9,3  | 8,33  | 2 | 4,8 | 2,<br>8 | 1,16 | 0,41 | 76 | 65 | 2,22  | 42   | 12 | 15 |
| 9/2/2026  | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 5<br>14:3 | 6 | 10   | 9,8  | 7,5   | 2 | 5   | 3       | 0,69 | 0,21 | 90 | 70 | 0,46  | 65,5 | 10 | 10 |
| 10/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>15:0 | 6 | 9,5  | 8,6  | 7,3   | 2 | 4   | 2       | 0,67 | 0,29 | 88 | 57 | 0,59  | 66,5 | 8  | 8  |
| 10/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>17:0 | 6 | 9,4  | 8,5  | 8,2   | 2 | 4   | 2       | 0,5  | 0,24 | 68 | 52 | 3,47  | 75   | 10 | 8  |
| 12/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>10:0 | 6 | 9,7  | 9,2  | 8,18  | 2 | 4,6 | 2,<br>6 | 0,68 | 0,25 | 70 | 63 | 3,13  | 66   | 10 | 14 |
| 13/2/2026 | ΛΙ ΒΙΟ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ | 5<br>13:3 | 6 | 9,8  | 9,2  | 7,6   | 2 | 4,2 | 2,<br>2 | 0,7  | 0,24 | 62 | 66 | 3,14  | 65   | 16 | 18 |
| 13/2/2026 | ΛΙ ΒΙΟ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ | 0<br>16:5 | 6 | 9,9  | 8,8  | 7,4   | 2 | 4   | 2       | 0,55 | 0,24 | 60 | 56 | 7     | 72,5 | 12 | 16 |
| 14/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 40<br>9:4 | 6 | 9,6  | 7,8  | 8,6   | 2 | 5   | 3       | 0,76 | 0,43 | 72 | 43 | 5,33  | 62   | 10 | 14 |
| 16/2/2026 | ΛΙ ΒΙΟ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ | 0<br>13:5 | 7 | 9,5  | 8,9  | 11,03 | 2 | 4,2 | 2,<br>2 | 0,81 | 0,42 | 50 | 48 | 0,56  | 59,5 | 30 | 30 |
| 17/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 50<br>8:5 | 7 | 10,7 | 10,1 | 8,5   | 2 | 4,2 | 2,<br>2 | 0,55 | 0,31 | 70 | 44 | 2,05  | 72,5 | 22 | 20 |
| 17/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 5<br>13:4 | 7 | 10,2 | 9,7  | 11,87 | 2 | 4   | 2       | 0,91 | 0,5  | 48 | 45 | 10,26 | 54,5 | 32 | 34 |
| 18/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>10:0 | 6 | 9,9  | 9    | 8,9   | 2 | 4   | 2       | 0,59 | 0,34 | 60 | 42 | 3,9   | 70,5 | 14 | 20 |
| 18/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>12:2 | 6 | 9,9  | 8,9  | 8,9   | 2 | 4,5 | 2,<br>5 | 0,76 | 0,39 | 80 | 49 | 1,06  | 62   | 14 | 22 |
| 18/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 5<br>15:1 | 5 | 9,9  | 8,7  | 9,18  | 2 | 4,1 | 2,<br>1 | 1,05 | 0,5  | 46 | 52 | 11,97 | 47,5 | 16 | 20 |
| 18/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>17:1 | 6 | 9,5  | 8,3  | 9,54  | 2 | 4   | 2       | 0,57 | 0,24 | 50 | 58 | 1,97  | 71,5 | 20 | 22 |
| 19/2/2026 | ΛΙ ΒΙΟ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ | 45<br>9:4 | 6 | 9,7  | 9    | 9,4   | 2 | 4,2 | 2,<br>2 | 0,6  | 0,27 | 80 | 55 | 0,21  | 70   | 20 | 20 |
| 19/2/2026 | ΛΙ ΒΙΟ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ | 5<br>13:5 | 6 | 9,2  | 8,1  | 9,2   | 2 | 4   | 2       | 0,84 | 0,35 | 60 | 58 | 13,24 | 58   | 18 | 18 |
| 19/2/2026 | ΛΙ ΒΙΟ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ | 0<br>18:1 | 6 | 9,2  | 8,4  | 7,42  | 2 | 4   | 2       | 0,8  | 0,38 | 90 | 53 | 5,93  | 60   | 10 | 10 |
| 20/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 30<br>9:3 | 6 | 10,1 | 9,3  | 8,8   | 2 | 4   | 2       | 0,8  | 0,29 | 70 | 64 | 5,38  | 60   | 14 | 16 |
| 20/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>12:4 | 6 | 10,2 | 9,5  | 8,5   | 2 | 4   | 2       | 0,88 | 0,27 | 70 | 69 | 12    | 56   | 12 | 16 |
| 20/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>15:1 | 6 | 10,2 | 9,3  | 6,53  | 2 | 4,2 | 2,<br>2 | 0,82 | 0,31 | 50 | 62 | 7,4   | 59   | 6  | 10 |
| 20/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>17:4 | 6 | 10,2 | 9,3  | 8,02  | 2 | 4,1 | 2,<br>1 | 0,76 | 0,32 | 52 | 58 | 8,11  | 62   | 11 | 11 |
| 24/2/2026 | ΛΙ ΒΙΟ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ | 0<br>10:5 | 6 | 10,5 | 9,8  | 7,9   | 2 | 4,2 | 2,<br>2 | 0,8  | 0,22 | 50 | 73 | 8,5   | 60   | 10 | 12 |
| 24/2/2026 | ΛΙ ΒΙΟ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ | 0<br>15:1 | 6 | 9,8  | 9,2  | 8,1   | 2 | 4,5 | 2,<br>5 | 0,86 | 0,3  | 54 | 65 | 6,5   | 57   | 12 | 14 |
| 25/2/2026 | ΛΙ<br>ΠΟΡΤΟΚΑ     | 0<br>10:0 | 6 | 10,5 | 9,5  | 7,4   | 2 | 4,5 | 2,<br>5 | 1    | 0,35 | 76 | 65 | 7,45  | 50   | 8  | 12 |

|               |                   |           |   |      |     |     |   |     |         |      |      |    |    |     |      |    |    |
|---------------|-------------------|-----------|---|------|-----|-----|---|-----|---------|------|------|----|----|-----|------|----|----|
| 26/2/202<br>6 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 10:0<br>0 | 6 | 10   | 9,5 | 8,4 | 2 | 4,2 | 2,<br>2 | 0,82 | 0,22 | 58 | 73 | 3   | 59   | 8  | 8  |
| 26/2/202<br>6 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 13:0<br>0 | 7 | 10   | 9,2 | 7,4 | 2 | 4,4 | 2,<br>4 | 0,95 | 0,28 | 60 | 71 | 7,1 | 52,5 | 6  | 8  |
| 26/2/202<br>6 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 19:0<br>0 | 7 | 10,5 | 9,3 | 8   | 2 | 4,5 | 2,<br>5 | 1,00 | 0,25 | 65 | 75 | 2,5 | 50   | 6  | 9  |
| 27/2/202<br>6 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 10:0<br>0 | 6 | 10,3 | 9   | 9   | 2 | 4,3 | 2,<br>3 | 1,10 | 0,2  | 70 | 82 | 2   | 45   | 12 | 16 |
| 27/2/202<br>6 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ ΒΙΟ | 13:0<br>0 | 6 | 10,1 | 9,1 | 8,4 | 2 | 4,5 | 2,<br>5 | 0,96 | 0,27 | 65 | 72 | 2,5 | 52   | 8  | 9  |
| 27/2/202<br>6 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 16:0<br>0 | 6 | 10,5 | 9,5 | 8,6 | 2 | 4,6 | 2,<br>6 | 0,88 | 0,26 | 63 | 70 | 2,9 | 56   | 9  | 12 |
| 27/2/202<br>6 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 19:0<br>0 | 6 | 9    | 8,1 | 8,4 | 2 | 4,7 | 2,<br>7 | 1,04 | 0,28 | 58 | 73 | 3   | 48   | 8  | 12 |
| 28/2/202<br>6 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 10:0<br>0 | 6 | 9,5  | 8,2 | 9,4 | 2 | 4,7 | 2,<br>7 | 1,07 | 0,27 | 53 | 75 | 5   | 46,5 | 12 | 14 |
| 28/2/202<br>6 | ΠΟΡΤΟΚΑ<br>ΛΙ     | 14:0<br>0 | 6 | 10,5 | 9,7 | 9,5 | 2 | 4,5 | 2,<br>5 | 1,00 | 0,3  | 54 | 70 | 2,5 | 50   | 9  | 12 |





## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ – Δεδομένα παραγωγής και απόδοσης αιθέριου ελαίου

Στον πίνακα παρουσιάζονται οι ημερήσιες καταγραφές παραγωγής αιθέριου ελαίου και η αντίστοιχη απόδοση ως προς την ποσότητα επεξεργασμένου φρούτου. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των διαγραμμάτων ελέγχου και την αξιολόγηση της σταθερότητας της παραγωγικής διεργασίας.

| ΗΜΕΡΙΑ   | ΑΙΘΕΡΙΟ ΕΛΑΙΟ ΣΕ<br>ΚΙΛΑ | ΑΠΟΔΟΣΗ ΑΙΘΕΡΙΟΥ ΕΛΑΙΟΥ<br>‰ |
|----------|--------------------------|------------------------------|
| 01/12/25 | 356                      | 1,58                         |
| 03/12/25 | 289                      | 1,36                         |
| 04/12/25 | 390                      | 1,71                         |
| 05/12/25 | 51                       | 0,53                         |
| 08/12/25 | 238                      | 2,84                         |
| 09/12/25 | 480                      | 2,21                         |
| 10/12/25 | 577                      | 1,62                         |
| 11/12/25 | 357                      | 1,41                         |
| 12/12/25 | 220                      | 1,59                         |
| 13/12/25 | 163                      | 1,39                         |
| 15/12/25 | 201                      | 1,36                         |
| 16/12/25 | 425                      | 1,25                         |
| 17/12/25 | 441                      | 2,33                         |
| 18/12/25 | 68                       | 0,35                         |
| 19/12/25 | 374                      | 1,69                         |
| 20/12/25 | 407                      | 2,11                         |
| 22/12/25 | 340                      | 1,41                         |
| 23/12/25 | 526                      | 1,66                         |
| 27/12/25 | 56                       | 0,34                         |
| 29/12/25 | 170                      | 2,60                         |
| 30/12/25 | 756                      | 2,66                         |
| 31/12/25 | 295                      | 2,00                         |
| 02/01/26 | 119                      | 2,78                         |
| 03/01/26 | 357                      | 1,62                         |
| 05/01/26 | 390                      | 2,33                         |
| 07/01/26 | 204                      | 1,31                         |
| 08/01/26 | 289                      | 0,97                         |
| 09/01/26 | 509                      | 1,71                         |
| 10/01/26 | 396                      | 1,99                         |
| 12/01/26 | 645                      | 1,60                         |
| 13/01/26 | 374                      | 1,72                         |
| 14/01/26 | 60                       | 1,75                         |
| 15/01/26 | 517                      | 1,78                         |
| 16/01/26 | 493                      | 1,73                         |
| 17/01/26 | 424                      | 1,87                         |
| 20/01/26 | 441                      | 1,91                         |
| 21/01/26 | 221                      | 1,93                         |
| 22/01/26 | 725                      | 2,55                         |
| 23/01/26 | 747                      | 2,58                         |
| 24/01/26 | 476                      | 2,07                         |

|          |     |      |
|----------|-----|------|
| 26/01/26 | 347 | 3,11 |
| 27/01/26 | 629 | 1,48 |
| 29/01/26 | 238 | 2,07 |
| 30/01/26 | 628 | 2,01 |
| 31/01/26 | 407 | 1,80 |
| 02/02/26 | 323 | 1,75 |
| 03/02/26 | 679 | 1,67 |
| 04/02/26 | 476 | 1,44 |
| 05/02/26 | 383 | 2,18 |
| 06/02/26 | 549 | 1,97 |
| 09/02/26 | 528 | 1,57 |
| 10/02/26 | 543 | 1,54 |
| 12/02/26 | 208 | 1,12 |
| 13/02/26 | 254 | 1,48 |
| 14/02/26 | 493 | 1,93 |
| 16/02/26 | 373 | 1,72 |
| 17/02/26 | 442 | 1,02 |
| 18/02/26 | 238 | 1,13 |
| 19/02/26 | 203 | 1,16 |
| 20/02/26 | 917 | 2,13 |
| 24/02/26 | 136 | 1,40 |
| 25/02/26 | 646 | 2,38 |
| 26/02/26 | 120 | 2,08 |
| 27/02/26 | 782 | 2,09 |
| 28/02/26 | 390 | 2,02 |