



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΟΙΝΟΥ, ΑΜΠΕΛΟΥ ΚΑΙ ΠΟΤΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Τίτλος Εργασίας

Σύγκριση μηχανικών μεθόδων τεχνητής παλαίωσης

Όνοματεπώνυμο:

Μαρία Ψαρογιάννη

ΑΜ: 19685125

Επιβλέπων Όνοματεπώνυμο: Γεώργιος Ντουρτόγλου

ΑΘΗΝΑ, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ-2023



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΟΙΝΟΥ, ΑΜΠΕΛΟΥ ΚΑΙ ΠΟΤΩΝ**

ΔΗΛΩΣΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Οι υπογράφοντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει τη διπλωματική εργασία με
τίτλο:

«Σύγκριση μηχανικών μεθόδων τεχνητής παλαίωσης»

και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα Καθηγητή (1^ο Μέλους Επιτροπής)	
Ψηφιακή Υπογραφή Καθηγητή (2^ο Μέλους Επιτροπής)	
Ψηφιακή Υπογραφή Καθηγητή (3^ο Μέλους Επιτροπής)	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογράφουσαΨαρογιάννη...Μαρία.... του...Δημητρίου.....,

με αριθμό μητρώου 19685125 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής επιστημών τροφίμων του Τμήματος επιστήμης οίνου, αμπέλου και ποτών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

Ψαρογιάννη Μαρία

(Ονοματεπώνυμο & Υπογραφή)



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η οινοποίηση έχει τις ρίζες της στη Νεολιθική εποχή, όταν η καλλιέργεια της αμπέλου διαδόθηκε από τον Καύκασο στη Μεσόγειο. Το ορόσημο της χρήσης δρύνων βαρελιών τον 1ο αιώνα π.Χ. βελτίωσε τη συντήρηση και τη μεταφορά του οίνου. Η παλαίωση οίνου και αποσταγμένων ποτών στοχεύει στη βελτίωση γεύσης και αρωμάτων. Η διαδικασία αυτή επηρεάζεται από θερμοκρασία, υγρασία και συνθήκες αποθήκευσης, ενώ τα δρύινα βαρέλια προσδίδουν σύνθετα αρώματα και σταθερότητα στον οίνο. Σήμερα, χρησιμοποιούνται νέες μέθοδοι όπως τα ξυλοτεμαχίδια δρυός και τα ηλεκτρικά πεδία, που επιταχύνουν την παλαίωση. Τα ηλεκτρικά πεδία βελτιώνουν την εκχύλιση φαινολικών ουσιών, ενισχύοντας τη γεύση και το χρώμα του οίνου, αλλά ενδέχεται να εισάγουν ανεπιθύμητα μεταλλικά στοιχεία. Ειδικά στην παλαίωση αποσταγμένων ποτών, τα ηλεκτρικά πεδία συμβάλλουν στην επιτάχυνση της διαδικασίας, αλλά μπορεί να προκαλέσουν την εισαγωγή ανεπιθύμητων μεταλλικών στοιχείων. Τα μικροκύματα είναι μια άλλη καινοτομία στην οινοποιία, που προσφέρει ταχύτερη παλαίωση και βελτιωμένη εκχύλιση φαινολικών ενώσεων. Χρησιμοποιούνται για την καταπολέμηση μικροβίων και τη μείωση της ανάγκης για χημικά συντηρητικά, όπως το SO₂. Ωστόσο, οι υψηλές θερμοκρασίες που παράγονται κατά τη διαδικασία μπορεί να προκαλέσουν απώλεια αρωμάτων και να υποβαθμίσουν την ποιότητα του οίνου. Η τεχνολογία των υπερήχων χρησιμοποιείται επίσης για την επιτάχυνση της παλαίωσης και τη βελτίωση της ποιότητας του οίνου. Με τη βοήθεια των υπερήχων, οι χημικές αντιδράσεις ενισχύονται, ενώ η αυτολυτική διαδικασία των ζυμομυκήτων επιταχύνεται, απελευθερώνοντας πολύτιμα συστατικά όπως πολυσακχαρίτες. Ωστόσο, η υπερβολική χρήση υπερήχων μπορεί να υποβαθμίσει την ποιότητα του οίνου, προκαλώντας αποικοδόμηση ορισμένων ενώσεων, όπως οι ανθοκυανίνες. Η υψηλή υδροστατική πίεση είναι μια άλλη μέθοδος που εφαρμόζεται στην επεξεργασία τροφίμων και ποτών, συμπεριλαμβανομένων των οίνων. Η μέθοδος αυτή επιδρά στις φαινολικές ενώσεις, στο χρώμα και τη γεύση του οίνου, προσομοιώνοντας τα χαρακτηριστικά των παλαιωμένων οίνων. Ωστόσο, αν και η διαδικασία μπορεί να επιταχύνει την παλαίωση, απαιτεί προσεκτική ρύθμιση, καθώς υψηλότερες πιέσεις και μεγαλύτεροι χρόνοι επεξεργασίας μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την ποιότητα του οίνου. Οι νέες αυτές τεχνολογίες, όπως τα παλλόμενα ηλεκτρικά πεδία, τα μικροκύματα, οι υπέρηχοι και η υπερυψηλή πίεση, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην επιτάχυνση της παλαίωσης και τη βελτίωση της ποιότητας των ποτών. Παρά το υψηλό αρχικό κόστος και τις προκλήσεις που παρουσιάζουν, η μείωση του χρόνου επεξεργασίας, η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και τα βελτιωμένα αποτελέσματα δικαιολογούν τη χρήση τους. Ωστόσο, οι νέες αυτές μέθοδοι απαιτούν περαιτέρω έρευνα και προσεκτική εφαρμογή για να αποφευχθούν αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα των τελικών προϊόντων.

Λέξεις κλειδιά: παλαίωση, ξυλοτεμαχίδια δρυός, παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, μικροκύματα, υπέρηχοι, υπερυψηλή πίεση

ABSTRACT

Winemaking has its roots in the Neolithic era, when the cultivation of the vine spread from the Caucasus to the Mediterranean. The landmark use of oak barrels in the 1st century BC improved the preservation and transport of wine. The ageing of wine and distilled beverages aims to improve flavour and aromas. This process is influenced by temperature, humidity and storage conditions, while oak barrels impart complex aromas and stability to wine. Today, new methods such as oak chips and electric fields are used to accelerate ageing. Electric fields improve the extraction of phenolic substances, enhancing the flavour and colour of the wine, but may introduce unwanted minerals. Especially in the ageing of distilled beverages, electric fields help to speed up the process, but can cause the introduction of unwanted minerals. Microwaves are another innovation in winemaking, offering faster ageing and improved extraction of phenolic compounds. They are used to combat microbes and reduce the need for chemical preservatives such as SO₂. However, the high temperatures produced during the process can cause loss of flavors and degrade the quality of the wine. Ultrasonic technology is also used to accelerate ageing and improve wine quality. With the help of ultrasound, chemical reactions are enhanced and the autolytic process of the yeasts is accelerated, releasing valuable components such as polysaccharides. However, excessive use of ultrasound can degrade the quality of wine by causing degradation of certain compounds, such as anthocyanins. High Hydrostatic Pressure technology is another method applied to food and beverage processing, including wine. This method affects the phenolic compounds, colour and taste of wine, simulating the characteristics of aged wines. However, although the process can accelerate ageing, it requires careful adjustment, as higher pressures and longer processing times can adversely affect the quality of the wine. These new technologies, such as pulsed electric fields, microwaves, ultrasound and high pressure, offer significant advantages in accelerating ageing and improving the quality of beverages. Despite their high initial costs and challenges, the reduction in processing time, low energy consumption and improved results justify their use. However, these new methods require further research and careful implementation to avoid negative effects on the quality of the final products.

Key words: ageing, oak chips, pulsed electric field, microwaves, ultrasound, high pressure

Αφιέρωση

Στον παππού μου, Αναστάσιο

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, δεν θα μπορούσε να έχει επιτευχθεί χωρίς την διαρκή καθοδήγηση από τον καθηγητή μου Γ. Ντουρτόγλου, ο οποίος μου πρόσφερε όλες τις απαραίτητες γνώσεις για τον σκοπό αυτό. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου για την ανεκτίμητη βοήθεια τους, η οποία συνέβαλε στην υλοποίηση του στόχου μου. Τέλος, θα ήθελα να εκτείνω τις ευχαριστίες μου και στον σύντροφο μου Μιχάλη για την αμέριστη υποστήριξη του.

Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	3
ABSTRACT.....	4
1.1 Ιστορική αναδρομή της αμπελουργίας	7
1.2 Φυσική Παλαίωση	10
1.3 Σκοπός Παλαίωσης	13
1.4 Διαδικασία φυσικής παλαίωσης	15
1.5 Οφέλη παλαίωσης	18
1.6 Ανάπτυξη τεχνητών μεθόδων παλαίωσης χρησιμοποιώντας τα oak chips.....	21
2. Μηχανικές μέθοδοι τεχνητής παλαίωσης.....	24
2.1 Παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο.....	24
2.1.1 Τι είναι και χρήσεις του στην οινολογία	24
2.1.2 Χρήση του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου στην παλαίωση του οίνου	29
2.1.3 Επίδραση του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου στην παλαίωση άλλων ποτών.....	33
2.2 Μικροκύματα.....	36
2.2.1 Τι είναι και εφαρμογές στην οινολογία	36
2.2.2 Επίδραση μικροκυμάτων στην παλαίωση του οίνου.....	39
2.2.3 Επίδραση μικροκυμάτων στην παλαίωση άλλων ποτών.....	44
2.3 Υπέρηχοι	46
2.3.1 Τι είναι και εφαρμογή τους στην οινολογία	46
2.3.2 Επίδραση των υπερήχων στην παλαίωση των οίνων	48
2.3.3 Επίδραση των υπερήχων στην παλαίωση άλλων ποτών.....	53
2.4 Υπερ υψηλή πίεση	57
2.4.1 Τι είναι και χρήσεις στην οινολογία	57
2.4.2 Επίδραση της υπερ υψηλής πίεσης στον οίνο	59
2.4.3 Επίδραση της υπερ υψηλής πίεσης σε άλλα ποτά	62
3. Συμπεράσματα	65
4. Βιβλιογραφία	73

Κατάλογος Σχημάτων και Εικόνων

Εικόνα 1 Οι αντιδράσεις έγιναν σε συνθήκες μικρο-οξυγόνωσης. (Α) οι αλκοόλες οξειδώνονται σε αλδεΐδες (Β) οι αλδεΐδες οξειδώνονται σε οξέα (C) αντίδραση εστεροποίησης (D) αντίδραση πολυμερισμού των αλκοολών και των αλδεϋδών θα μπορούσαν να συμπυκνωθούν σε ακετάλη.

Εικόνα 2 Διάταξη παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου

Εικόνα 3 Σχηματική απεικόνιση του διαμεμβρανικού δυναμικού που προκαλείται από παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο (Α), της μεμβράνης πριν από την ηλεκτρομόνωση (Β), της ηλεκτρομόνωσης της κυτταρικής μεμβράνης (Γ), και της αποσύνθεσης της μεμβράνης που προκαλείται από υπερβολική επεξεργασία με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο (Δ).

Εικόνα 4 Διάταξη παλλόμενων μικροκυμάτων υψηλής ισχύος

1.1 Ιστορική αναδρομή της αμπελουργίας

Η αμπελουργία εμφανίστηκε κατά τη νεολιθική περίοδο (10.000-4000 π.Χ.) στην περιοχή του Νότιου Καυκάσου και στη συνέχεια εξαπλώθηκε σε όλη τη Μεσόγειο. Η αρχαία αμπελουργία και οι μέθοδοι οινοποίησης περιεγράφηκαν από Ρωμαίους συγγραφείς στις γεωργικές τους πραγματείες - τον Κάτωνα (περ. 234-149 π.Χ.), τον Βάρο (περ. 116-27 π.Χ.), τον Πλίνιο τον Πρεσβύτερο (περ. 23/24-79 μ.Χ.), τον Columella (περ. 1ος αι. μ.Χ.) και τον Παλλάδιο (τέλη 4ου/αρχές 5ου αι. μ.Χ.). (Harutyunyan & Malfeito-Ferreira, 2022a), (Carpena et al., 2020), (Dodd, 2020). Εν συνέχεια οι πρόγονοί μας πήραν την αμπελουργία και την οινοποιία από τις πρωτογενείς περιοχές παραγωγής σταφυλιών και οίνου, πιθανότατα ακολουθώντας το ήδη υπάρχον εμπόριο άλλων αγαθών. Στην πραγματικότητα, οι θαλάσσιες διαδρομές μετέφεραν τη γεωργία κατά τη νεολιθική εποχή από το Λεβάντε (8500 π.Χ.) στη Δυτική Ευρώπη (5200 π.Χ.) σε ένα ταξίδι που προχωρούσε με ρυθμό περίπου 1 χλμ./έτος, διαδίδοντας ένα τεράστιο φάσμα εργαλείων και αναδυόμενων τεχνολογιών (Harutyunyan & Malfeito-Ferreira, 2022b).

Η συντήρηση και παλαίωση του οίνου είναι μια ιστορική πρακτική που εφαρμόζεται εδώ και χιλιάδες χρόνια σε διάφορους πολιτισμούς. Τα αρχαιολογικά στοιχεία δείχνουν ότι η πρώτη παραγωγή οίνου μεγάλης κλίμακας ξεκίνησε στη Μεσοποταμία τουλάχιστον γύρω στο 5400 πριν από την κοινή εποχή (π.Χ.) και τα πρώτα δοχεία μεταφοράς οίνου αναπτύχθηκαν από τους Έλληνες και τους Ρωμαίους γύρω στο 2000 π.Χ. (Carpena et al., 2020). Κατά την αρχαιότητα, τα πήχτα δοχεία χρησιμοποιούνταν για την παλαίωση των καλύτερων οίνων και οι ξύλινες κούπες για τα λιγότερο πολύτιμους οίνους (Dodd, 2020). Η νότια Αρμενία φιλοξενεί την παλαιότερη εγκατάσταση παραγωγής οίνου στον κόσμο, η οποία χρονολογείται πριν από 6100 χρόνια. Οι ανασκαφές στη θέση Areni-1 πραγματοποιήθηκαν το 2007 και το 2010. Το Areni-1 περιγράφεται ως ένα μεγάλο καρστικό σπήλαιο με τρεις θαλάμους που βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα του χωριού Areni, στην αριστερή πλευρά της λεκάνης του ποταμού Αιρά. Το σπήλαιο απέδωσε δύο καλά διατηρημένους κυλινδρικούς φούρνους ψωμιού, δοχεία αποθήκευσης σιτηρών και οίνων, οργανικά υπολλείματα και άλλα μικρά ευρήματα. Το αρχαιολογικό υλικό του σπηλαίου χρονολογείται από την νεολιθική έως την ύστερη μεσαιωνική περίοδο, με τα σημαντικότερα ευρήματα να χρονολογούνται από τη Χρυσή Εποχή του Λίθου (5500-3400 π.Χ.). (Areshian et al., 2012).

Το στοιχείο για την κατά προσέγγιση χρονολόγηση των παλαιότερων λεβαντίνικων αμπελώνων από τεχνολογική άποψη ήταν η απουσία εγκαταστάσεων έκθλιψης. Ωστόσο, η απουσία έκθλιψης δεν φαίνεται να έχει νόημα από τεχνολογική και οικονομική άποψη, δεδομένου ότι η διαδικασία αυτή αυξάνει τον όγκο του οίνου κατά περίπου 25%, τουλάχιστον (Harutyunyan & Malfeito-Ferreira, 2022a). Η απάντηση μπορεί να βρίσκεται στις αιγυπτιακές απεικονίσεις ομάδων ανδρών που στρέφουν σάκους, στύβουν σταφύλια και στραγγίζουν το χυμό. Η διαδικασία ήταν ιδιαίτερα περιπετειώδης, καθώς οι άνδρες περπατούσαν σε οριζόντια θέση και έσφιγγαν τα σακιά χρησιμοποιώντας κοντάρια. Εκτός από αυτές τις σκηνές, διάφορες τεχνικές πρακτικές περιγράφονται με μεγάλη λεπτομέρεια (πάτημα του αμπελώνα και των σταφυλιών, στράγγισμα και συμπίεση του χυμού των σταφυλιών, μάζεμα, σύνθλιψη, συγκομιδή σταφυλιών και πτηνοτροφία, σκηνή πατητηριού με σφραγισμένα και μη σφραγισμένα πιθάρια οίνου) από την εποχή του Παλαιού Βασιλείου (2575-2150 π.Χ.) έως τη 18η Δυναστεία (1539-1292 π.Χ.) και κατά την περίοδο του Νέου Βασιλείου (1539-1075 π.Χ.). Αυτά τα σακοειδή πιεστήρια δεν εντοπίστηκαν στα προαναφερθέντα πετρώδη υπαίθρια

κελάρια, αλλά μπορεί απλώς να εξαφανίστηκαν λόγω της φθαρτής τους φύσης (Guasch-Jané et al., 2006).

Εκτός από την Αίγυπτο, ο οίνος διαδραμάτισε καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση των πολιτισμών της Εποχής του Χαλκού στην Εύφορη Ημισέληνο (Σουμέριοι, Ακκάδιοι, Ασσύριοι και Βαβυλώνιοι). Τα σύντομα θαλάσσια ταξίδια έκαναν εύκολα προσβάσιμες την Κύπρο, την Κρήτη (Κνωσός) και άλλα ελληνικά νησιά, που ήταν η πατρίδα των Μινωικών και των Μυκηναίων. Οι κειμενικές μαρτυρίες υπογραμμίζουν τον πολυτελή χαρακτήρα του οίνου, την τελετουργική του σχέση, τα ταφικά έθιμα και τα γλέντια (Harutyunyan & Malfeito-Ferreira, 2022b). Στις βόρειες ακτές της Μεσογείου, οι Έλληνες κυριάρχησαν στο θαλάσσιο εμπόριο και ο οίνος έφτασε στη Μεγάλη Ελλάδα (Νότια Ιταλία), την Ετρουρία και το Λάτσιο. Τελικά, το τόξο της Μεσογείου έκλεισε όταν οι Καρχηδόνιοι έμποροι εμπορεύτηκαν οίνο με τους Γαλάτες από τον 8ο αιώνα π.Χ. στο Λανγκ-Τόκ. Στη συνέχεια, Ετρούσκοι και κυρίως Έλληνες άποικοι, που εγκαταστάθηκαν από τον 6ο αιώνα στις ακτές της Καταλονίας και της Βαλένθια, λάμβαναν οίνους από τη Μασσαλία (Μασσαλία, Νότια Γαλλία) και την Ετρουρία (Τοσκάνη, Κεντρική Ιταλία). Στη Μαγιόρκα (Βαλεαρίδες Νήσοι, Ισπανία), αποθέματα αμπέλου και αμφορείς οίνου από την ανατολική Μεσόγειο ανασύρθηκαν από ένα ναυάγιο που χρονολογείται γύρω στο 375 π.Χ., γεγονός που δείχνει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δύο ακτών της θάλασσας, οι οποίες μπορεί να εξηγήσουν τη διασπορά των ποικιλιών αμπέλου (Harutyunyan & Malfeito-Ferreira, 2022b), (Dodd, 2020).

Τα πρώτα οινοποιεία, τα οποία μπορεί να μοιάζουν κάπως με τα σημερινά, περιγράφονται σε διάφορα κλασικά ρωμαϊκά εγχειρίδια, τα οποία απαριθμούν τα απαιτούμενα σκεύη και τον εξοπλισμό, τη θέση και τον προσανατολισμό του κτιρίου, τη διάταξη του εξοπλισμού, καθώς και τις διαδικασίες υγιεινής και τις οδηγίες για την οινοποίηση (Dodd, 2020). Η ζύμωση και η ωρίμανση κατά τη Ρωμαϊκή Αυτοκρατορία γίνονταν σε πήλινα πιθάρια και αμφορείς, τα οποία ήταν φθηνά και πολύ διαδεδομένα, αλλά είχαν μια σειρά από μειονεκτήματα, καθώς ήταν εύθραυστα, βαριά και δύσκολα στη χρήση. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και προκειμένου να λυθούν αυτά τα προβλήματα, αναπτύχθηκαν τα βαρέλια (Carpena et al., 2020). Η δρυς που χρησιμοποιούνταν την εποχή των αρχαίων Ρωμαίων, χρησιμοποιείται και σήμερα για την κατασκευή βαρελιών (Yildirim & Dündar, 2017). Η εισαγωγή των δρύνων βαρελιών αποδίδεται συνήθως στους κελτικούς λαούς όταν οι Ρωμαίοι έφτασαν στη Γαλλία (Harutyunyan & Malfeito-Ferreira, 2022a). Τα ξύλινα βαρέλια άρχισαν να χρησιμοποιούνται ευρέως ως δοχεία για το λάδι και τον οίνο πριν από περισσότερα από 2000 χρόνια στη Βόρεια Ευρώπη, υπό τον έλεγχο της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας, καθώς ο πηλός δεν υπήρχε σε διαθεσιμότητα στις περιοχές αυτές. Από την εφεύρεσή τους, τα βαρέλια έχουν αποθηκεύσει, μεταφέρει και παλαιώσει ένα ευρύ φάσμα ποτών, όχι μόνο οίνο, αλλά και μπίρα, ούισκι και άλλα λικέρ (Carpena et al., 2020). Κατά την αρχαιότητα χρησιμοποιούνταν πισσόλιθοι για την παλαίωση των καλύτερων οίνων και ξύλινα δοχεία για τους λιγότερο αξιόλογους (Dodd, 2020). Το ξύλο της βελανιδιάς και της καστανιάς ήταν τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα για βαρέλια τον 16ο αιώνα λόγω της ανθεκτικότητας, της ευκαμψίας και της σχετικής αδιαπερατότητάς τους. Σήμερα, συνεχίζουν να αποτελούν τα μόνα είδη που επιτρέπονται από τον διεθνή οργανισμό αμπέλου και οίνου (OIV). Η δρυς εξακολουθεί να είναι το κυριότερο χρησιμοποιούμενο ξύλο, ακολουθούμενη από την καστανιά, ενώ άλλα ξύλα όπως η ψευδοακάκια ή τα είδη κερασιάς εξακολουθούν να ερευνώνται (Carpena et al., 2020).

Ωστόσο παλιότερα, ο σκοπός ήταν μόνο η χρήση ενός ελαφρύτερου δοχείου πιο ανθεκτικού στην αποθήκευση και τη μεταφορά σε σχέση με τα πήλινα πιθάρια και όχι ο αρωματισμός και

το μαλάκωμα του οίνου, όπως προβλέπεται σήμερα. Ένα μινωικό τριποδικό μαγειρικό σκεύος (περ. 1900-1700 π.Χ.) βρέθηκε με υπολείμματα ρητινωμένου οίνου και δρύινης λακτόνης, ένδειξη προσθήκης καβουρδισμένης δρυός (Dodd, 2020). Ωστόσο, αυτό είναι ένα μεμονωμένο εύρημα, δεδομένου ότι δεν υπάρχουν περαιτέρω αναφορές στη γευστική επίδραση της δρυός, ή άλλων ειδών ξύλου. Στην πραγματικότητα, η συνεχής χρήση των βαρελιών αφαιρεί τις οσμές από το ξύλο (Carpena et al., 2020). Επιπλέον, τα πήλινα πιθάρια ήταν ριγμένα και πωματισμένα, καθιστώντας ένα πολύ πιο υγιεινό περιβάλλον κατάλληλο για την αποθήκευση του οίνου, το οποίο αντικαταστάθηκε από την παλαίωση σε φελλοποιημένες γυάλινες φιάλες μόνο μετά τον 18ο αιώνα μ.Χ. (Harutyunyan & Malfeito-Ferreira, 2022a). Επιπλέον, τα βαρέλια ήταν πολύ πιο επιρρεπή σε μικροβιακή αλλοίωση λόγω της πορώδους φύσης τους, γεγονός που αναγνωρίζεται ακόμη και σήμερα (Carpena et al., 2020). Τα προβλήματα με τις μολύνσεις των βαρελιών θα μπορούσαν να έχουν αντισταθμιστεί με την καλύτερη προσαρμογή στη μεταφορά του οίνου. Ωστόσο, είναι πιθανές και άλλες εξηγήσεις, όπως η απώλεια της γευστικής τελειοποίησης μετά την πτώση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας (27 π.Χ.-476 μ.Χ.) (Dodd, 2020).

1.2 Φυσική Παλαίωση

Η παλαίωση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη διατήρηση του οίνου και άλλων ποτών αλλά και για την ενίσχυση των ιδιοτήτων τους. Πρόκειται για μια διαδικασία με μεγάλο ενδιαφέρον, κυρίως λόγω των πρόσθετων ιδιοτήτων που προσδίδει στους οίνους και λόγω των οικονομικών της επιπτώσεων (Carpena et al., 2020). Στον σημερινό κόσμο του οίνου, είναι σχεδόν αδιανόητο για πολλούς επαγγελματίες να έχουν οίνο υψηλών προδιαγραφών χωρίς παλαίωση σε δρύινα βαρέλια. Ο σκοπός είναι να επιταχυνθεί η διαδικασία παλαίωσης και να εξασφαλιστούν ελκυστικές γλυκές γεύσεις και απαλή αίσθηση στο στόμα (Harutyunyan & Malfeito-Ferreira, 2022a). Συγκεκριμένα, καθώς ο οίνος παλαιώνει, συμβαίνουν αλλαγές που προέρχονται από τις μεταβολές των αλκοολών, των εστέρων, των πτητικών οξέων και των αλδεϋδών στους οίνους, μέσω της παλαίωσης των οίνων, με συμβατικές και με τεχνητές μεθόδους (Chang, 2003).

Ο όρος "παλαίωση οίνων" περιλαμβάνει μια ομάδα αντιδράσεων που συμβαίνουν μετά την εμφιάλωση των οίνων. Η "ωρίμανση του οίνου" σχετίζεται με τα στάδια της αποθήκευσης του οίνου πριν από την εμφιάλωση. Η ωρίμανση του οίνου μπορεί να διαρκέσει από 6 μήνες έως και πολλά χρόνια. Σε αυτό το στάδιο, μπορεί να εφαρμοστεί η διαύγαση, λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα ότι ο οίνος θα υποστεί μηλογαλακτική ζύμωση. Η διαδικασία παλαίωσης των οίνων αρχίζει με την εμφιάλωση του οίνου και αναφέρεται επίσης ως αναγωγική παλαίωση (Yildirim & Dündar, 2017). Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία οξειδωτικής παλαίωσης, ο οίνος τοποθετείται σε γυάλινες φιάλες διαφορετικού όγκου. Η αναλογία όγκου δοχείου/οίνου είναι σημαντική, καθώς συμβάλλει στη διαμόρφωση της αντίστασης στην οξείδωση, καθώς και της διαθέσιμης αέριας φάσης στο κεφαλοδιάστημα της φιάλης. Υπό τις ίδιες συνθήκες και τον ίδιο χρόνο αποθήκευσης, οι Echave et al., 2021 παρατήρησαν εκτεταμένη οξείδωση σε φιάλες των 0,375 L σε σχέση με τις φιάλες των 0,75 L. Παρόλο που ο οίνος μπορεί να αποθηκευτεί σε πλαστικές φιάλες ή σε περιέκτες από πλαστικό/χαρτόνι, το γυαλί παραμένει το κύριο υλικό συσκευασίας που χρησιμοποιείται. Καθώς η μικρο οξυγόνωση μέσω του γυαλιού είναι αμελητέα, θεωρείται ότι η διέλευση του οξυγόνου είναι δυνατή κυρίως μέσω του πώματος. Υπό αυτή την έννοια, το πώμα επιλογής μπορεί να κάνει τη διαφορά στη μεταφορά οξυγόνου στον εμφιαλωμένο οίνο, καθώς το πορώδες του υλικού που χρησιμοποιείται επηρεάζει άμεσα την παράμετρο αυτή. Καθώς το πώμα είναι γενικά αεριοπορώδες, λειτουργεί ως διαπερατό φράγμα για διάφορα αέρια, όπως οι ατμοί αλκοόλης ή νερού από τον οίνο που μπορεί να διαχέονται από τη φιάλη (Echave et al., 2021). Κατά τη διάρκεια της παλαίωσης των οίνων λαμβάνουν χώρα πολλές αντιδράσεις που προκαλούν σημαντικές οργανοληπτικές αλλαγές στους οίνους (Yildirim & Dündar, 2017). Στην περίπτωση της παρασκευής ξηρών λευκών οίνων, η οξείδωση έχει καταστεί μείζον θέμα με την εμφάνιση πρόωρης οξείδωσης ή μη τυπικής παλαίωσης. Πρόκειται για ένα φαινόμενο που μπορεί να παρατηρηθεί σε ορισμένους πρόσφατα εμφιαλωμένους οίνους, οι οποίοι υποτίθεται ότι πρέπει να παλαιώσουν για χρόνια προτού φτάσουν στο βέλτιστο οργανοληπτικό επίπεδο, αλλά στην πραγματικότητα παρουσιάζουν χρώματα και αρώματα παλαιών οίνων (Roullier-Gall et al., 2016).

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ωρίμανσης και παλαίωσης, η πιο εμφανής μεταβολή εμφανίζεται στο χρώμα του οίνου που αναφέρεται στις μεταβολές των φαινολών. Οι φαινολικές ενώσεις που υπάρχουν στους οίνους χωρίζονται σε δύο ομάδες, τα φλαβονοειδή και τις φαινολικές ενώσεις εκτός των φλαβονοειδών. Οι φαινολικές ενώσεις που περιέχουν στη

δομή τους μια ομάδα υδροξυλίου (-OH) συνδεδεμένη με ένα δακτύλιο βενζολίου υπάρχουν στα κύτταρα που αποτελούν μέρος του σταφυλιού, όπως το φλοιό, ο πυρήνας και το βλαστό. Τα φλαβονοειδή έχουν δομή διφαινυλοπροπανίου C6-C3-C6 και η τριπλή γέφυρα άνθρακα μεταξύ των φαινυλομάδων σχηματίζει ένα δακτύλιο με οξυγόνο (Cuyckens & Claeys, 2004). Οι διαφορές μεταξύ των φλαβονοειδών οφείλονται στον αριθμό των προσδεμένων υδροξυλομάδων, στο βαθμό ακόρεστου και στο επίπεδο οξείδωσης του τριπλού τμήματος άνθρακα. Οι μεταβολές που συμβαίνουν στις φαινόλες στους οίνους κατά τη διάρκεια και μετά την παραγωγή πραγματοποιούνται με τους ακόλουθους μηχανισμούς :

1. Η καταστροφή των ανθοκυανών,
2. Αντιδράσεις των τανινών με τις πρωτεΐνες και ταννινών με πολυσακχαρίτες,
3. Σχηματισμός κατιόντων των προκυανιδινών,
4. Αντιδράσεις οξείδωσης των προκυανιδινών,
5. Αντιδράσεις πολυμερισμού των προκυανιδινών,
6. Διαδικασίες συν-χρωματισμού των ανθοκυανινών,
7. Αντίδραση των ανθοκυανινών με ενώσεις που περιέχουν πολωμένους διπλούς δεσμούς,
8. Αντιδράσεις συμπύκνωσης των ανθοκυανών με τανίνες (Roullier-Gall et al., 2016)

Η κατάλληλη αποθήκευση, όσον αφορά την κατάλληλη θερμοκρασία, την υγρασία, τη συσκευασία, την ποσότητα οξυγόνου, την απουσία φωτός κ.λπ. βοηθά τον οίνο να εξελιχθεί όπως επιθυμεί, λόγω της εξαφάνισης μεγάλου μέρους της πικράδας, της στυπτικότητας και της σκληρότητας (Arapitsas et al., 2014) Σήμερα, τα δρύινα βαρέλια χρησιμοποιούνται για την παλαίωση του οίνου. Η οξείδωση που λαμβάνει χώρα σε μικρή ποσότητα με την πάροδο του χρόνου στο βαρέλι, επιτρέπει στον οίνο να παράγει μια ποικιλία μοναδικών αρωμάτων στο στάδιο της παλαίωσης (Yildirim & Dündar, 2017). Η εξέλιξη αυτή αποδίδεται στις χημικές αντιδράσεις των φαινολικών ενώσεων, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό νέων έγχρωμων και άχρωμων ολιγομερών και πολυμερών ενώσεων που προκαλούν αλλαγές στην αισθητηριακή απόκριση. Οι μικρές ποσότητες οξυγόνου που υπάρχουν στον οίνο μετά την εμφιάλωση και εισέρχονται μέσω του φελλού κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης επηρεάζουν επίσης τις φυσικές και χημικές αλλαγές που λαμβάνουν χώρα στον οίνο. Η θερμοκρασία επηρεάζει ιδιαίτερα αυτό, επιταχύνοντας τις αλλαγές, ωστόσο πρέπει να είμαστε προσεκτικοί, καθώς κάθε αντίδραση επιταχύνεται με διαφορετικό ρυθμό με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η επιτάχυνση της παλαίωσης σε υψηλή θερμοκρασία πιθανόν να οδηγήσει σε έναν μη ισορροπημένο οίνο (Arapitsas et al., 2014).

Εκτός από την παλαίωση του οίνου πραγματοποιείται παλαίωση και σε άλλα αλκοολούχα ποτά όπως το ουίσκι όπου μετά τη ζύμωση και την απόσταξη, το ουίσκι αποθηκεύεται σε δρύινα βαρέλια για αρκετά χρόνια έως μερικές δεκάδες χρόνια. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παλαίωσης σε δρύινα βαρέλια, τα άχρωμα αποστάγματα μετατρέπονται σε κεχριμπαρένια αποστάγματα και η έντονη ή ακατέργαστη οσμή που χαρακτηρίζει τα φρέσκα αποστάγματα ουίσκι τροποποιείται σε ένα στρογγυλεμένο, μαλακό και απαλό άρωμα. Διάφορες ενώσεις, όπως αρώματα και πολυφαινόλες της δρυός, εκχυλίζονται από το ουίσκι, ενώ το νερό ή οι δυσάρεστες οσμές εξέρχονται από τα βαρέλια μέσω των σανίδων (Aoshima et al., 2009).

Επιπλέον, η διαδικασία παλαίωσης είναι ένα κρίσιμο βήμα που εισάγει ελκυστικές οργανοληπτικές ιδιότητες που βελτιώνουν την αγοραστική αξία και ενός αποσταγμένου ποτού. Τα νωπά αποστάγματα παλαιώνονται ιστορικά για χρόνια ή και δεκαετίες σε δοχείο για να

υποστούν περίπλοκες φυσικές και χημικές αλληλεπιδράσεις που έχουν ως αποτέλεσμα την εισαγωγή ώριμων οργανοληπτικών ιδιοτήτων. Τα αρώματα των ωριμασμένων αποσταγμένων ποτών διαπλέκονται με έναν οικείο, πολυεπίπεδο, συγκρατημένο και πολύπλοκο τρόπο, εκφράζοντας το άρωμα των μπουκέτων γήρανσης, το οποίο επιδιώκουν οι λάτρεις των ποτών. Επιπλέον, η ανάπτυξη του χρώματος και της αίσθησης του στόματος προωθεί ελκυστικά και μεστά χαρακτηριστικά και μειώνει τον βαθμό του αλκοολικού ερεθισμού. Ο μεγαλύτερος χρόνος παλαίωσης για τα αποσταγμένα ποτά παράγει καλύτερες οργανοληπτικές ιδιότητες, ενισχύοντας έτσι την εκτίμηση των καταναλωτών (Wang et al., 2023). Τα αποσταγμένα οιοπνευματώδη ποτά έχουν υψηλή συγκέντρωση αιθανόλης και πολλών πτητικών ενώσεων, αλλά δεν περιέχουν άλλες φαινολικές ενώσεις εκτός από τις πτητικές φαινόλες. Επομένως, απαιτείται μια περίοδος παλαίωσης στο ξύλινο βαρέλι για να επιτευχθεί η αισθητηριακή πληρότητα και η υψηλή ποιότητα (Canas, 2017).

Η παλαίωση στο ξύλο είναι μια παλιά παράδοση που σήμερα προσελκύει και την προσοχή των ζυθοποιών που αναζητούν νέα, καινοτόμα προϊόντα. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται συχνά ως προσπάθεια αναπαραγωγής των αρχικών εκδόσεων των μπυρών. Ωστόσο, χρησιμοποιείται κυρίως για την απόκτηση ενός ευρέος φάσματος αρωμάτων και γεύσεων που προέρχονται από το ξύλο. Κατά την παλαίωση σε βαρέλια, οι ενώσεις που εξάγονται από το ξύλο επηρεάζουν επιπλέον το χρώμα, βελτιώνουν τις ιδιότητες του ποτού και επιταχύνουν την παλαίωση της μπύρας. Η παραγωγή αυτών των δεξαμενών είναι πολύ ακριβή και η παλαίωση απαιτεί μεγάλα χρονικά διαστήματα. Μια πιο προσιτή και οικονομικά αποδοτική εναλλακτική λύση στη χρήση δρύινων βαρελιών είναι η χρήση θραυσμάτων ξύλου δρυός, κοινώς γνωστών ως chips. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα χρήσης ολόκληρης της επιφάνειας του ξύλου, σε σύγκριση με το 40% μόνο της επιφάνειας στο εσωτερικό ενός βαρελιού (Cioch-Skoneczny et al., 2023), (Carpena et al., 2020).

1.3 Σκοπός Παλαίωσης

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παλαίωσης λαμβάνει χώρα μια σειρά αντιδράσεων που έχουν ως αποτέλεσμα αλλαγές στη χημική σύνθεση και τις οργανοληπτικές ιδιότητες. Αυτές οι αλλαγές θα οδηγήσουν σε τροποποιήσεις στην τελική ποιότητα του προϊόντος, λόγω του σύνθετου αρώματος από το ξύλο, της αύξησης της σταθερότητας και της διάλυσης (Carpene et al., 2020). Η διαδικασία παλαίωσης του οίνου διατηρεί και μεγεθύνει τις ιδιότητες του οίνου. Για το σκοπό αυτό, η χρήση δρύινων βαρελιών είναι αυτή που δημιουργεί χημικές αντιδράσεις οι οποίες οδηγούν στη βελτίωση του αρώματος, της γεύσης, της σταθερότητας και της διαύγειας (Ma et al., 2022). Ο οίνος υφίσταται συνεχώς αλλαγές και, ως εκ τούτου, βιώνει μια διαδικασία ανάπτυξης, εξέλιξης, κορύφωσης, γήρανσης και θανάτου. Σε γενικές γραμμές, ο νεαρός οίνος αμέσως μετά τη ζύμωση είναι τραχύς και ξινός και το σώμα είναι θολό με κακή σταθερότητα. Ο νεαρός οίνος απαιτεί μια ορισμένη περίοδο αποθήκευσης για να μπορέσουν να συμβούν οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, εστεροποίησης, συμπύκνωσης, πολυμερισμού και άλλες αντιδράσεις που δίνουν στον οίνο έναν εντελώς διαφορετικό οργανοληπτικό χαρακτήρα (Ma et al., 2022).

Η διαδικασία παλαίωσης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του οίνου την προέλευση των σταφυλιών, την ηλικία του οίνου κλπ. Όσον αφορά τους ερυθρούς οίνους, η παλαίωση διαμορφώνεται από δύο διακριτά στάδια: τη φάση του ξύλου (οξειδωτική) και τη φάση της φιάλης (αναγωγική). Οι λευκοί οίνοι μπορούν επίσης να παλαιωθούν, αλλά για πολλά χρόνια θεωρούνταν ότι η διαδικασία αυτή δεν ήταν κατάλληλη, διότι οι λευκοί επιτραπέζιοι οίνοι υφίστανται μείωση της ποιότητάς τους, καθώς το ξύλο καλύπτει τα συστατικά του λευκού οίνου και συμβάλει σε οξειδωτικές διεργασίες (Gonen et al., 2021). Ωστόσο, η χρήση του ξύλου για την παραγωγή και την παλαίωση λευκών οίνων αποτελεί επίσης μια τάση στη σύγχρονη αγορά οίνου για την παραγωγή οίνων με γεμάτο σώμα ή ενισχυμένων οίνων με πιο σύνθετο άρωμα, λόγω των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από πρόσφατες μελέτες, όπου οι οξειδωτικές διεργασίες δεν αποτελούν πρόβλημα. Η διαδικασία αυτή έχει εφαρμοστεί μέσω της τεχνικής "bâtonnage", γνωστής και ως λιγότερη ανάδευση, ως τρόπος εξαγωγής γεύσης, αρώματος και υφής στους λευκούς οίνους (González-Centeno et al., 2020).

Ο τύπος του ξύλου του βαρελιού είναι πολύ σημαντικός, καθώς στο εσωτερικό του, ο οίνος οξειδώνεται. Τα βαρέλια επιτρέπουν τη διέλευση μόνο μιας πολύ μικρής ποσότητας οξυγόνου, μια διαδικασία γνωστή ως οξυγόνωση (del Alamo-Sanza & Nevares, 2018). Ταυτόχρονα, στο βαρέλι λαμβάνουν χώρα διάφορες χημικές αντιδράσεις, με διάφορες φαινολικές ενώσεις να περνούν από το ξύλο στον οίνο και αντίστροφα. Οι κυριότερες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την παλαίωση είναι η συμπύκνωση των ανθοκυανών και των τανινών, η οξείδωση και η απελευθέρωση μορίων από το ξύλο στον οίνο (φαινολικές και αρωματικές ενώσεις). Όλες αυτές οι ενώσεις συνδυάζονται με τα αρωματικά τερπενοειδή και τις πολυφαινόλες που υπάρχουν ήδη στον οίνο και δημιουργούν μια πολύπλοκη γεύση και άρωμα. Οι αντιδράσεις αυτές συμβάλλουν στη διάλυση του οίνου, τροποποιούν τη στυπτικότητα και δημιουργούν ένα τρίτο άρωμα ως αποτέλεσμα της ύπαρξης και της αλληλεπίδρασης όλων των αρωματικών ενώσεων που υπάρχουν στο τέλος της περιόδου παλαίωσης (Carpene et al., 2020). Μέσω της παλαίωσης σε δρύινα βαρέλια, η δρυς μπορεί να προσθέσει καπνό, φρυγανιές, καφέ, δέρματα ζώων, ρητίνη πεύκου, μαύρο πιπέρι, μέντα, τριαντάφυλλο, χαρούπι, φλαμούρι, σταφύλι, βατόμουρο, κεράσι, φράουλα, ρόδι, μήλο, αγλάδι και μπανάνα, καθώς και να μαλακώσει,

οδηγώντας σε πιο ισορροπημένα και αρμονικά αρώματα οίνου (Ma et al., 2022). Ανάλογα με το χρονικό διάστημα παραμονής του οίνου στο βαρέλι (3-24 μήνες), διακρίνονται τρεις τύποι, από τον λιγότερο στον περισσότερο πολύτιμο, τον «reserve» και τον «grand reserve». Ωστόσο, ο όρος «Reserve» υπόκειται σε εθνικούς κανονισμούς και σε ορισμένες χώρες μπορεί να μην συνδέεται με περίοδο παλαίωσης σε βαρέλι (Carpena et al., 2020).

Η αξιολόγηση και ο χαρακτηρισμός του αρώματος κατά τη διαδικασία παλαίωσης των αποσταγμένων ποτών ήταν επίσης πάντα ένα δημοφιλές θέμα στον τομέα της έρευνας τροφίμων. Η αγοραστική αξία του αποσταγμένου ποτού βασίζεται στην ποιότητά του με σημαντική συμβολή των χαρακτηριστικών και συναρπαστικών αρωμάτων. Το άρωμα του αποσταγμένου ποτού οικοδομείται με βάση χημικά συστατικά και μπορεί να τροποποιηθεί μέσω μιας σειράς φυσικών και χημικών διεργασιών, όπως η παλαίωση. Η αποκάλυψη της κρυμμένης γνώσης που κρύβεται πίσω από την εξέλιξη πολυάριθμων χημικών ενώσεων κατά τη διαδικασία αυτών των φυσικοχημικών διεργασιών στα αποσταγμένα ποτά δεν είναι μόνο κρίσιμη αλλά αποτελεί και πρόκληση λόγω του περίπλοκου συστήματός τους (Wang et al., 2023). Η παλαίωση, γνωστή και ως ωρίμανση, είναι ένας από τους πιο σημαντικούς και δαπανηρούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των αποσταγμένων ποτών, όπως το κονιάκ, το ουίσκι, το μπράντι και το καλβαντός. Αν και αρχικά χρησίμευε πιθανώς μόνο ως μέσο αποθήκευσης και μεταφοράς, ο χρόνος που περνά σε δρύινο βαρέλι θεωρείται πλέον θεμελιώδης για την τελική γεύση και το άρωμα. Κατά τη διάρκεια της ωρίμανσης, τα αλκοολούχα ποτά αναπτύσσουν ένα ιδιαίτερο άρωμα και γεύση που εκτιμούν οι καταναλωτές. Η ωρίμανση δεν βελτιώνει μόνο τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των αποσταγμένων ποτών, αλλά προκαλεί επίσης αλλαγές στην περιεκτικότητα σε ολικές πολυφαινόλες, καθώς και την ανάπτυξη άλλων σημαντικών ιδιοτήτων για την υγεία, όπως η αυξημένη αντιοξειδωτική ικανότητα (Balcerek et al., 2017).

Ως εκ τούτου, η παλαίωση είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιείται ευρέως στην οινολογία και την ποτοποιία για να προσδώσει προστιθέμενη αξία στον οίνο και τα ποτά (Carpena et al., 2020).

1.4 Διαδικασία φυσικής παλαίωσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παραδοσιακή παλαίωση σε δρύινα βαρέλια βελτιώνει την ποιότητα του οίνου πολυποίκιλα. Η παλαίωση σε δρύινα βαρέλια περιλαμβάνει τρεις τύπους, την ωρίμανση σε δρύινο βαρέλι, την επαφή με δρύινο βαρέλι και την παλαίωση για μεγάλο χρονικό διάστημα σε δρύινα βαρέλια. Η ωρίμανση σε δρύινο βαρέλι είναι η μέθοδος παραδοσιακής παλαίωσης των οίνων στον κατάλληλο χρόνο και εφαρμόζεται στη συντριπτική πλειονότητα των οίνων. Ο όρος σε επαφή με δρυ αναφέρεται στην εφαρμογή ορισμένων προϊόντων δρυός στον οίνο. Η παλαίωση σε δρύινα βαρέλια αφορά κυρίως ορισμένες ειδικές ποικιλίες οίνων (Ma et al., 2022). Οι δύο παράγοντες που είναι θεμελιώδεις στη διαδικασία παλαίωσης είναι ο χρόνος παλαίωσης και η ποιότητα του ξύλου του βαρελιού. Η διαδικασία παλαίωσης ποικίλλει επίσης ανάλογα με το είδος του οίνου. Όσον αφορά τους ερυθρούς οίνους, η παλαίωση διαμορφώνεται από δύο διακριτά στάδια: τη φάση του ξύλου (οξειδωτική) και τη φάση της φιάλης (αναγωγική) όπως προαναφέρθηκε (Carpena et al., 2020).

Κατά την παραδοσιακή παλαίωση στην οξειδωτική φάση, πρώτον, λαμβάνει χώρα η λειτουργία της διαύγασης και του εξαερισμού. Καθώς ο όγκος του δρύινου βαρελιού είναι συνήθως μικρός και η υψηλή ειδική επιφάνεια και το τοίχωμα του βαρελιού είναι αναπνεύσιμο, η χρήση του δρύινου βαρελιού ωφελεί την αυτόματη διαύγαση και την απομάκρυνση του αερίου διοξειδίου του άνθρακα από τους φρεσκοζυμωμένους οίνους. Με παρατεταμένο χρόνο παλαίωσης και μεταβαλλόμενη θερμοκρασία, τα τρυγικά άλατα αρχίζουν να διαχωρίζονται και να καθιζάνουν και η ζύμη αρχίζει να υφίσταται αυτόλυση και να απελευθερώνει πολυσακχαρίτη της ζύμης (Coelho et al., 2019). Επιπλέον, το ξύλο της δρυός αρχίζει να διασπάται και η σταθερότητα και η γεύση των φρεσκοζυμωμένων οίνων βελτιώνονται (Gonen et al., 2021).

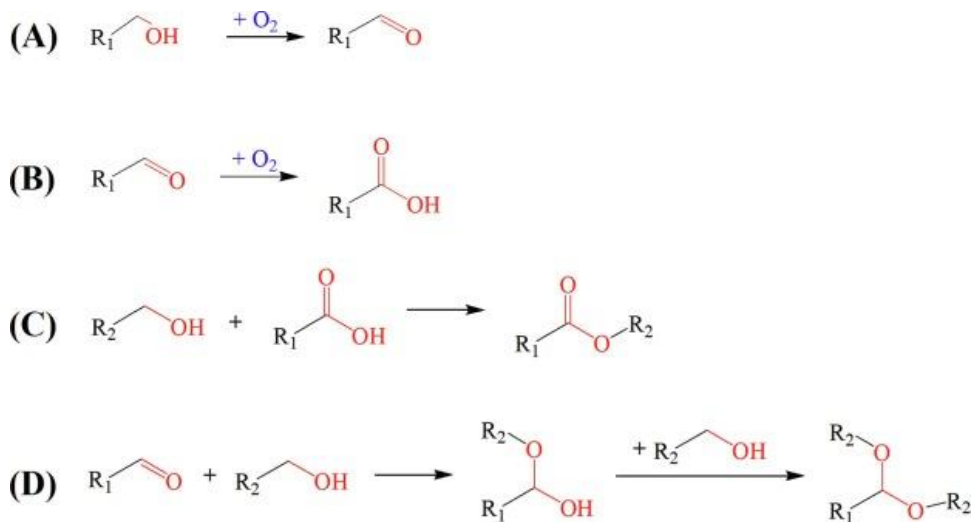
Σε δεύτερη φάση, πραγματοποιείται η εκχύλιση από την δρυ. Τα νέα συστατικά που παρέχονται από το δρύινο βαρέλι κάνουν τον οίνο να αλλάζει σημαντικά. Κατά τη διάρκεια της φυσικής παλαίωσης, πολλά συστατικά από τη δρυ παρουσιάζουν εμφανώς διαφορετικές δομές σε σύγκριση με τα συστατικά από τα σταφύλια, όπως η λακτόνη της δρυός (λακτόνη του ούισκι), η ευγενόλη, η βανιλική αλδεΐδη και άλλες ενώσεις γλυκολαλδεΐδη (Canas et al., 2019).

Σε τρίτη φάση, λαμβάνουν χώρα η ελεγχόμενη οξείδωση, η εστεροποίηση, η συμπύκνωση, ο πολυμερισμός και άλλες αντιδράσεις σε συνθήκες μικρο-οξυγόνου. Λόγω της αναπνοής του τοιχώματος του βαρελιού, το οξυγόνο εισέρχεται αρχικά με αργούς ρυθμούς και συνεχώς στον οίνο, διατηρώντας την περιεκτικότητα σε διαλυμένο οξυγόνο στον οίνο στα 0,1-0,5 mg /L και το δυναμικό οξείδωσης-αναγωγής στα 150-250 mV (Canas et al., 2019). Επιπλέον, κατά τη διάρκεια αλλαγής βαρελιών, ο οίνος βρίσκεται επίσης σε πλήρη επαφή με το εξωτερικό οξυγόνο. Λόγω του μακροχρόνιου αργά διαλυόμενου περιβάλλοντος οξυγόνου και των καινούργιων συστατικών που παρέχονται από το βαρέλι στους οίνους, μια σειρά από χρονοβόρες και σύνθετες φυσικοχημικές διεργασίες συμβαίνουν μεταξύ των αρχικών συστατικών του οίνου και των καινούργιων από το δρύινο βαρέλι, ως εξής:

(1) Αντίδραση οξείδωσης. Σε αυτές εντάσσονται η οξείδωση των αλκοολών σε αλδεΐδες ($\text{RCH}_2\text{OH} \rightarrow \text{RCHO}$) και η οξείδωση των αλδεϊδών σε οξέα ($\text{RCHO} \rightarrow \text{RCOOH}$) (Ma et al., 2022).

(2) Αντίδραση εστεροποίησης. Τα οξέα και οι αλκοόλες, ιδίως η αιθανόλη, μπορούν να αντιδρούν συνεχώς και με αργό ρυθμό προς τον σχηματισμό εστέρων κατά τη διαδικασία ολόκληρης της παλαίωσης του οίνου ($R'OH + RCOOH \rightarrow RCOOR'$) (Ma et al., 2022).

(3) Αντίδραση πολυμερισμού. Κατά τη διαδικασία της παλαίωσης σε δρύινα βαρέλια, οι πολυσακχαρίτες, οι πολυφαινόλες, οι ανθοκυανίνες, οι πρωτεΐνες και οι τανίνες στους οίνους ενώνονται μεταξύ τους μέσω πολυμερισμού. Για παράδειγμα, οι αλκοόλες και οι αλδεΐδες μπορούν να ενωθούν δημιουργώντας ακετάλη ($R'OH + RCHO \rightarrow RCHOR'$) (Ma et al., 2022). Επιπλέον, οι ανθοκυανίνες μπορούν εύκολα να αντιδράσουν με p-βινυλοφαινόλη, ακεταλδεΐδη ή πυρουβικό οξύ και να δημιουργήσουν νέες πυρανοανθοκυανίνες με ομάδες υδροξυλίου (Zhang et al., 2015). Αυτό συμβάλλει στην πορτοκαλί απόχρωση του οίνου. Οι ανθοκυανίνες μπορούν επίσης να αντιδράσουν με τις φλαβανόλες για να σχηματίσουν πολυανθοκυανίνες. Αυτές οι παραγόμενες ενώσεις συσσωρεύονται σταδιακά κατά τη διαδικασία της παλαίωσης του οίνου και γίνονται οι κύριες χρωματικές ουσίες του οίνου, επιτρέποντας στον ερυθρό οίνο να παρουσιάζει καλύτερες και σταθερότερες χρωματικές ιδιότητες, έχοντας καλύτερες χρωματικές παραμέτρους (Zhang et al., 2017).



Εικόνα 1 : Οι αντιδράσεις έγιναν σε συνθήκες μικρο-οξυγόνωσης. (A) οι αλκοόλες οξειδώνονται σε αλδεΐδες (B) οι αλδεΐδες οξειδώνονται σε οξέα (C) αντίδραση εστεροποίησης (D) αντίδραση πολυμερισμού των αλκοολών και των αλδεϊδών θα μπορούσαν να συμπυκνωθούν σε ακετάλη.

Συνεπώς, λόγω αυτών των αντιδράσεων κατά την παλαίωσης σε δρύινο βαρέλι, οι φαινόλες, οι αλκοόλες, οι αλδεΐδες, τα οξέα και οι εστέρες φτάνουν τελικά σε μια νέα ισορροπία στον οίνο, βελτιώνοντας το χρώμα και τη γεύση, ενισχύουν το άρωμα και καθιστούν το σώμα του οίνου πιο μαλακό, απαλό και πολύπλοκο. Οι αντιδράσεις αυτές αλλάζουν επίσης τη βιολογική δραστηριότητα των οίνων και οδηγούν συλλογικά στην "κορύφωση του οίνου" ή στην ωριμότητα του οίνου (Ma et al., 2022).

Εκτός από αυτό, η διαφορετική προέλευση των δρύινων βαρελιών είχε επίσης σημαντική επίδραση στην παλαίωση, κυρίως λόγω της διαφορετικής υλικής σύνθεσης των δρύινων βαρελιών και της διαφορετικής διαπερατότητας του οξυγόνου (Gonen et al., 2021). Όπως προαναφέρθηκε, η μεταφορά οξυγόνου αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για τη γήρανση. Στο στάδιο της οξειδωτικής παλαίωσης, το άρωμα γίνεται πιο πολύπλοκο ή/και έντονο λόγω της απελευθέρωσης διαφόρων ενώσεων από το ξύλο. Μεταξύ των ενώσεων που απελευθερώνονται, ορισμένες από αυτές είναι υπεύθυνες για τις μεταβολές της υφής και της

στυπτικότητα, όπως η ελλαγιταννίνες. Στη φάση αυτή, το χρώμα σταθεροποιείται επίσης λόγω των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των ανθοκυανίνων και των προανθοκυανίνων (Carpena et al., 2020), (Gonen et al., 2021).

Η αύξηση της σταθερότητας του χρώματος οφείλεται κυρίως στην είσοδο μικρών ποσοτήτων αέρα μέσω των πόρων του ξύλου και του καπακιού του βαρελιού, καθιστώντας δυνατή μια φυσική μικρο-οξυγόνωση που βελτιώνει τις αντιδράσεις πολυμερισμού και συμπύκνωσης μεταξύ των φλαβονοειδών ενώσεων και επηρεάζει άμεσα το χρώμα και τη στυπτικότητα του οίνου, τροποποιώντας τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά τους. Ωστόσο, η φαινολική σύνθεση των οίνων (και, επομένως, το χρώμα τους) σε δρύινα βαρέλια μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια των διαδικασιών οξειδωσης και με την ενσωμάτωση παράγωγων φαινολικών ουσιών που εξάγονται από το ξύλο, όπως το γαλλικό οξύ, το συριγγικό οξύ, το βανιλικό οξύ, το φερουλικό οξύ, το ελλαγικό οξύ και το ελλαγιταννίνες, τα οποία παρέχουν επιθυμητούς συμπαραγόντες για τις διαδικασίες συν-χρωματισμού με τις ανθοκυανίνες (Nunes et al., 2017). Το αποτέλεσμα αυτό μεταβάλλεται συνεχώς και εξαρτάται από το βαρέλι που χρησιμοποιείται. Για παράδειγμα, οι λευκοί οίνοι έχουν μια τάση για μικρότερη αύξηση των τιμών του δείκτη δυναμικού μαυρίσματος σε νέα βαρέλια από ξύλο δρυός, καθώς το μαύρισμα αποτελεί σοβαρό πρόβλημα για τους λευκούς οίνους (Carpena et al., 2020). Αυτό οφείλεται στην υψηλή περιεκτικότητά τους σε φαινολικές ενώσεις καθώς μπορούν εύκολα να οξειδωθούν σε κινόνες και να πολυμεριστούν σχηματίζοντας μακρομόρια με κίτρινη-καφέ απόχρωση. Επιπλέον, οι ενώσεις που προέρχονται από το ξύλο, όπως η ελλαγιταννίνες και το ελλαγικό οξύ, απορροφούν ταχύτερα το οξυγόνο, διευκολύνοντας την υδροϋπεροξειδωση των συστατικών του οίνου και δρώντας έτσι ως προστατευτικοί παράγοντες έναντι των χρωματικών αλλαγών που συνδέονται ιδιαίτερα με τη διαδικασία μαυρίσματος (Gonen et al., 2021). Επιπρόσθετα, κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου, λαμβάνει χώρα και μια σειρά από διεργασίες που είναι κοινές για όλους τους οίνους (ακόμη και αν δεν έχουν παλαιωθεί σε βαρέλια), όπως η καθίζηση των κατακρημνισμένων ενώσεων που υπάρχουν στον οίνο, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη διαύγαση του οίνου και, επομένως, τη μείωση του βαθμού θολερότητας (Nunes et al., 2017). Σε αυτή την τελευταία φάση, ο οίνος εμφιαλώνεται. Αυτή η δεύτερη φάση πραγματοποιείται σε αεροστεγή δοχεία που εμποδίζουν την είσοδο οξυγόνου. Ως εκ τούτου, οι κύριες αλλαγές οφείλονται στο βαθμό έκθεσης του οξυγόνου στη φιάλη. Σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι απαραίτητη μια προηγούμενη διαδικασία διαύγασης και η εμφιάλωση πρέπει να πραγματοποιείται σε δοχεία ικανά να προστατεύουν τα PC (ιδίως τα υδροξυκινναμωμικά οξέα) και τις χρωστικές ουσίες από το φως (Salacha et al., 2008). Σε αυτό το στάδιο, η σταθερότητα του εμφιαλωμένου οίνου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η θερμοκρασία αποθήκευσης (μεταβλητή, σταθερή και ψυχρή), η θέση της φιάλης (οριζόντια ή κάθετη), ο χρόνος αποθήκευσης (3, 6, 9 και 12 μήνες) και η ποικιλία. Επιπλέον, οι αλλαγές που παράγονται κατά τη διάρκεια της αναγωγικής φάσης στη φιάλη εξαρτώνται από τις συνθήκες της προηγούμενης φάσης δηλαδή της οξειδωτικής (Hernanz et al., 2009).

1.5 Οφέλη παλαίωσης

Η φυσική παλαίωση βελτιώνει την ποιότητα του οίνου με δύο τρόπους. Πρώτον, τα δρύινα βαρέλια έχουν καλή διαπερατότητα- ως εκ τούτου, τα ίχνη οξυγόνου μπορούν να εισέλθουν στην αγγειακή δέσμη της δρυός και στις ρωγμές μεταξύ των σανίδων αργά και σταθερά, προκαλώντας αργή και συνεχή οξείδωση του οίνου και επιτρέποντας τη βελτίωση του χρώματος και της γεύσης του. Δεύτερον, οι τανίνες, οι ενώσεις γλυκολαλδεϋδης, η γουαϊακόλη, η δρύινη λακτόνη και η δρύινη ευγενόλη διαλύονται στους οίνους, βελτιώνοντας το άρωμα και τη γεύση, άρα φτάνοντας στο χρόνο κορύφωσης του οίνου ή στην ωριμότητα του οίνου (Ma et al., 2022), (Gonen et al., 2021).

Ιστορικά, τα βαρέλια χρησιμοποιούνται εδώ και αιώνες για τη συντήρηση και την παλαίωση των οίνων λόγω της ανθεκτικότητας και της σχετικής στεγανότητάς τους. Σε γενικές γραμμές, η διαδικασία παλαίωσης των οίνων μπορεί να χωριστεί σε δύο φάσεις: την οξειδωτική και την αναγωγική παλαίωση. Η οξειδωτική παλαίωση πραγματοποιείται παραδοσιακά σε βαρέλια, ενώ η αναγωγική φάση λαμβάνει χώρα στη φιάλη. Κατά τη διάρκεια και των δύο διαδικασιών, το οξυγόνο παίζει θεμελιώδη ρόλο, καθώς και άλλοι παράγοντες, για παράδειγμα: θερμοκρασία, φως, θέση της φιάλης, ανάπτυξη μικροβίων και χρόνος αποθήκευσης (Carpena et al., 2020). Ομοίως, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παλαίωσης, λαμβάνει χώρα μια σειρά χημικών αντιδράσεων που επηρεάζουν τη σύνθεση και το οργανοληπτικό προφίλ του οίνου. Σε αυτό το σημείο, η οξειδωτική παλαίωση σε βαρέλια αποτελεί θεμελιώδες βήμα (Ma et al., 2022). Τα βαρέλια εμπλέκονται άμεσα στις παραγόμενες αλλαγές στη σύνθεση του οίνου λόγω της μεταφοράς οξυγόνου φαινολικών και αρωματικών ενώσεων από το ξύλο στον οίνο. Με αυτόν τον τρόπο, τα βαρέλια λειτουργούν ως ενεργό δοχείο ικανό να απελευθερώνει ενώσεις που επηρεάζουν και βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά του οίνου. Όσον αφορά τη σημασία των βαρελιών κατά τη διαδικασία παλαίωσης, πρέπει να δοθεί προσοχή στα είδη που χρησιμοποιούνται περισσότερο στη βαρελοποιία. Τα είδη αυτά είναι τα συμβατικά είδη δρυός, είτε γαλλικά είτε αμερικανικά. Παράλληλα, άλλα μη συμβατικά είδη μελετώνται επί του παρόντος ως πιθανές πηγές ξύλου για την παραγωγή οίνων, όπως η καστανιά ψευδοακακία ή άλλα είδη δρυός (Carpena et al., 2020).

Ωστόσο, οι οίνοι μπορούν να παλαιωθούν με παραδοσιακό τρόπο χρησιμοποιώντας άλλα υλικά διαφορετικά από το ξύλο, όπως τσιμέντο ή ατσάλι, αλλά αυτά δεν προτιμώνται τόσο πολύ, καθώς δεν προσδίδουν στα ποτά τα μοναδικά αρώματα που μεταφέρουν στα προϊόντα τα ξύλινα βαρέλια (Fernández De Simón et al., 2014). Η ανάπτυξη αυτών των εναλλακτικών υλικών οφείλεται κυρίως στην αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης για ξύλινα βαρέλια, ιδίως από δρυ, με στόχο την αναπαραγωγή των χημικών και φυσικών διεργασιών που υφίστανται οι οίνοι κατά την παλαίωσή τους σε βαρέλια. Η χρήση ξύλινων βαρελιών για την παλαίωση των οίνων συνεπάγεται μεγάλο χρονικό διάστημα (από 6 έως 18 μήνες σε βαρέλια) και υψηλό οικονομικό κόστος, γι' αυτό και έχουν διερευνηθεί διάφορες τεχνικές για την παραγωγή παρόμοιων προϊόντων (Martínez-Gil et al., 2018).

Η παλαίωση σε ξύλινο βαρέλι αυξάνει επίσης την πολυπλοκότητα του αρώματος λόγω της εκχύλισης των ενώσεων που υπάρχουν στο ξύλο. Οι ενώσεις αυτές περιλαμβάνουν κυτταρίνη,

ημικυτταρίνη, λιγνίνη, οξέα, σάκχαρα, τερπένια, πτητικές φαινόλες και λακτόνες, που είναι ενώσεις πολύ διαφορετικού μοριακού βάρους. (Fernández De Simón et al., 2014).

Από οργανοληπτική άποψη, οι σημαντικότερες ενώσεις είναι οι εξής: ενώσεις που παρέχουν άρωμα καρύδας και ξύλου (δρύνες λακτόνες, δηλαδή cis και trans μορφές των β-μεθυλ-γ-οκταλακτονών), καπνιστό άρωμα (γουαϊακόλη και 4-μεθυλγουαϊακόλη), πράσινο ξύλο (βανιλίνη), αμύδαλο (φουρφουραλικές ενώσεις) ή πικάντικα αρώματα (ευγενόλη). Μεταξύ αυτών των ενώσεων, οι δρύνες λακτόνες είναι από τις πιο σημαντικές για τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του οίνου μαζί με την ευγενόλη και τη βανιλίνη (Fernández De Simón et al., 2014). Στην πραγματικότητα, οι λακτόνες έχουν εντοπιστεί σε πολλά παλαιωμένα αλκοολούχα ποτά, όπως το μπράντι, το ουίσκι και τον οίνο, γι' αυτό και είναι κοινώς γνωστές ως λακτόνες "ουίσκι" ή "δρυς". Άλλες σημαντικές ενώσεις που απελευθερώνονται από το ξύλο είναι οι ελλαγιταννίνες, οι οποίες προστατεύουν τον οίνο από την οξειδωση λόγω των ισχυρών αντιοξειδωτικών ιδιοτήτων τους (Bozalongo et al., 2007). Επομένως, η ποιότητα των αλκοολούχων ποτών εξαρτάται από την ποιότητα του ξύλου. Το προφίλ των πτητικών αρωματικών ενώσεων προερχόμενων από την δρυ και των φαινολικών ενώσεων σε παλαιωμένο οίνο παρέχει πληροφορίες σχετικά με το είδος του ξύλου που χρησιμοποιήθηκε, το χρόνο παλαίωσης και το αν η παλαίωση έγινε σε βαρέλι ή με τη χρήση τεμαχίων (Fernández De Simón et al., 2014).

Ωστόσο, το ξύλο παρέχει και άλλες ενώσεις που παρουσιάζουν ενδιαφέρον και έχουν μελετηθεί λιγότερο, όπως η κυτταρίνη, η ημικυτταρίνη και η λιγνίνη. Συμμετέχουν σε διάφορες διεργασίες όπως η καρύκευση, η καύση ή το καβούρδισμα. Η καρύκευση και το καβούρδισμα προκαλούν γενικά μια απώλεια σε ελλαγιταννίνες και αρωματικές ενώσεις. Οι ημικυτταρίνες και η λιγνίνη φαίνεται να αποτελούν πηγές ενώσεων ενδιαφέροντος απελευθερώνοντας ελεύθερα σάκχαρα ή ακόμη και κάποιες πρόδρομες αρωματικές ουσίες, κυρίως κατά τη διάρκεια της παλαίωσης των αλκοολούχων ποτών από δρυ, ενώ η κυτταρίνη λόγω της κρυσταλλικής δομής της, υφίσταται μόνο λίγες χημικές αποικοδομήσεις ή τροποποιήσεις. Ωστόσο, το καβούρδισμα μπορεί να προκαλέσει αποικοδόμηση των ενώσεων που προέρχονται από την κυτταρίνη και, σε ορισμένες περιπτώσεις, να αυξήσει ακόμη και τη συγκέντρωση ορισμένων αρωματικών ενώσεων (αλδεΐδες και πτητικές φαινολικές ενώσεις ή λακτόνες) σε χαμηλή ένταση καβουρδίσματος, αλλά τα διαθέσιμα δεδομένα για το θέμα αυτό είναι ακόμη κάπως αντιφατικά (Le Floch et al., 2015).

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παλαίωσης αποσταγμένων οινοπνευματώδων ποτών λαμβάνουν χώρα διάφορα φαινόμενα, δηλαδή η απελευθέρωση φαινολικών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους και τανινών από το ξύλο στο οινικό οινόπνευμα. Οι έρευνες που έχουν διεξαχθεί τις τελευταίες δεκαετίες δείχνουν ότι παίζουν καθοριστικό ρόλο στα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά και τις σχετικές οργανοληπτικές ιδιότητες του ποτού. Έχει επίσης τονιστεί η συμβολή τους στην αντιοξειδωτική δράση (Canas, 2017).

Η θετική επίδραση της παλαίωσης έγκειται επίσης στη γήρανση του ουίσκι καθώς αυξάνει τη δραστηριότητα απορρόφησης ριζών 1,1-διφαινυλο-2-πικρυλ-υδραζύλιο (DPPH), δηλαδή την αντιοξειδωτική δραστηριότητα. Η αύξηση των όξινων και φαινολικών συστατικών στο ουίσκι, τα οποία αποκτώνται στα βαρέλια από ξύλο δρυός κατά τη διάρκεια της παλαίωσης, προκάλεσε την ενίσχυση της δημιουργίας δεσμών υδρογόνου νερού-αιθανόλης στο ουίσκι και μπορεί να κάνουν το ουίσκι να έχει καλή γεύση. Αυτές οι αλλαγές των δευτερευόντων συστατικών στο ουίσκι κατά τη διάρκεια της παλαίωσης ενδέχεται να βελτιώσουν το άρωμα

και τη γεύση και να καταστήσουν το παλαιωμένο ούισκι ιδιαίτερα πολύτιμο. Ακόμα, η παλαίωση του ούισκι αυξάνει την ενίσχυση της απόκρισης του υποδοχέα GABA_A, ενός κύριου υποδοχέα ανασταλτικού νευροδιαβιβαστή και στόχου των φαρμάκων που καθορίζουν τη διάθεση, όπως τα ηρεμιστικά, τα υπνωτικά και τα αναισθητικά (Aoshima et al., 2009).

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματά τους, τα βαρέλια έχουν αρκετά μειονεκτήματα. Η διαδικασία της παλαίωσης παρουσιάζει δυσκολίες, όπως η επάρκεια του χρόνου, η ανάπτυξη ανεπιθύμητων μικροοργανισμών ή η περαιτέρω ανεπιθύμητη οξυγόνωση, οι οποίες οδηγούν σε διαφορετικά επίπεδα πτητικής οξύτητας ή σε υπερβολική στυπτικότητα (Gonen et al., 2021). Τα βαρέλια είναι ακριβά στην παραγωγή, έχουν περιορισμένη διάρκεια ζωής και με κάθε παρτίδα αυξάνεται η πιθανότητα ανάπτυξης ζυμομυκήτων που προκαλούν αλλοίωση, όπως στην περίπτωση του γνωστού *Brettanomyces* spp. (Carpena et al., 2020). Οι διαδικασίες υγιεινής μεταξύ των παρτίδων συμβάλλουν επίσης στη μείωση της διάρκειας ζωής του βαρελιού. Η επιμήκυνση της διάρκειας ζωής ενός βαρελιού ποικίλλει ανάλογα με τον προορισμό του. Εάν προορίζεται για τη μεταφορά (διαχωρισμός ιζήματος) μπορεί να χρησιμοποιηθεί έως και 40 έτη- εάν όμως αντίθετα η χρήση του είναι για τη συμβολή αρωμάτων και γεύσεων, η διάρκεια ζωής του μειώνεται δραστικά στα 8 έτη. Παρ' όλα αυτά, μια επακόλουθη φάση παλαίωσης στη φιάλη είναι πάντα απαραίτητη. Καθώς όλοι αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την τελική ποιότητα του οίνου, αναπτύσσονται εναλλακτικές λύσεις αντί των βαρελιών για τη διεξαγωγή της διαδικασίας παλαίωσης των οίνων και τη λήψη των πιο όμοιων παλαιωμένων οίνων με πιο προσιτό και αποτελεσματικό τρόπο (Martínez-Gil et al., 2018).

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναπτυχθεί νέες προσεγγίσεις και τεχνικές παλαίωσης σε βαρέλια, προκειμένου να βρεθούν νέες εναλλακτικές λύσεις πιο κατάλληλες, προσιτές και εφικτές για την εξυγίανση της διαδικασίας, όπως η χρησιμοποίηση άλλων υλικών διαφορετικών από το ξύλο ή η προσθήκη ξυλοτεμαχιδίων διαφόρων σχημάτων και μεγεθών, η οποία ρυθμίζεται από το 2006 και έχει αυξηθεί σε δημοτικότητα στην Ευρώπη από τότε που εγκρίθηκε και ρυθμίστηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τον ΟΙV. Ωστόσο, παρόλο που ορισμένες από αυτές έχουν δείξει ελπιδοφόρα στοιχεία, τα βαρέλια αποτελούν σήμερα την πλέον χρησιμοποιούμενη τεχνολογία για το οξειδωτικό στάδιο της παλαίωσης των επιτραπέζιων οίνων (Carpena et al., 2020).

1.6 Ανάπτυξη τεχνητών μεθόδων παλαίωσης χρησιμοποιώντας τα oak chips

Η χρήση των ξυλοτεμαχιδίων είναι μια κοινή πρακτική που έχει επιτραπεί στην Ευρώπη από τις αρχές της δεκαετίας του 2000. Η χρήση των δρύινων τσιπς, ή άλλων εναλλακτικών προϊόντων ξύλου, δεν έχει πάντα ευνοϊκή ανταπόκριση τόσο από τους παραγωγούς όσο και από τους καταναλωτές οίνου (Cosme et al., 2021). Πέρα από την πιθανή λανθασμένη χρήση, τα ροκανίδια ξύλου είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη βέλτιστη επίτευξη πολλών οινολογικών στόχων, συμπεριλαμβανομένης της εξαγωγής ορισμένων πτητικών οσμών από τα κομμάτια δρυός, καθώς και ενώσεων που θα βελτιώσουν την ποιότητα του οίνου (Bozalongo et al., 2007). Η πρακτική αυτή στην παραγωγή οίνου έχει καταγραφεί στη Γαλλία από τον δέκατο ένατο αιώνα. Ήταν μια ασυνήθιστη, αλλά γνωστή πρακτική για τη βελτίωση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών ορισμένων οίνων με τη χρήση καβουρδισμένων τεμαχίων από ξύλο δρυός. Η σύγχρονη χρήση τεμαχίων ξύλου καρδιάς στην οινοποίηση άρχισε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 (Cosme et al., 2021). Το 1993, οι Ηνωμένες Πολιτείες ρύθμισαν τη χρήση τέτοιων προϊόντων στην οινολογία. Στην Ευρώπη, η χρήση τους ήταν αντίθετη μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 2000 (Cosme et al., 2021), όμως η Ευρωπαϊκή Ένωση (κανονισμός ΕΚ αριθ. 2165/2005 του Συμβουλίου) και η Διεθνής Οργάνωση Αμπέλου και Οίνου (ΟΙΥ, ψήφισμα ΟΕΝΟ 3/2005) επέτρεψαν τη χρήση εναλλακτικών προϊόντων δρυός στην οινοποίηση, γεγονός που είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ζήτησης τεμαχίων και ράβδων δρυός (Dumitriu et al., 2019). Ο νέος κατ' εξουσιοδότηση κανονισμός της ΕΕ 2019/934 ρυθμίζει επί του παρόντος τη χρήση τεμαχίων ξύλου δρυός στην οινολογία, τα οποία χρησιμοποιούνται για διάφορους τεχνολογικούς σκοπούς. Ο κύριος στόχος είναι η απελευθέρωση επιθυμητών ενώσεων, κυρίως αρωμάτων και πολυφαινολικών ενώσεων, από τα θραύσματα ξύλου στον οίνο κατά τη διάρκεια της παλαίωσης (Cosme et al., 2021).

Τα τσιπς δρυός είναι μικρά κομμάτια ξύλου δρυός τα οποία μπορούν να ληφθούν από απορρίμματα ξύλου που παράγονται κατά την κατασκευή βαρελιών και παρασκευάζονται με παραδοσιακές μεθόδους βαρελοποιίας. Υποβάλλονται σε βρασμό σε νερό και καβούρδισμα (Eder et al., 2012). Τα τεμαχίδια μπορούν να προστεθούν στον οίνο που ζυμώνεται σε δεξαμενές από ανοξείδωτο ατσάλι, για να ληφθούν οίνοι όπως εκείνοι που ζυμώνονται σε βαρέλια, αλλά με καλύτερες συνθήκες χειρισμού (καλύτερος έλεγχος της θερμοκρασίας, δυνατότητα για μεγαλύτερες ποσότητες, καλύτερος έλεγχος της υγιεινής) (Bozalongo et al., 2007).

Στην οινοποίηση, η δοσολογία των τεμαχίων δρυός δεν είναι εύκολη υπόθεση, καθώς διάφοροι παράγοντες, ιδίως η ποσότητα και η επιφάνεια επαφής, επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Οι Dumitriu et al., 2019 αναφέρουν ότι ο οίνος που παλαιώθηκε με θραύσματα γαλλικής δρυός είναι πιο πλούσιο σε αρωματικές ενώσεις από τον οίνο που παλαιώθηκε με θραύσματα αμερικανικής δρυός. Επιπλέον, τα κομμάτια γαλλικής δρυός συμβάλλουν σε αυξημένα επίπεδα φουρανικών αλδευδών στους οίνους (Dumitriu et al., 2019). Επιπλέον, η συγκέντρωση της *cis*-λακτόνης, η οποία είναι γνωστή ως σημαντική αρωματική ένωση, είναι υψηλότερη στην αμερικανική δρυ σε σύγκριση με τη γαλλική δρυ. Κατά συνέπεια, τα θραύσματα δρυός πρέπει να επιλέγονται με μεγάλη προσοχή εξετάζοντας το σύνολο των χαρακτηριστικών του ξύλου (Bozalongo et al., 2007). Η ποικιλία των εναλλακτικών θραυσμάτων δρυός επιτρέπει στους οινολόγους να επιτύχουν ποικίλα

αποτελέσματα ανάλογα με το αναμενόμενο αποτέλεσμα και τις προτιμήσεις των καταναλωτών. Η παρατεταμένη έκθεση σε ξύλο δρυός μπορεί να προκαλέσει μη ισορροπημένα γευστικά προφίλ με έντονα αρώματα δρυός (Dumitriu et al., 2019).

Η ποσότητα των πτητικών αρωματικών ενώσεων που εκχυλίζονται από το ξύλο της δρυός στον οίνο εξαρτάται από διάφορες συνθήκες, κυρίως από την ποσότητα των ενώσεων που είναι δυνητικά εκχυλίσιμες, το χρόνο επαφής μεταξύ οίνου και ξύλου, τη θερμοκρασία αποθήκευσης, τις χημικές ιδιότητες του οίνου, τις ιδιότητες του ξύλου, όπως το είδος της δρυός, τη γεωγραφική προέλευση, την καρύκευση του ξύλου, το βαθμό καρβουδίσματος. Οι παράγοντες αυτοί επηρεάζουν τη συγκέντρωση των λακτόνων της δρυός, των πτητικών φαινολών και των φαινολικών αλδεϋδών (Eder et al., 2012). Για παράδειγμα, η αμερικανική δρυς συνεισφέρει περισσότερο cis- και trans-ισομερή της ούισκι λακτόνης από ό,τι η γαλλική δρυς (Bozalongo et al., 2007).

Η φυσική ωρίμανση έχει επίδραση στο αρωματικό προφίλ του ξύλου. Το ξύλο δρυός αποξηραμένο και καρυκευμένο στο εξωτερικό υφίσταται τη δράση μικροοργανισμών, βροχής, ήλιου και αέρα, γεγονός που εξαλείφει μέρος των ελλαγιτανινών μέσω υδρόλυσης, έκπλυσης και οξειδωσης. Αντίθετα με την τεχνητή καρύκευση, η φυσική καρύκευση έχει κυρίως θετική επίδραση στις πτητικές σύνθεση και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του ξύλου δρυός (Eder et al., 2012). Το ξύλο της βελανιδιάς αποτελείται από τρία αδιάλυτα πολυμερή - κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Ωστόσο, περιέχει και άλλες ενώσεις μικρότερου μοριακού βάρους, όπως πτητικά και μη πτητικά οξέα, σάκχαρα, στεροειδή, τερπένια, πτητικές φαινόλες και λακτόνες, οι οποίες μπορούν να εκχυλιστούν με οίνο ή υδροαλκοολικούς διαλύτες (Arapitsas et al., 2004). Το καβούρδισμα του ξύλου προκαλεί την αποσύνθεση των μεγάλων πολυμερών λιγνίνης ή κυτταρίνης που υπάρχουν στο ξύλο λόγω της υψηλής θερμοκρασίας, σχηματίζοντας ενώσεις όπως αλδεϋδες, φαινόλες, παράγωγα φουρφουράλης, λακτόνες και άλλες (Eder et al., 2012). Αν και οι συνθήκες παλαίωσης, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία του κελαριού και η διάρκεια παραμονής στο βαρέλι, διαμορφώνουν σε ένα βαθμό τα χαρακτηριστικά του οίνου, η βασικότερη μεταβλητή είναι η πρώτη ύλη του βαρελιού (η δρυς) και η επεξεργασία της, καθώς αυτές οι δύο μεταβλητές καθορίζουν τα συστατικά του ξύλου που εκχυλίζονται στον οίνο (Arapitsas et al., 2004).

Μελέτες που έχουν διεξαχθεί σχετικά με τη συμβολή της δρυός στα αρωματικά χαρακτηριστικά του οίνου αποδεικνύουν ότι αυτά καθορίζονται κυρίως από ενώσεις όπως η φουρφουράλη, η γουαϊακόλη, η λακτόνη του ούισκι, η ευγενόλη, η βανιλίνη και η συριγγαλδεϋδη (Jourdes et al., 2011). Ειδικότερα, η φουρφουράλη (2-φουρανκαρβοξαλδεϋδη) προκύπτει από την διάσπαση μονοσακχαριτών που σχηματίζονται από τη μερική υδρόλυση της ημικυτταρίνης (Bozalongo et al., 2007). Ενισχύει τον χαρακτήρα των αποξηραμένων φρούτων και ιδιαίτερα των καμένων αμυγδάλων (Jourdes et al., 2011).

Η γουαϊακόλη (ο-μεθοξυφαινόλη) δημιουργείται από τη αποικοδόμηση της λιγνίνης κατά τη διαδικασία του καβουρδίσματος του ξύλου και είναι υπεύθυνη για τους καμένους τόνους του αρώματος του οίνου (Bozalongo et al., 2007). Η λακτόνη της βελανιδιάς (cis και trans ισομερή της β-μεθυλ-γ-οκταλακτόνης), η οποία συχνά αναφέρεται ως λακτόνη του ούισκι, δεδομένου ότι ανακαλύφθηκε στο μπέρμπον, προκύπτει από τα λιπίδια της βελανιδιάς και επηρεάζει άμεσα τον χαρακτήρα του οίνου. Για το λόγο αυτό, η συγκέντρωση αυτής της ένωσης στον οίνο καθορίζει σημαντικά την ποιότητα, καθώς και την αποδοχή από τον καταναλωτή. Η

λακτόνη του ούισκι αποδίδει κυρίως χαρακτήρα ξύλου και καρύδας, ενώ ορισμένες μελέτες έχουν δείξει ότι υψηλές συγκεντρώσεις αυτής της ένωσης συνδέονται με οίνους που έχουν έντονο άρωμα βανίλιας (Arapitsas et al., 2004). Η ευγενόλη (2-μεθοξυ-4-(2-προπενυλοφαινόλη), μια πτητική φαινόλη, σχηματίζεται από τη αποικοδόμηση της λιγνίνης κατά τη διαδικασία του καβουρδίσματος του ξύλου και ενισχύει στον χαρακτήρα των μπαχαρικών, του γαρύφαλλου και του καπνού (Jourdes et al., 2011). Η βανιλίνη (4-υδροξυ-3-μεθοξυβενζαλδεΰδη) προκύπτει από την διάσπαση της λιγνίνης και μπορεί να σχηματιστεί συνθετικά από την ευγενόλη ή τη γουαϊακόλη. Συμβάλει άμεσα και ευχάριστα στο άρωμα του οίνου αποδίδοντας χαρακτήρα βανίλιας (Jourdes et al., 2011), (Bozalongo et al., 2007). Η συριγγαλδεΰδη (υδροξυ-3,4-διμεθοξυβενζαλδεΰδη) παράγεται από την αποικοδόμηση της λιγνίνης κατά το καβούρδισμα του ξύλου και συμβάλει στον χαρακτήρα βανίλιας του οίνου (Jourdes et al., 2011). Συνεπώς, η τοποθέτηση νέων κομματιών ξύλου (τσιπς δρυός ή εσωτερικές ράβδους) σε αδρανή δοχεία, προσφέρει ορισμένα ξεχωριστά και προηγούμεως μη διαθέσιμα γευστικά πλεονεκτήματα, καθώς και νέες επιλογές στο χειρισμό του οίνου (Arapitsas et al., 2004). Δεδομένου ότι το ξύλο τοποθετείται στον οίνο και όχι ο οίνος στο ξύλο, ολόκληρη η επιφάνεια του είναι αξιοποιήσιμη (Cioch-Skonieczny et al., 2023).

Εκτός από τις θετικές επιπτώσεις στην ποιότητα, η παλαίωση του μπράντι σε ξύλινα βαρέλια έχει ένα μειονέκτημα, το αυξημένο κόστος. Τα ξύλινα βαρέλια είναι ακριβά και δύσκολα καθαρίζονται και συντηρούνται. Η εξάτμιση της αιθανόλης από τα ξύλινα βαρέλια είναι μεγαλύτερη από ό,τι από τις δεξαμενές από ανοξείδωτο χάλυβα. Εάν η ποιότητα του ξύλου και η επεξεργασία είναι κακή, η ποιότητα του αποστάγματος θα επηρεαστεί και οι απώλειες εξάτμισης θα αυξηθούν. Επιπλέον, τα βαρέλια χάνουν τις εκχυλίσιμες ουσίες τους μετά από μερικά χρόνια και πρέπει να αντικαθίστανται. Το κόστος αυξάνεται ανάλογα με τη διάρκεια της παλαίωσης, λόγω της δέσμευσης κεφαλαίων (Balcerek et al., 2017).

Είναι γνωστό ότι η επεξεργασία με κομμάτια δρυός, ιδίως καμένα ή καβουρδισμένα κομμάτια, επιταχύνει τη διαδικασία παλαίωσης του μπράντι. Η απλούστερη μέθοδος για την προσθήκη ενώσεων που προέρχονται από ξύλο είναι η χρήση τσιπς δρυός (Schwarz et al., 2014). Τα τσιπς δρυός χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην ωρίμανση των μπράντι. Η χρήση τσιπς δρυός επιτρέπεται νομικά και είναι συνηθισμένη στην εμπορική παραγωγή οίνων (Balcerek et al., 2017). Στο εμπόριο κυκλοφορούν πλέον τσιπς δρυός διαφόρων μεγεθών, προ επεξεργασμένα με διάφορους τρόπους, τα οποία χρησιμοποιούνται για να αντισταθμίσουν τα χαμηλά επίπεδα εκχυλίσιμων συστατικών σε παλαιά βαρέλια, τα οποία ωστόσο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παρέχουν ένα περιβάλλον που μοιάζει με βαρέλι. Εναλλακτικά, για την παραγωγή μπράντι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανανεώσιμες στοίβες από σανίδες που τοποθετούνται σε μεγάλες χαλύβδινες δεξαμενές ωρίμανσης (Fan et al., 2006). Η χρήση εναλλακτικών λύσεων σε σχέση με τα παραδοσιακά βαρέλια, όπως τα θραύσματα ξύλου δρυός, μπορεί να αποτελέσει μια γρήγορη και οικονομική μέθοδο επεξεργασίας της παλαίωσης. Σήμερα δεν υπάρχει νομοθεσία για την παλαίωση των αποσταγμάτων σε επαφή με θραύσματα ξύλου δρυός (Balcerek et al., 2017). Υπάρχουν ορισμένες εργασίες για το μπράντι που παλαιώνεται σε επαφή με θραύσματα ξύλου, για το μπράντι μηλίτη, για το παλαιωμένο ρούμι και για το Brandy de Jerez (Schwarz et al., 2014). Η σύνθεση του τελικού προϊόντος επηρεάζεται κυρίως από τη βοτανική και γεωγραφική προέλευση της χρησιμοποιούμενης δρυός, αλλά επίσης σημαντικά κατά την επιταχυνόμενη παλαίωση είναι: το μέγεθος του θραύσματος δρυός, η ποσότητα του ξύλου που χρησιμοποιείται και το επίπεδο καβουρδίσματος (ελαφρύ, μέτριο ή υψηλό) (Fan et al., 2006).

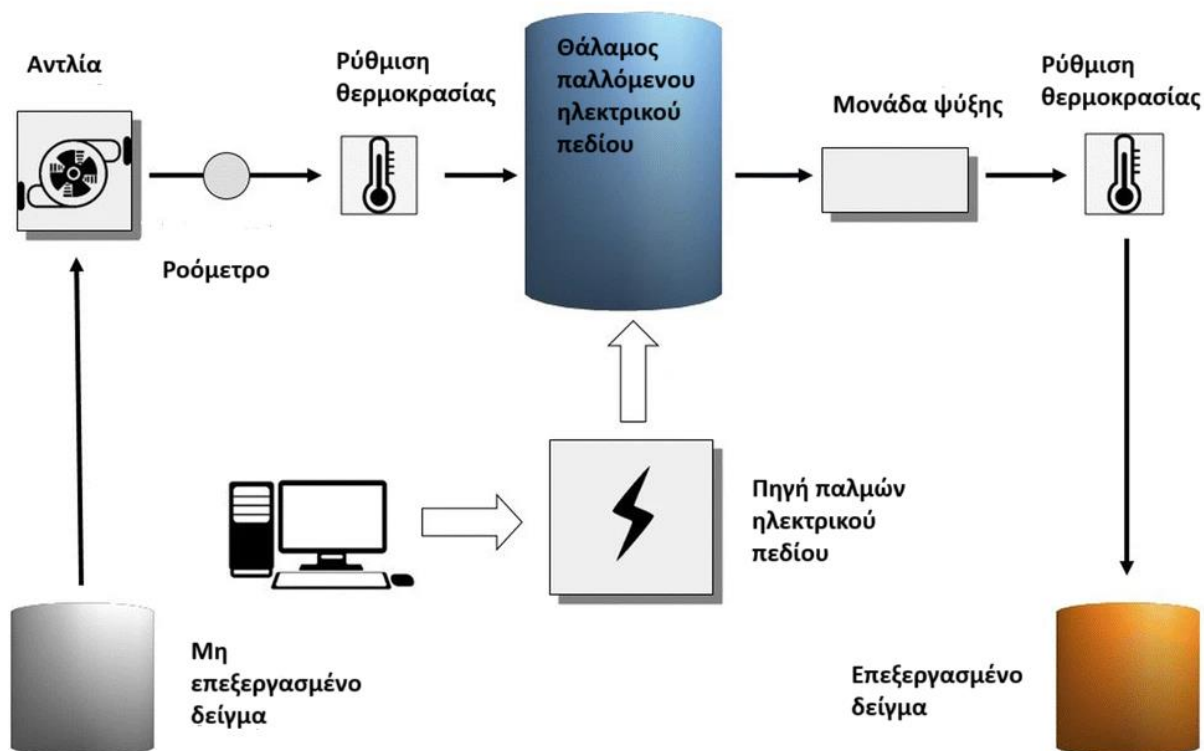
2. Μηχανικές μέθοδοι τεχνητής παλαίωσης

2.1 Παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο

2.1.1 Τι είναι και χρήσεις του στην οινολογία

Τα τελευταία 50 χρόνια, η εφαρμογή των ηλεκτρικών πεδίων στον τομέα των τροφίμων και της βιομηχανικής έχει διερευνηθεί σε βάθος και έχει αναπτυχθεί σε μεγάλο βαθμό. Αυτές περιλαμβάνουν την εφαρμογή παλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων για μη θερμική αποστείρωση, τη χρήση ηλεκτρικών πεδίων για την αλλαγή των πρωτεϊνικών μορίων και τη βελτίωση της βλαστικότητας των σπόρων για γεωπονικές εφαρμογές (Toepfl et al., 2007), (Zhao et al., 2013) (Zeng et al., 2008). Διάφορες ερευνητικές ομάδες έχουν διερευνήσει την επεξεργασία με ηλεκτρικά πεδία ως αποτελεσματική μέθοδο για την επιτάχυνση της γήρανσης των νεαρών οίνων. Η χρήση παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου προσφέρει ελάχιστη βλάβη στη δομή των τροφίμων, καλύτερη διατήρηση της γεύσης και των θρεπτικών συστατικών, δυνατότητα αποστείρωσης μικροοργανισμών και αδρανοποίησης ενζύμων σε χαμηλές θερμοκρασίες με χαμηλό ενεργειακό κόστος (Zhao et al., 2013). Η εφαρμογή υψηλής έντασης ηλεκτρικού πεδίου για την επιτάχυνση της παλαίωσης του οίνου χει γίνεται όλο και περισσότερο αποδεκτή από τα οινοποιεία (Zeng et al., 2008).

Η χρήση παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι μια μη θερμική επεξεργασία που περιλαμβάνει την εφαρμογή παλμών πολύ μικρής διάρκειας π.χ. της τάξεως μικροδευτερολέπτων ενός ηλεκτρικού πεδίου υψηλής ισχύος μέσω ενός υλικού που βρίσκεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (Puertolas et al., 2010). Το σύστημα επεξεργασίας παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να αποτελείται από μια πηγή υψηλής τάσης, μια συστοιχία πυκνωτών, έναν διακόπτη και έναν θάλαμο επεξεργασίας. Ο θάλαμος επεξεργασίας παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου περιέχει την υγρή ουσία προς επεξεργασία και αντιπροσωπεύει το ηλεκτρικό φορτίο που αποτελείται από δύο ή περισσότερα ηλεκτρόδια. Ο θάλαμος πρέπει να είναι κατασκευασμένος κατά τρόπο ώστε το ηλεκτρικό πεδίο που επιδρά στο υγρό να είναι ομοιογενές σε ολόκληρη την ενεργό περιοχή. Ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί κατ' αρχήν με επίπεδες και ομοαξονικές γεωμετρίες ηλεκτροδίων. (Ntourtoglou et al., 2021). Οι παλμοί που χρησιμοποιούνται συνήθως στην επίδραση του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι συνήθως εκθετικού ή τετραγωνικού σχήματος. Ενώ στους εκθετικούς παλμούς η τάση αυξάνεται γρήγορα σε μια μέγιστη τιμή και φθίνει αργά στο μηδέν, στους τετραγωνικούς παλμούς το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια του παλμού (Puertolas et al., 2010).



Εικόνα 2: Διάταξη παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου

Το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να οδηγήσει στον ιονισμό των μορίων, να μειώσει την ενέργεια ενεργοποίησης που απαιτείται για μία χημική αντίδραση, να αυξήσει το ρυθμό της αποτελεσματικής σύγκρουσης μεταξύ των μορίων, να επιταχύνει τους ρυθμούς των χημικών αντιδράσεων, όπως η οξειδοαναγωγή, η ένωση, η υδρόλυση και άλλες αντιδράσεις σε δυναμική ισορροπία, και να προωθήσει την εκχύλιση και τη διάχυση διαφόρων ειδών ενώσεων σε δοχεία αποθήκευσης οίνου (Yang et al., 2016). Ως εκ τούτου, η χρήση παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου θα μπορούσε κατ' αρχήν να εφαρμοστεί στην παλαίωση του οίνου (El Darga et al., 2016).

Επιπλέον, η διαδικασία επεξεργασίας με χρήση παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου έχει το πλεονέκτημα της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και ότι όλη η διαδικασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου. Μετά την επεξεργασία, η μέθοδος αυτή μπορεί όχι μόνο να επιτύχει τον σκοπό της προώθησης της παλαίωσης αλλά και να διασφαλίσει ότι η θρεπτική σύνθεση του οίνου δεν καταστρέφεται. Επιπλέον, ο χρόνος επεξεργασίας είναι σύντομος και ο εξοπλισμός είναι απλός. Ως εκ τούτου, είναι κατάλληλη για τη χρήση σε μεγάλης κλίμακας επιχειρήσεις παραγωγής και έχει ισχυρή πρακτική σημασία και αξία εφαρμογής (Puértolas et al., 2010).

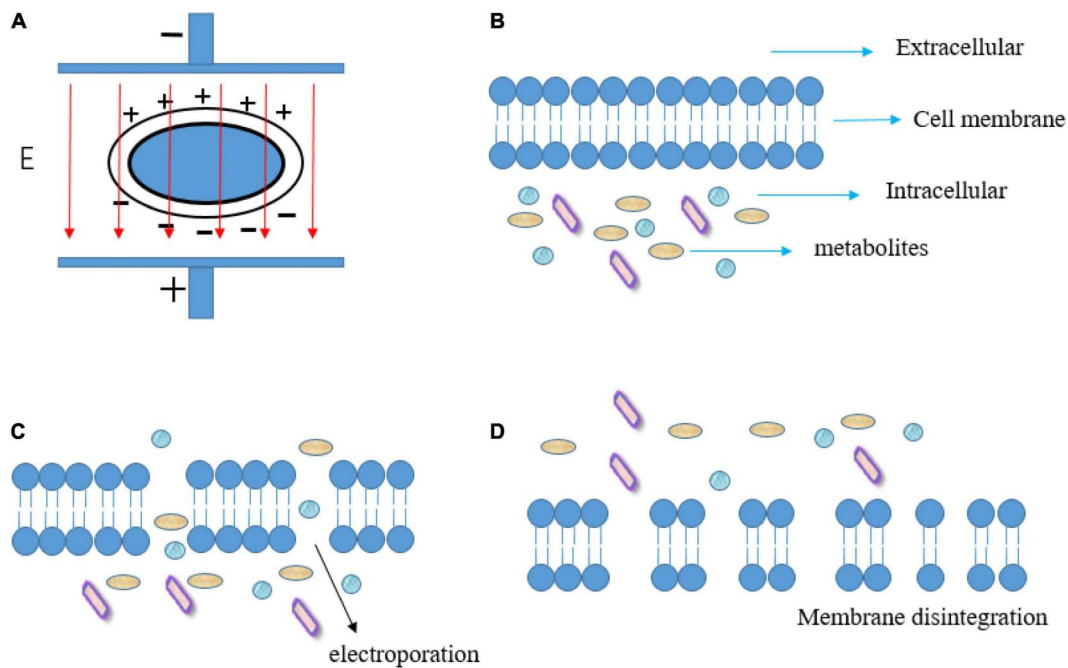
Σε αντίθεση με άλλες μη θερμικές διεργασίες, όπως η υψηλή υδροστατική πίεση, η τεχνολογία παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου απαιτεί πολύ μικρούς χρόνους επεξεργασίας και η επεξεργασία μπορεί να εφαρμοστεί σε συνεχή ροή (Toerfl et al., 2007).

Μια από τις χρήσεις του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου στην οινολογία είναι στην παλαίωση σε οινολάσπες. Η παλαίωση σε οινολάσπη έχει προσελκύσει την προσοχή των οινολόγων για την ερυθρή οινολάσπη, ιδίως λόγω της θετικής επίδρασής της στις οργανοληπτικές ιδιότητες αυτών των τύπων οίνων. Η τεχνική αυτή χαρακτηρίζεται για την αυτόλυση της ζύμης και την

επακόλουθη απελευθέρωση των μαννοπρωτεϊνών από το κυτταρικό τοίχωμα. Μετά των θάνατο των κυττάρων απελευθερώνονται από τα λυσοσώματα της ζύμης η γλυκανάση και η πρωτεάση, οι οποίες είναι υπεύθυνες για την αποικοδόμηση των μαννοπρωτεϊνών. Η παρουσία αυτών των άκρως γλυκοζυλιωμένων πρωτεϊνών στους οίνους βελτιώνει τη σταθερότητα του χρώματος, μειώνει τη στυπτικότητα και αυξάνει το σώμα και το στόμα (Maza et al., 2020). Πρόσφατα έχει αποδειχθεί ότι η ηλεκτροδιάχυση των ζυμών με την εφαρμογή επεξεργασίας με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο πριν από την παλαίωση στις οινολάσπες επιτάχυνε την απελευθέρωση των μαννοπρωτεϊνών στον λευκό οίνο της ποικιλίας Chardonnay (Maza et al., 2020) , (Martínez et al., 2019).

Η εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου ενδέχεται να προκαλέσει αντιστρεπτή ή μη αντιστρεπτή διαπερατότητα της κυτταροπλασματικής μεμβράνης των ευκαρυωτικών και προκαρυωτικών κυττάρων. Θεωρείται ότι η μεμβράνη ενός κυττάρου είναι ένας πυκνωτής γεμάτος με ένα υλικό με χαμηλή διηλεκτρική σταθερά. Όταν το κύτταρο εκτίθεται σε ηλεκτρικό πεδίο, τα ιόντα εντός και εκτός του κυττάρου κινούνται κατά μήκος του πεδίου και, ως αποτέλεσμα, ελεύθερα φορτία αντίθετου πρόσημου συσσωρεύονται και στις δύο πλευρές της μεμβράνης. Αυτά τα φορτία αντίθετου πρόσημου έλκονται μεταξύ τους δημιουργώντας μια πίεση συμπίεσης που προκαλεί μείωση του πάχους της μεμβράνης. Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή, σχηματίζονται αναστρέψιμοι ή μη αναστρέψιμοι πόροι που προκαλούν αύξηση της διαπερατότητας της μεμβράνης (Toepfl et al., 2007).

Επιπλέον, η επίδραση με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο θεωρείται μία από τις μη θερμικές μεθόδους αδρανοποίησης μικροοργανισμών στα τρόφιμα. Οι εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου της τάξης των 15-35 kV/cm, που παράγονται με την εφαρμογή σύντομων παλμών υψηλής τάσης, και οι ειδικές ενέργειες από 50 έως 700 kJ/kg προκαλούν το σχηματισμό πόρων στη μικροβιακή μεμβράνη, προκαλώντας την αδρανοποίηση των μικροοργανισμών. Η αδρανοποίηση των βλαστικών κυττάρων βακτηρίων και ζυμομυκήτων από την επίδραση παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου έχει αποδειχθεί ευρέως. Το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο ενισχύει επίσης τη μεταφορά μάζας μέσω των κυτταροπλασματικών μεμβρανών των ευκαρυωτικών κυττάρων. Αυτή η διαπερατότητα των κυτταρικών μεμβρανών μπορεί να επιτευχθεί σε μέτρια ηλεκτρικά πεδία 0,5-1 kV/cm και χρόνους επεξεργασίας μεταξύ 100 και 10.000 μ s. (Puertolas et al., 2010).



Εικόνα 3: Σχηματική απεικόνιση του διαμεμβρανικού δυναμικού που προκαλείται από παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο (Α), της μεμβράνης πριν από την ηλεκτρομόνωση (Β), της ηλεκτρομόνωσης της κυτταρικής μεμβράνης (Γ), και της αποσύνθεσης της μεμβράνης που προκαλείται από υπερβολική επεξεργασία με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο (Δ).

Η εφαρμογή του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου ως εναλλακτική λύση στην προσθήκη SO_2 ως αντιμικροβιακή ένωση έχει επίσης διερευνηθεί (Puertolas et al 2010). Μελέτες που διεξήχθησαν με τη χρήση της λευκής ποικιλίας σταφυλιών Parellada έδειξαν ότι όταν το γλεύκος σταφυλιών επεξεργάστηκε με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο πριν από τη ζύμωση, η συγκέντρωση SO_2 μπορούσε να μειωθεί ή ακόμη και να εξαλειφθεί. Η επεξεργασία με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δεν τροποποίησε την περιεκτικότητα σε ενώσεις που έχουν μεγάλη σημασία στην οινοποίηση, όπως λιπαρά οξέα και ελεύθερα αμινοξέα ή θρεπτικές ενώσεις για την ανάπτυξη της ζύμης. Σε αυτές τις μελέτες αναφέρθηκε επίσης ότι οι επεξεργασίες με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, σε συνδυασμό με τον εμβολιασμό ενός εκκινητικού στελέχους ζύμης, θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην επίτευξη μιας αναπαραγωγικής ζύμωσης του γλεύκους χωρίς σημαντική τροποποίηση της σύνθεσης των πτητικών ενώσεων που είναι υπεύθυνες για την τυπική γεύση των οίνων μέσω της αλκοολικής ζύμωσης και της παλαίωσης του λευκού οίνου (Garde-Cerdán et al., 2008).

Η εξοικονόμηση ενέργειας και οι σύντομοι χρόνοι επεξεργασίας που απαιτούνται για τη διαπερατότητα των κυττάρων του φλοιού των σταφυλιών αποτελούν βασικά πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής για την παραγωγή οίνων με υψηλή περιεκτικότητα σε φαινολικές ενώσεις και για τη μείωση της διάρκειας της εκχύλισης κατά την οινοποίηση. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την απόκτηση οίνων πλούσιων σε βιοδραστικές φαινολικές ενώσεις. Μια υψηλή περιεκτικότητα σε φαινολικές ενώσεις στον οίνο θα μπορούσε να βελτιώσει τις ευεργετικές φυσιολογικές επιδράσεις της μέτριας κατανάλωσης οίνου από τις αντιοξειδωτικές και αντιφλεγμονώδεις ιδιότητές τους. Επιπλέον, η υψηλή συγκέντρωση πολυφαινολών απαιτείται για τη σταθεροποίηση του χρώματος και τη βελτίωση της ποιότητας του οίνου κατά τη διάρκεια της παλαίωσης. Η επιμήκυνση του χρόνου εκχύλισης ακόμη και πάνω από 3 εβδομάδες είναι η παραδοσιακή διαδικασία που ακολουθείται στα οινοποιεία για την απόκτηση οίνου με υψηλή συγκέντρωση φαινολικών ενώσεων. Ωστόσο, η πρακτική αυτή

απαιτεί την αύξηση του αριθμού των δεξαμενών ζύμωσης στα οινοποιεία, γεγονός που δυσχεραίνει τον έλεγχο της θερμοκρασίας ζύμωσης, επειδή τα στέμφυλα των σταφυλιών έρχονται σε επαφή με το γλεύκος καθ' όλη τη διάρκεια της ζύμωσης (Puertolas et al., 2010).

Η πιθανή εφαρμογή του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου για την επιτάχυνση και την αύξηση της φαινολικής εκχύλισης από τις φλούδες των σταφυλιών κατά τη διάρκεια του σταδίου της εκχύλισης-ζυμωτικής διαδικασίας της ερυθράς οινοποίησης έχει διερευνηθεί διεξοδικά (López et al., 2008). Η προ επεξεργασία της φλούδας των σταφυλιών με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο πριν από το στάδιο της εκχύλισης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση του ολικού πολυφαινολικού δείκτη του ερυθρού οίνου λόγω της αύξησης της διαπερατότητας της μεμβράνης των κυττάρων (López et al., 2008), (Puértolas et al., 2010). Επιπλέον, η συγκέντρωση των υπομονάδων και των προανθοκυανιδίων στον ερυθρό οίνο μετά την επεξεργασία με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο παρουσίασε την ίδια τάση με τα δείγματα φυσικής γήρανσης (Zhao et al., 2013). Με βάση τους συγγραφείς, το νεαρό οίνο που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο 600 V/cm για 3 λεπτά παρουσίασε πολύ καλύτερη οργανοληπτική ποιότητα από το μη επεξεργασμένο οίνο και αποδείχθηκε ότι η διαδικασία γήρανσης επιταχύνθηκε με την εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου εναλλασσόμενου ρεύματος (Zeng et al., 2008).

Μετά από παλαίωση 12 μηνών στη φιάλη, δεν παρατηρήθηκαν διαφορές στην περιεκτικότητα σε μονομερείς ανθοκυανίνες μεταξύ του οίνου που προέκυψε από σταφύλια επεξεργασμένα με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο και του οίνου ελέγχου, αλλά η περιεκτικότητα σε φλαβαν-3-όλες, φλαβονόλες και υδροξυκιναμωμικά οξέα και παράγωγα ήταν υψηλότερη στον οίνο που προέκυψε από σταφύλια επεξεργασμένα με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο (Puértolas et al., 2010). Τα καλύτερα χρωματικά χαρακτηριστικά και η υψηλότερη περιεκτικότητα σε φαινόλες που προέκυψαν από την επεξεργασία με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο μετά τη ζύμωση παρέμειναν ή και αυξήθηκαν κατά την παλαίωση σε οξειδωτικές συνθήκες σε αμερικανικά δρύινα βαρέλια για 6 μήνες και την εκ των υστέρων αποθήκευσή τους σε φιάλη για 8 μήνες. Δεν εντοπίστηκαν αισθητηριακές διαφορές στο χρώμα και το μπουκέτο τους με τριγωνικές δοκιμές μετά από 8 μήνες παλαίωσης στη φιάλη (Zhao et al., 2013).

Προκειμένου να εφαρμοστεί αυτή η τεχνολογία στα οινοποιεία, είναι απαραίτητο να αναπτυχθούν συστήματα παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου που να επιτρέπουν την εφαρμογή επιδράσεων σε συνεχείς συνθήκες. Με βάση τα πειράματα των (Puértolas et al., 2010), η επεξεργασία ερυθρών σταφυλιών με παλμικά ηλεκτρικά πεδία σε κλίμακα πιλοτικής μονάδας (118 kg/h) βελτίωσε την εκχύλιση των ανθοκυανών και των φαινολών κατά τη διάρκεια του σταδίου της εκχύλισης-ζυμωτικής διαδικασίας της οινοποίησης. Στην έρευνα αυτή, αποδείχθηκε επίσης ότι η μαθηματική μοντελοποίηση των καμπυλών εκχύλισης μπορεί να αποτελέσει ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών επεξεργασίας με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο (Puértolas et al., 2010).

2.1.2 Χρήση του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου στην παλαίωση του οίνου

Για την κατανόηση της χρήσης του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου στην παλαίωση του οίνου είναι αναγκαίο, αρχικά, να επεξηγηθούν οι ενώσεις που συμβάλουν στα επιθυμητά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του παλαιωμένου οίνου και οι αντιδράσεις αυτών. Οι φαινολικές ουσίες είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους ποιότητας του ερυθρού οίνου. Οι ενώσεις αυτές περιλαμβάνουν κυρίως ανθοκυανίνες, φλαβαν-3-όλες, φλαβονόλες, στιλβένια και οξέα του οίνου. Συμβάλλουν ουσιαστικά στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του ερυθρού οίνου, ιδίως στο χρώμα, την πικράδα, τη στυπτικότητα και την αίσθηση του στόματος. Οι ενώσεις αυτές, στη μονομερή τους μορφή, είναι οι χρωστικές που ευθύνονται για το κόκκινο χρώμα στους νεαρούς ερυθρούς οίνους και συμβάλλουν στη σταθεροποίηση του χρώματος κατά τη διάρκεια της παλαίωσης των οίνων, λόγω της ανάπτυξης ερυθρών πολυμερών χρωστικών με άλλες πολυφαινόλες, ιδίως φλαβαν-3-όλες (Budic-Leto et al., 2006).

Η περιεκτικότητα των οίνων σε φαινόλες εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε φαινόλες της ποικιλίας ή των ποικιλιών αμπέλου που χρησιμοποιούνται για την οινοποίηση. Η περιεκτικότητα αυτή καθορίζεται από τα γενετικά χαρακτηριστικά της ποικιλίας, αλλά επηρεάζεται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τις εδαφοκλιματικές συνθήκες, τη γεωγραφική θέση και τις τεχνικές καλλιέργειας (Puertolas et al., 2010). Η εκχύλιση των πολυφαινόλων κατά την οινοποίηση εξαρτάται από τις χρησιμοποιούμενες πρακτικές οινοποίησης. Για το λόγο αυτό, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές - όπως η αύξηση της θερμοκρασίας ζύμωσης, η θερμοβελτίωση, η κατάψυξη των σταφυλιών, η εκροή χυμού ή η χρήση ενζύμων εκχύλισης, για να ενισχυθεί η εκχύλιση φαινολικών που επιτυγχάνεται με τις παραδοσιακές μεθόδους (Bautista-Ortín et al., 2007).

Οι προανθοκυανιδίνες, οι οποίες είναι πολυμερή υπομονάδων με δεσμούς C4-C6 ή C4-C8, υπάρχουν ευρέως στους ιστούς των σπόρων, του φλοιού και του στελέχους του σταφυλιού και μπορούν να εκχυλιστούν κατά τη διαδικασία παρασκευής ερυθρού οίνου μέσω εκχύλισης (Bordiga et al., 2011), (González-Manzano et al., 2008). Κατά την περίοδο παλαίωσης του οίνου, οι εξαιρετικά αντιδραστικές προανθοκυανιδίνες υφίστανται διάφορους τύπους αντιδράσεων, οι οποίες περιλαμβάνουν όχι μόνο διασπάσεις που καταλύονται από οξέα αλλά και συμπυκνώσεις. Υπάρχουν δύο είδη συμπυκνώσεων μεταξύ προανθοκυανιδίνων, η άμεση συμπύκνωση και η έμμεση συμπύκνωση που προκαλείται από αλδεΐδες. Οι αντιδράσεις συμπύκνωσης των υπομονάδων έχουν ως εξής: (1) άμεση συμπύκνωση μεταξύ των υπομονάδων, (2) άμεση συμπύκνωση μεταξύ των υπομονάδων και της ανθοκυανίνης, (3) συμπύκνωση που προκαλείται από αλδεΐδες μεταξύ των υπομονάδων (Nonier et al., 2007), (Zhao et al., 2013). Στην έμμεση συμπύκνωση, ένα από τα σημαντικότερα ηλεκτρονιόφιλα είναι η ακεταλδεΐδη, η οποία συνήθως υπάρχει σε κάποιο βαθμό στον οίνο. Η ακεταλδεΐδη στον οίνο μπορεί να παραχθεί με δύο τρόπους: οξείδωση της αιθανόλης και παραγωγή από τις ζύμες (Zhao et al., 2013).

Εκτός από τη συγκέντρωση των προανθοκυανιδίνων, ο βαθμός πολυμερισμού επηρεάζει τη σταθερότητα του κολλοειδούς, τη στυπτικότητα και το χρώμα του οίνου. Η συμπύκνωση των προανθοκυανιδίνων οδηγεί σε αύξηση του βαθμού πολυμερισμού (Nonier et al., 2007). Η ελάφρυνση της στυπτικής γεύσης κατά την παλαίωση του οίνου οφείλεται επίσης συνήθως

στον πολυμερισμό των προανθοκυανιδίων. Όταν η τιμή του βαθμού πολυμερισμού των προανθοκυανιδίων φτάσει σε επίπεδο δεκαμερούς, η στυφή γεύση του οίνου θα είναι φαινομενικά λιγότερο έντονη, επειδή τα μεγαλύτερα μόρια προανθοκυανιδίων θεωρούνται αδιάλυτα και, συνεπώς, μη στυφά. Ορισμένες μελέτες έχουν διεξαχθεί σχετικά με την επίδραση του βαθμού πολυμερισμού στον συν-χρωματισμό μεταξύ ανθοκυανών και προανθοκυανιδίων και αποδείχθηκε ότι η κατεχίνη ήταν ο φτωχότερος συν-χρωματισμός ανθοκυανών σε σύγκριση με τα ολιγομερή (González-Manzano et al., 2008).

Οι Ma et al., 2022 ανέφεραν ότι όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ήταν χαμηλότερη από 18 kV/cm, ο μέσος βαθμός πολυμερισμού, η μονάδα επέκτασης και η περιεκτικότητα της προανθοκυανιδίνης άλλαξαν σημαντικά, και με την αύξηση της έντασης του πεδίου, το αποτέλεσμα της επεξεργασίας ήταν παρόμοιο με τη γήρανση. Ωστόσο, όταν η ένταση του πεδίου έφτασε τα 24 kV/cm, το αποτέλεσμα της επεξεργασίας μειώθηκε. Επιπλέον, η περιεκτικότητα των φλαβαν-3-ολών και του φαινολικού οξέος άλλαξε επίσης σημαντικά και η τιμή της χρωματικής χροιάς και της απόχρωσης του οίνου αυξήθηκε σημαντικά. Όταν η ένταση του πεδίου ήταν 22 kV/cm, η επίδραση της επεξεργασίας ήταν πιο σημαντική. Μετά την επεξεργασία με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, η μεταβολή της περιεκτικότητας σε οργανικά οξέα ήταν παρόμοια με εκείνη της παραδοσιακής παλαίωσης και η επίδραση της έντασης πεδίου 18 kV/cm και του αριθμού παλμών 100 έδειξε καλύτερη επίδραση. Ωστόσο, όταν η ένταση πεδίου έφτασε τα 24 kV/cm, η επίδραση μειώθηκε. Η χρήση παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου 5 kV/cm για την επεξεργασία του νέου οίνου είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης του χρώματος και της αφθονίας των ολικών πολυφαινολικών και του τανικού οξέος στα επεξεργασμένα δείγματα σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου, ενώ τα οπτικά χαρακτηριστικά ήταν καλύτερα (Ma et al., 2022).

Με βάση τις παραπάνω μελέτες, είναι προφανές ότι το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να ενισχύσει την ένταση του χρώματος, να αυξήσει την περιεκτικότητα σε φαινόλες και να μειώσει την περιεκτικότητα σε φυτικά έλαια όταν εφαρμόζεται στην επεξεργασία του οίνου. Το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να ενισχύσει την αντίδραση συμπύκνωσης μεταξύ της κατεχίνης και της ακεταλδεΐδης (Zhao et al., 2013). Τα αποτελέσματα των πειραμάτων των συγγραφέων έδειξαν ότι ο χρόνος αντίδρασης μετατροπής των προανθοκυανιδίων θα μπορούσε να μειωθεί δραματικά υπό τις επεξεργασίες παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου (Zeng et al., 2008).

Επιπλέον, η σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε (+)-κατεχίνη και της έντασης του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου ως συνάρτηση του χρόνου σε πρότυπο διάλυμα οίνου μελετήθηκε από τους συγγραφείς. Η αντίδραση συμπύκνωσης ενισχύθηκε σημαντικά από την χρήση παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, όσο υψηλότερη ήταν η εφαρμοζόμενη ένταση του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, τόσο υψηλότερη ήταν η απόδοση της συμπύκνωσης. Υπό τον ίδιο χρόνο αντίδρασης, ο ρυθμός μείωσης της περιεκτικότητας σε (+)-κατεχίνη αυξήθηκε σταδιακά με την ένταση του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου (Zhao et al., 2013). Η απόδοση της συμπύκνωσης της (+)-κατεχίνης στο πρότυπο διάλυμα οίνου υπό διαφορετικές θερμοκρασίες και διάφορες επεξεργασίες παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου μελετήθηκε από τους συγγραφείς. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αντίδρασης, η συμπύκνωση της (+)-κατεχίνης - ακεταλδεΐδης ενισχύθηκε. Μια πιθανή εξήγηση ήταν ότι η ενανθράκωση επιταχύνθηκε υπό το ηλεκτρικό πεδίο, γεγονός που αύξησε την πιθανότητα σύγκρουσης μεταξύ των μορίων (+)-κατεχίνης και ακεταλδεΐδης (Zhao et al., 2013), (Zeng et al., 2008).

Η επίδραση του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου στο υλικό του ξύλου περιγράφηκε από τους Kielbasa et al., 2021, οι οποίοι παρατήρησαν αύξηση του πορώδους του ιστού στα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αλληλεπίδραση σε ροκανίδια ξύλου με ηλεκτρικό πεδίο 1-10 kV/cm. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, τα αποτελέσματα που προέκυψαν υποδεικνύουν αυξημένη αποτελεσματικότητα της διαδικασίας υδρόλυσης της κυτταρίνης και οι συνέπειες που προκαλεί το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο στην οργανική ύλη, ιδιαίτερα στη βιομάζα του ξύλου, συνιστούν διαταραχές και δομικές αλλαγές στην κυτταρική μεμβράνη, προκαλώντας την απώλεια της διαπερατότητας της, διευκολύνοντας έτσι την είσοδο των ενζύμων που υδρολύουν τους πολυσακχαρίτες και τη λιγνίνη (Kielbasa et al., 2021).

Η δρυς έρχεται σε επαφή με το προϊόν υπό μορφή βαρελιού κατά τη διάρκεια της ζύμωσης ή της παλαίωσης. Μπορεί επίσης να εισαχθεί με τη μορφή ελεύθερα αιωρούμενων τεμαχίων δρυός ή με τη μορφή ξυλοδεμάτων (ή ξύλων). Τα τεμαχίδια ξύλου χρησιμοποιούνται για τον γρήγορο αρωματισμό των αλκοολούχων ποτών. Η χρήση τους επιταχύνει σημαντικά την αρωματική διαδικασία ή την παλαίωση σε σύγκριση με ένα βαρέλι και συγκεκριμένα, τα κομμάτια από αμερικανική δρυ (*Quercus alba*) προσφέρουν έντονο άρωμα βανίλιας και καρύδας και περισσότερη πικράδα και στυφή γεύση. Επτά από τις κύριες ουσίες που εξάγονται από το ξύλο κατά τη διαδικασία παλαίωσης, διαμορφώνουν τον οργανοληπτικό χαρακτήρα. Πρόκειται για δύο φαινολικές αλδεΐδες (βανιλίνη και συριγγαλδεΐδη), δύο φαινολικές αλκοόλες (ευγενόλη και γουαϊακόλη), φουρφουράλη και λακτόνη της δρυός (τα *cis*-ισομερή και *trans*-ισομερή της β-μεθυλο-οκταλακτόνης) (Ntourtoglou et al., 2021). Σύμφωνα με τους συγγραφείς, οι πιο σημαντικές πτητικές ενώσεις για την επεξεργασία της γεύσης που εξάγονται από το ξύλο της δρυός είναι η συριγγαλδεΐδη, η βανιλίνη, η λακτόνη της δρυός και η φουρφουράλη. (Ntourtoglou et al., 2021), (Arapitsas et al., 2004). Ειδικότερα, όταν αυτά τα τσιπς καβουρδίζονται (καίγονται), το αποτέλεσμα που προκύπτει προσεγγίζει εκείνο που επιτυγχάνεται με τα παραδοσιακά βαρέλια, ιδίως σε σύγκριση με τα αντίστοιχα ψημένα. Ένα πρόσθετο πλεονέκτημα είναι η μεγαλύτερη επιφάνεια των τσιπς που έρχεται σε άμεση επαφή με τον οίνο, σε σχέση με τα βαρέλια (Dimitriu 2019). Τέλος, τα chips μπορούν να εισαχθούν απευθείας στη δεξαμενή οίνου, παρέχοντας στους οινοποιούς μια ευέλικτη και οικονομικά αποδοτική επιλογή για την ενίσχυση της γεύσης και την παλαίωση (Dimitriu 2019).

Επιπλέον, αξιολογήθηκε από τους (Toulaki et al., 2023) η επίδραση του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά της ποικιλίας Ξινόμαυρο σε συνδυασμό με διάφορα ξυλοτεμαχίδια. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα τους, οίνος που περιείχε τεμάχια ξύλου μαύρης χαρουπιάς τα οποία υποβλήθηκαν σε παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο με διάρκεια παλμών 10 ms και διάστημα παλμών 100μs εμφάνισε ισχυρά πικάντικα αρώματα με μη ισορροπημένη οξύτητα, γεγονός που υποδηλώνει μια πιθανή ενίσχυση του αρωματικού προφίλ του οίνου, αλλά συνοδεύεται από μια αξιοσημείωτη ανισορροπία της οξύτητας. Το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο με διάρκεια παλμών 10ms και διάστημα παλμών 25μs, από την άλλη πλευρά, ενέτεινε τα αρώματα, ενώ συνέβαλε σε ένα στυπτικό, ξηρό τελείωμα, υποδεικνύοντας μια σύνθετη αλληλεπίδραση μεταξύ της επεξεργασίας με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο και των εγγενών χαρακτηριστικών του ξύλου μαύρης χαρουπιάς. Τα ροδάκινα, ιδίως με την επεξεργασία παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου με διάρκεια παλμών 10ms και διάστημα παλμών 25μs παρουσίασαν έναν αξιόπαινο συνδυασμό φρυγανισμένων αρωμάτων και μιας μακράς επίγευσης βανίλιας. Η ενίσχυση της επίγευσης βανίλιας υποδηλώνει μια πιθανή συνεργιστική επίδραση μεταξύ του ξύλου και του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, συμβάλλοντας σε μια εκτεταμένη αισθητηριακή εμπειρία. Τα θραύσματα

ξύλου αρκεύθου, ιδίως υπό παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο με διάρκεια παλμών 10ms και διάστημα παλμών 25μs και αυτά με διάρκεια παλμών 100ms και διάστημα παλμών 100μs, επέδειξαν έναν ενδιαφέροντα πλούτο σε τόνους ξύλου και μπαχαρικών μαζί με μια πλήρη αίσθηση στο στόμα και ισορροπημένη, παρατεταμένη επίγευση. Αυτό υποδηλώνει ότι το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να διευκόλυνε την εξαγωγή ενώσεων από το ξύλο αρκεύθου, συμβάλλοντας στη συνολική πολυπλοκότητα των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών του οίνου (Toulaki et al., 2023). Συνεπώς, η διαδικασία φρυγανίσματος των ξυλοτεμαχιδίων, όταν συνεργάζεται με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, μπορεί να προσδώσει επιθυμητές φρυγανισμένες νότες στον οίνο (Kielbasa et al 2021).

Οι Toulaki et al., 2024 διασαφήνισαν την επίδραση της επεξεργασίας με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο σε βασικές ενώσεις, όπως η αιθανόλη, η 3-μεθυλο-1-βουτανόλη, το 2-αμινο-4-μεθυλοβενζοϊκό οξύ, το καπροϊκό αιθυλεστέρα, η 2-φαινυλαιθανόλη, το οξικό βενζυλεστέρα, το διαιθυλο-σουκκινικό οξύ, το γ-τερπινένιο, το οξικό φαινυλεστέρα, η θυμόλη, η τριακετίνη και το δεκανοϊκό οξύ. Διαφορετικές συγκεντρώσεις αυτών των ενώσεων παρατηρήθηκαν σε διάφορες επεξεργασίες παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, γεγονός που αντανάκλα τη δυνατότητα της επεξεργασίας αυτής να διαμορφώνει τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του οίνου. Επιπλέον, τα αποτελέσματα υπογράμμισαν τη σημασία της επιλογής των ξυλοτεμαχιδίων στη διαμόρφωση της συνολικής αρωματικής και γευστικής πολυπλοκότητας του ερυθρού οίνου Ξινόμαυρο. Η αυξημένη συγκέντρωση ενώσεων όπως η 2-φαινυλαιθανόλη, το οκτανοϊκό οξύ, ο οξικός φαινυλικός εστέρας, η θυμόλη και το αζουλένιο (γνωστά για τη συμβολή τους στις ανθικές, φρουτώδεις και φαινολικές νότες) εμφανίζουν διακριτά μοτίβα με συγκεκριμένες επεξεργασίες παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου και τύπους ξυλοτεμαχιδίων. Η παρατηρούμενη αύξηση της συγκέντρωσης της 2-φαινυλαιθανόλης υποδηλώνει μια πιθανή ενίσχυση των ανθικών αποχρώσεων. Ο οξικός φαινυλοξυλικός εστέρας συμβάλλει στο συνολικό άρωμα, ενώ οι διακυμάνσεις του οκτανοϊκού οξέος υποδηλώνουν τη διαμόρφωση των λιπαρών και φρουτώδων αρωμάτων (Toulaki et al., 2024).

Τα ευρήματα προσφέρουν πολύτιμες γνώσεις για τους οινοποιούς που επιδιώκουν να βελτιστοποιήσουν τις παραμέτρους παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου και την επιλογή ξυλοτεμαχιδίων για την επίτευξη των επιθυμητών οργανοληπτικών αποτελεσμάτων, παρέχοντας μια βάση για μελλοντική έρευνα και εξελίξεις στον τομέα της οινοπαραγωγής. Αυτό το δυναμικό της τεχνολογίας παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου θα μπορούσε να υποστηρίξει τους οινοποιούς στην παραγωγή, σε λιγότερο χρόνο και με πολύ χαμηλότερο κόστος, αρωματισμένων οίνων με την προσθήκη νέων οργανοληπτικών χαρακτηριστικών που προέρχονται από διάφορα είδη ξύλου (π.χ. υπολείμματα ξύλου κλαδέματος) (Toulaki et al., 2023).

2.1.3 Επίδραση του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου στην παλαίωση άλλων ποτών

Εκτός από τον ερυθρό οίνο, το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την επιτάχυνση της ωρίμανσης των αποσταγμένων ποτών (Wang et al., 2022). Στη βιομηχανία των μπράντι, τα δρύινα βαρέλια χρησιμοποιούνται ευρέως για την αποθήκευση του μπράντι και τη βελτίωση της ποιότητάς του. Είναι ευρέως αναγνωρισμένο ότι ορισμένα φρέσκα αποστάγματα είναι ακατάλληλα για κατανάλωση λόγω της σκληρής τους γεύσης, της πικάντικης οσμής και ορισμένων πιθανών βλαβερών παρενεργειών (Zeng et al. 2008). Ως εκ τούτου, το φρέσκο απόσταγμα πρέπει να αποθηκεύεται σε δρύινο βαρέλι για πολλά χρόνια, προκειμένου να αποκτήσει ελκυστικό χρώμα, σύνθετο άρωμα, καθώς και αρμονική και άνετη αίσθηση στο στόμα (Zhang et al., 2013).

Η εκχύλιση των ενώσεων του ξύλου της δρυός στο μπράντι κατά τη διάρκεια της παλαίωσης σε βαρέλι έχει μεγάλη σημασία, καθώς αυτές μπορούν να τροποποιήσουν σημαντικά το άρωμα του μπράντι καθώς και την αίσθηση του στόματος. Είναι γνωστό ότι η γεωγραφική προέλευση και το είδος της δρυός και το καβούρδισμα του βαρελιού, καθώς και η καρύκευση και η ηλικία του βαρελιού που χρησιμοποιείται επηρεάζουν την ποσότητα των ενώσεων που μπορούν δυνητικά να εκχυλιστούν από τα δρύινα βαρέλια στο μπράντι (Schwartz et al., 2014). Η διαδικασία παλαίωσης του μπράντι σε βαρέλια από ξύλο δρυός περιλαμβάνει διάφορες διεργασίες, δηλαδή την εξαγωγή σύνθετων φαινολικών ουσιών όπως οι τανίνες από το ξύλο, τον αποπολυμερισμό των δομικών μορίων και την εξαγωγή τους στα αποστάγματα, καθώς και την εμφάνιση φυσικών και χημικών αντιδράσεων μεταξύ των συστατικών του ξύλου δρυός και των αποσταγμάτων. Οι διαδικασίες αυτές είναι πολύ σημαντικές για την ποιότητα του τελικού προϊόντος, όπως η γεύση, το άρωμα και το χρώμα που εκτιμούν οι καταναλωτές (Zhang et al., 2013).

Όταν το απόσταγμα έχει υποστεί επεξεργασία από το ηλεκτρικό πεδίο, το μπράντι μπορεί να αναπνεύσει μέσω της δομής των μικροπόρων του ξύλου δρυός κατά την περίοδο παλαίωσης. Αυτό σημαίνει ότι η διείσδυση κάποιας μικροσκοπικής ποσότητας οξυγόνου (περίπου 2-5 ml ανά λίτρο ανά έτος) στο μπράντι ενθαρρύνει την πραγματοποίηση κάποιων αντιδράσεων οξειδωσης-αναγωγής. Εν τω μεταξύ, ορισμένες επιβλαβείς πτητικές ουσίες, όπως η αλδεϋδη και το οξικό οξύ, εκλύονται προς τα έξω (Schwartz et al., 2014). Κατά την επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο, η συχνότητα μετάβασης και η εντροπία ενεργοποίησης των μορίων αυξήθηκαν και ο βαθμός ελευθερίας της διάχυσης των μορίων βελτιώθηκε. Στο μεταξύ, η ενέργεια ενεργοποίησης στη διαδικασία μεταφοράς μάζας μειώθηκε (Wang et al., 2023).

Η παλαίωση σε ξύλο δρυός επιτρέπει την εκχύλιση μιας σειράς βενζοϊκών και κινναμικών ενώσεων στο μπράντι. Οι ενώσεις αυτές περιλαμβάνουν βανιλίνη, βανιλινικό οξύ, συριγγαλδεϋδη, συριγγοϊκό οξύ, κωνοφερδεϋδη, γαλλικό οξύ και ελλαγικό οξύ. Η παλαίωση επιφέρει επίσης την τροποποίηση των φυσικών και χημικών παραμέτρων του μπράντι. Οι φαινόλες είναι ενώσεις του οίνου ή του μπράντι που επηρεάζουν το χρώμα, τη στυπτικότητα, την πικράδα, το επίπεδο οξειδωσης και διάφορες φυσικοχημικές μεταβολές κατά τη μακρά περίοδο παλαίωσής του, ενώ οι τανίνες είναι πολυφαινόλες που προσδίδουν στο φρέσκο οίνο στυπτικότητα και πικράδα, καθιστώντας το έτσι δυσάρεστο στη γεύση. Ωστόσο, οι κατάλληλες ποσότητες αυτών των ουσιών είναι επιθυμητές για το πλήρες σώμα και την ισορροπημένη δομή του οίνου υψηλής ποιότητας (Zhang et al., 2013). Υπάρχουν ορισμένες δυσάρεστες

ενώσεις στο μπράντι, όπως η ακεταλδεΐδη, η ακετάλη, καθώς και οι υψηλότερες αλκοόλες, οι οποίες έχουν έντονη ερεθιστική οσμή, ενώ η υπερβολική ποσότητα μπορεί να προκαλέσει αντιαισθητικά αποτελέσματα (Wang et al., 2023).

Κατά τη διάρκεια της παλαίωσης σε δρύινο βαρέλι, οι υδρολύσιμες τανίνες που εξάγονται από το ξύλο δρυός λόγω της λειτουργίας της αιθανόλης θα μπορούσαν να συμπυκνωθούν με άλλες ενώσεις, όπως πολυσακχαρίτες και πολυπεπτίδια, και να σχηματίσουν συμπυκνωμένες τανίνες. Η εκχύλιση πτητικών ενώσεων από το ξύλο αυξάνεται με το χρόνο παλαίωσης στο βαρέλι και είναι γενικά ταχύτερη κατά τον πρώτο μήνα. Όπως και με τις υπόλοιπες οικογένειες φαινολών, το μπράντι που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο παρουσίασε υψηλότερη συγκέντρωση αυτών (Schwartz et al., 2014). Οι συγγραφείς απέδειξαν ότι η μέχρι και 180 ημέρες η περιεκτικότητα όλων των εστέρων στο μπράντι που έχει υποστεί επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο αυξάνεται γραμμικά με το χρόνο παλαίωσης κατά την περίοδο ωρίμανσης σε δρυ. Αποδεικνύεται επίσης ότι, σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο απόσταγμα, η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου ενίσχυσε σημαντικά τον σχηματισμό εστέρων (Zhang et al., 2013). Οι συγγραφείς έδειξαν επίσης ότι η περιεκτικότητα σε αλκοόλη στο μπράντι που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο ήταν 11,1% χαμηλότερη από εκείνη στο αρχικό μπράντι μετά από 180 ημέρες ωρίμανσης. Διερευνήθηκε επίσης ότι η επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο μείωσε δραματικά την περιεκτικότητα σε αλκοόλη σε λιγότερο από 30 ημέρες (Schwartz et al., 2014).

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων τους έδειξαν ότι μετά την επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο, εκλύθηκαν περισσότερα ευεργετικά συστατικά από το δρύινο βαρέλι. Για παράδειγμα, η περιεκτικότητα σε τανίνες, ολικές φαινόλες, πτητικές φαινόλες (γαλλικό οξύ, πρωτοκατεχικό οξύ, βανιλίνη και συριγγοαλδεΐδη) καθώς και εστέρες (οξικός αιθυλεστέρας, γαλακτικό αιθυλεστέρας και καπρυλικός αιθυλεστέρας) είναι υψηλότερη σε σχέση με μη επεξεργασμένο μπράντι μετά από 180 ημέρες ωρίμανσης. Συνεπώς, η ποιότητα των τελικών προϊόντων δηλαδή χαρακτηριστικά της γεύσης, του αρώματος και του χρώματος που εκτιμούν οι καταναλωτές, βελτιώθηκε (Zhang et al., 2013).

Ωστόσο, η χρήση ηλεκτροδίων μπορεί να εισάγει μεταλλικά στοιχεία στο απεσταγμένο ποτό (Wang et al., 2022 , Zhang et al., 2013). Παρατηρήθηκε μεταφορά των συστατικών του ηλεκτροδίου κατά τη διάρκεια της εφαρμογής παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Το υλικό από ανοξείδωτο χάλυβα παράγει σημαντική μεταφορά Fe, Cr, Zn και Mn στα δείγματα μύρας που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο και προκαλεί σημαντική απώλεια στην αποδοχή της γεύσης και την αίσθηση του στόματος των προϊόντων. Γεγονός που αποτελεί μία από τις προκλήσεις για την επέκταση αυτής της τεχνολογίας για ποτά και μύρα με υψηλή περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα στο προϊόν. Για την προστασία της ποσότητας αερίου που βρίσκεται στη μύρα, η επεξεργασία με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο πρέπει να εφαρμόζεται υπό πίεση (Wang et al., 2022).

Το Baijiu χρειάζεται συνήθως μεγάλο χρόνο αποθήκευσης για παλαίωση (Jia et al., 2022), (Zhang et al., 2023), (Hong et al., 2021). Οι συγκεντρώσεις ολικού οξέος και ολικού εστέρα είναι οι σημαντικότερες παράμετροι του Baijiu. Μπορούν να καθορίσουν αν το baijiu έχει ποιότητα ή όχι. Τα ολικά οξέα και οι ολικοί εστέρες του baijiu από τρία διαφορετικά δείγματα διαφορετικής προέλευσης μετρήθηκαν και υπολογίστηκαν από τους συγγραφείς. Γενικά, οι μεταβολές στα ολικά οξέα και στους ολικούς εστέρες δεν ήταν μεγάλες, αλλά τα τρία δείγματα από διαφορετική προέλευση μεταβάλλονται σε διαφορετικό βαθμό μετά την επεξεργασία με

ηλεκτρικό πεδίο. Τα ολικά οξέα του baijiu από το Luzhou μειώθηκαν ελαφρώς από την επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο, ενώ δεν υπήρξε σημαντική αλλαγή στα δείγματα από το Qionglai και το Yibin. Όσον αφορά τη συγκέντρωση των ολικών εστέρων, αυξήθηκε και στους τρεις τύπους Baijiu μετά την επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο (Zhang et al., 2023). Ωστόσο, μικρές αλλαγές στους ολικούς εστέρες οξέων πριν και μετά την επεξεργασία αντανακλούσαν τις αλλαγές στη σύνθεση των ενώσεων σε αυτό, με αποτέλεσμα κάποιες διαφορές στη γεύση και την ποιότητα του Baijiu. Η φυσική διαδικασία παλαίωσης του Baijiu περιλαμβάνει οξείδωση και εστεροποίηση. Τα οξέα και οι αλκοόλες υφίστανται αντιδράσεις εστεροποίησης για να σχηματίσουν εστέρες. Η μείωση των ολικών οξέων και η αύξηση των ολικών εστέρων στα δείγματα Baijiu που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να υποδηλώνει ότι η επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο προωθεί τις αντιδράσεις εστεροποίησης στο Baijiu (Hong et al., 2021). Η αύξηση της περιεκτικότητας σε ολικό εστέρα σημαίνει αύξηση των κύριων πτητικών συστατικών γεύσης, γεγονός που διευκολύνει την απελευθέρωση των αρωμάτων Baijiu. Τα αποτελέσματα της οργανοληπτικής αξιολόγησης των συγγραφέων έδειξαν ότι ορισμένες συγκεκριμένες αλλαγές στη γεύση και την ποιότητα εμφανίστηκαν στο Baijiu μετά την επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο (Zhang et al., 2023). Κατά τη διάρκεια της φυσικής αποθήκευσης, η περιεκτικότητα των πτητικών ενώσεων στο Baijiu μειώνεται επίσης με μεγαλύτερο χρόνο αποθήκευσης. Το φρεσκοαποσταγμένο ακατέργαστο Baijiu περιέχει πολλές πτητικές ενώσεις, οι οποίες είναι συνήθως πικάντικες στη γεύση, με αποτέλεσμα να έχουν πικάντικη γεύση και off-flavor. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, οι ενώσεις αυτές εξατμίζονται αργά, με αποτέλεσμα τη μείωση της οσμής και την ομαλότερη γεύση (Peng et al., 2017).

Οι συγκεντρώσεις των διαφόρων πτητικών συστατικών στα δείγματα Baijiu πριν και μετά την επεξεργασία μελετήθηκαν από τους (Zhang et al., 2023). Οι συγκεντρώσεις των εστέρων και των οξέων αυξήθηκαν σε διαφορετικό βαθμό στα δείγματα μετά την επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο (Zhang et al., 2023). Οι αλδεΐδες και οι κετόνες μειώθηκαν μετά την επεξεργασία. (Hong et al., 2021). Οι αλλαγές που αναφέρθηκαν παραπάνω ήταν παρόμοιες με αυτές που συμβαίνουν κατά τη διαδικασία της φυσικής γήρανσης του Baijiu, κατά την οποία συντίθενται σταδιακά εστέρες λόγω αντιδράσεων οξείδωσης. Ταυτόχρονα, οι αλδεΐδες και οι κετόνες οξειδώνονται σε άλλες ενώσεις όπως οι αλκοόλες και τα οξέα (Jia, et al., 2022). Τέλος η συνολική ποσότητα των πτητικών συστατικών που ανιχνεύθηκαν στα δείγματα Baijiu που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο ήταν μεγαλύτερη από ό,τι στα μη επεξεργασμένα δείγματα (Zhang et al., 2023).

Τα ηλεκτρικά πεδία μπορούν επίσης να προωθήσουν τον ιονισμό των μορίων, να μειώσουν την ενέργεια ενεργοποίησης που απαιτείται για τις αντιδράσεις και να επιταχύνουν τους ρυθμούς των χημικών αντιδράσεων, όπως οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής, σύνδεσης, υδρόλυσης και εστεροποίησης (Ma et al., 2022). Μετά την επεξεργασία με τη χρήση παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου υψηλής τάσης, η περιεκτικότητα σε ολικά οξέα, εστέρες και αλδεΐδες στο ιαπωνικό απόσταγμα baijiu αυξήθηκε, ενώ η περιεκτικότητα σε ολική αλκοόλη μειώθηκε. Η γρήγορη λειτουργία, οι χαμηλές ή μη θερμικές απαιτήσεις και η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας καθιστούν τα ηλεκτρικά πεδία ιδανική μέθοδο για την παλαίωση αποσταγμένων ποτών (Lin et al., 2011). Ωστόσο, ο σχεδιασμός ενός κυκλωματικού συστήματος για την παλαίωση αποσταγμένων ποτών είναι πολύπλοκος και δαπανηρός (Wang et al., 2022).

2.2 Μικροκύματα

2.2.1 Τι είναι και εφαρμογές στην οινολογία

Τα μικροκύματα είναι μη ιονίζοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συχνότητας μεταξύ 300 MHz και 300 GHz παρόλο που, μόνο λίγες συχνότητες επιτρέπονται για βιομηχανικές, επιστημονικές και ιατρικές χρήσεις, οι οποίες γενικά είναι μεταξύ 0,915 και 2,45 GHz. Τα μικροκύματα μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλές διεργασίες τροφίμων για τη μείωση του χρόνου επεξεργασίας, ωστόσο η χρήση τους στη συντήρηση τροφίμων (λόγω των άμεσων αντιμικροβιακών επιδράσεων στους μικροοργανισμούς ή της δυνατότητας προώθησης της σύνθεσης μεγάλου αριθμού αντιμικροβιακών ενώσεων) προτείνεται σε μεγάλο βαθμό από την πρόσφατη επιστημονική βιβλιογραφία (Clodoveo et al., 2016 , García et al 2023).

Προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία παλαίωσης, τα τελευταία χρόνια έχουν διερευνηθεί νέες τεχνολογίες που αντικαθιστούν την παραδοσιακή ανάδευση ή "batonnage", αυξάνοντας την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας. Μεταξύ αυτών, η χρήση μικροκυμάτων θα μπορούσε να είναι πιο υποσχόμενη (Liu et al., 2016 , García et al 2023). Τα μικροκύματα όπως αναφέρθηκε πριν είναι μη ιονίζοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που προκαλούν αύξηση της ενέργειας στη μήτρα που παράγεται από μοριακή τριβή, κυρίως από την περιστροφή δίπολων και την ιοντική αγωγιμότητα, η οποία μπορεί να τροποποιήσει τις μοριακές δομές και να ευνοήσει τη μεταφορά ενώσεων (Clodoveo et al., 2016 , García et al 2023).

Για τον ίδιο σκοπό οι Zheng et al., 2011 πρότειναν μια μέθοδο στιγμιαίας ακτινοβολίας μικροκυμάτων για την επεξεργασία νεαρού ξηρού ερυθρού οίνου, κατά την αποθήκευση του οίνου για τη βελτίωση της γευστικής του ποιότητας. Διερεύνησαν τις επιδράσεις της ισχύος των μικροκυμάτων και της διάρκειας της ακτινοβολίας στην οργανοληπτική ιδιότητα του οίνου και διαπίστωσαν ότι η επεξεργασία με μικροκύματα είχε σημαντική επίδραση στη γεύση και τη συνολική βαθμολογία, αλλά δεν διαπιστώθηκε εμφανής επίδραση στην εμφάνιση, το άρωμα, την ανθεκτικότητα και τη συνολική αξιολόγηση (Zheng et al., 2011).

Καθώς η αλλαγή της δομής της ζύμης και ακόμη και η διάσπαση του κυτταρικού τοιχώματος της ζύμης θεωρείται ότι είναι επωφελής στην παλαίωση οι συγγραφείς μελέτησαν τις συμπληρωματικές επεξεργασίες για την περαιτέρω προώθηση της διάσπασης των κυτταρικών τοιχωμάτων και την επιτάχυνση της διαδικασίας γήρανσης, η θέρμανση, η ανάδευση και η χρήση ενός λειαντικού παράγοντα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω της ικανότητάς τους να συνδυάζονται με τις επεξεργασίες υπερήχων και μικροκυμάτων (Liu et al., 2016).

Όσον αφορά την αρχή της θέρμανσης με τη χρήση μικροκυμάτων αυτή βασίζεται στην άμεση επίδρασή τους σε πολικά υλικά/διαλύτες και διέπεται από δύο φαινόμενα: την ιοντική αγωγιμότητα και την περιστροφή δίπολου, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις συμβαίνει ταυτόχρονα. Η ιοντική αγωγιμότητα αναφέρεται στην ηλεκτροφορητική μετανάστευση των ιόντων υπό την επίδραση του μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου- η αντίσταση που προσφέρει το διάλυμα στη μετανάστευση των ιόντων δημιουργεί τριβή, η οποία τελικά θερμαίνει το διάλυμα (Hoz et al., 2005). Ενώ, η περιστροφή δίπολου ασχολείται με την αναπροσαρμογή των πολικών μορίων (από το διαλύτη ή το υλικό-στόχο) με το ταχέως μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο μικροκυμάτων, μετατρέποντας την ενέργεια σε θερμότητα. Επομένως, η θέρμανση είναι η μετατροπή της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε

θερμική ενέργεια μέσω της άμεσης αλληλεπίδρασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με τα μόρια του υλικού-στόχου (Klán et al., 2001, Hoz et al., 2005).

Στη συνέχεια, καθώς τα μικροκύματα εφαρμόζονται σε βιολογικό υλικό (όπως δείγματα σταφυλιών), τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα απορροφώνται επιλεκτικά από μέσα που διαθέτουν υψηλή διηλεκτρική σταθερά, με αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη θέρμανση. Η αυξημένη θερμοκρασία μπορεί να ξεπεράσει την αλληλεπίδραση διαλυμένης ουσίας-μητρικής ουσίας που προκαλείται από τις δυνάμεις van der Waals, τους δεσμούς υδρογόνου, τη διπολική έλξη των μορίων των διαλυμένων ουσιών και τα ενεργά κέντρα στη μητρική ουσία. Έτσι, η παρεχόμενη θερμική ενέργεια μπορεί να διαταράξει τις αλληλεπιδράσεις συνάφειας και προσκόλλησης (διαλυμένη ουσία-μήτρα), παρέχοντας την απαραίτητη ενέργεια ενεργοποίησης που απαιτείται για τη διαδικασία απορρόφησης. Η μεταφορά των μορίων από τη μήτρα στον διαλύτη επιτυγχάνεται επίσης με τις διαδικασίες διάχυσης και συναγωγής, μάλιστα, μετά τη διεύθυνση, τα μικροκύματα προκαλούν την έκρηξη των κυττάρων του σταφυλιού, απελευθερώνοντας γρήγορα το περιεχόμενό τους στην υγρή φάση. Όταν το υγρό απορροφά τα μικροκύματα, η κινητική ενέργεια των μορίων του αυξάνεται μαζί με τον ρυθμό διάχυσης (Mandal et al., 2007).

Όταν χρησιμοποιούνται για εκχυλιστικό σκοπό, οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τα μικροκύματα είναι: ο τύπος και ο όγκος του διαλύτη, ο χρόνος εκχύλισης, η ισχύς των μικροκυμάτων, τα χαρακτηριστικά της μήτρας και η θερμοκρασία. Η σωστή επιλογή του διαλύτη, με βάση τις διηλεκτρικές του ιδιότητες, είναι θεμελιώδης για την επίτευξη μιας βέλτιστης διαδικασίας εκχύλισης- ο τύπος του διαλύτη για μικροκύματα υπαγορεύεται από τη διαλυτότητα του αναλυτή-στόχου (π.χ. φυτική μήτρα) και την ικανότητά του να απορροφά μικροκύματα (Mandal et al., 2007). Ο όγκος του διαλύτη εκχύλισης είναι επίσης κρίσιμος παράγοντας- τυπικά, πρέπει να είναι επαρκής για να εξασφαλίζει την πλήρη εμβάπτιση της μήτρας κατά τη διάρκεια ολόκληρου του χρόνου ακτινοβολήσης. Αντίθετα, μια υψηλότερη αναλογία του όγκου του διαλύτη προς τη στερεή μήτρα μπορεί να είναι πιο αποτελεσματική στις συμβατικές μεθόδους εκχύλισης, αλλά μπορεί να αποδώσει χαμηλότερες ανακτήσεις με την τεχνική μικροκυμάτων λόγω ανεπαρκούς ανάδευσης του διαλύτη από τα μικροκύματα (Clodoveo et al., 2016).

Όσον αφορά το χρόνο εκχύλισης, γενικά, η αύξησή του αυξάνει την ποσότητα των αναλυτών που ανακτώνται, αν και υπάρχει ο κίνδυνος να συμβεί αποικοδόμηση- πράγματι, η εκχύλιση με τη βοήθεια μικροκυμάτων των πολυφαινολών και της καφεΐνης βρέθηκε να αυξάνεται μέχρι τα 4 λεπτά και στη συνέχεια να μειώνεται με το χρόνο εκχύλισης. Συνολικά, τα 15-20 λεπτά αποτελούν βέλτιστο χρόνο εκχύλισης, αλλά ακόμη και 40 δευτερόλεπτα έχουν αποδειχθεί εξαιρετικές ανακτήσεις. Η ισχύς των μικροκυμάτων και ο χρόνος ακτινοβολήσης είναι δύο τέτοιοι παράγοντες, οι οποίοι επηρεάζουν ο ένας τον άλλον σε μεγάλο βαθμό. Ο συνδυασμός χαμηλής ή μέτριας ισχύος με μεγαλύτερη έκθεση μπορεί να είναι μια σοφή προσέγγιση. Η ισχύς πρέπει να επιλέγεται σωστά για να αποφεύγεται η υπερβολική θερμοκρασία, η οποία θα μπορούσε να οδηγήσει σε αποικοδόμηση της διαλυμένης ουσίας και υψηλή πίεση στο εσωτερικό του δοχείου (Mandal et al., 2007).

Κατά την επεξεργασία των σταφυλιών, η τεχνολογία μικροκυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τη μείωση του χρόνου οινοποίησης και τη βελτίωση της συνολικής ποιότητας του οίνου (Clodoveo et al., 2016). Οι συγγραφείς απέδειξαν ότι η εκχύλιση με μικροκύματα, που εφαρμόζεται σε σταφύλια Pinot Noir, προσδιορίζει ταχεία εκχύλιση

φαινολικών ενώσεων στο χυμό σε σχέση με το μακρύ χρόνο εκχύλισης του ελέγχου και επιτρέπει τη διεξαγωγή της αλκοολικής ζύμωσης χωρίς τους φλοιούς. Επιπλέον, παρατήρησαν ότι τα δείγματα που επεξεργάστηκαν με μικροκύματα παρουσίασαν σημαντικά υψηλότερα επίπεδα φρουτώδους και ανθώδους αρώματος, ίσως λόγω της θερμικής αδρανοποίησης των ενζύμων και των τρανσφερασών που αποικοδομούν το άρωμα, αλλά και της απουσίας αυτής της εξάτμισης των αρωματικών ενώσεων (Carew et al., 2014). Οι ίδιοι συγγραφείς, θεωρώντας ότι τα σταφύλια Pinot noir έχουν ένα μοναδικό φαινολικό προφίλ, το οποίο μπορεί να επηρεάσει την εκχύλιση και τη σταθεροποίηση ενώσεων όπως οι ανθοκυανίνες και οι τανίνες, απέδειξαν ότι η επεξεργασία με μικροκύματα ευνόησε την εκχύλιση των πολυφαινολών από τα στερεά των σταφυλιών στο χυμό σταφυλιών, παρέχοντας σημαντικά υψηλότερες συγκεντρώσεις ολικών φαινολικών, ανθοκυανών, τανίνης και χρωστικής τανίνης (0,60 g/L) στον οίνο σε 18 μήνες παλαίωσης σε φιάλες, σε σύγκριση με τον οίνο ελέγχου (0,14 g/L). Επιπλέον, η επεξεργασία με μικροκύματα συσχετίστηκε επίσης με σημαντική και ταχεία μείωση του πληθυσμού των ενδογενών ζυμομυκήτων σταφυλιών και με μικρότερη φάση προσαρμογής στην αρχή της αλκοολικής ζύμωσης (Carew et al., 2015).

Οι Carew et al. 2014 πρότειναν την ελεγχόμενη απελευθέρωση φαινολικών ουσιών του Pinot noir με την επεξεργασία του γλεύκους σταφυλιών με μικροκύματα. Διαπίστωσαν ότι αυτή η προσέγγιση παράγει οίνους Pinot noir με πλουσιότερο χρώμα και υψηλότερη συγκέντρωση τανίνης, σε σύγκριση με τους οίνους που παρασκευάστηκαν με τη χρήση μιας τυπικής διαδικασίας ζύμωσης. Στους επεξεργασμένους οίνους, οι ανθοκυανίνες και οι τανίνες είχαν, αντίστοιχα, περίπου δύο και τρεις φορές, μεγαλύτερη συγκέντρωση και πιο έντονα αρώματα ποικιλιακών φρούτων και λουλουδιών, καθώς και μια πιο απαλή γεύση με υπέροχες τανίνες που καλύπτουν το στόμα, βρέθηκαν επίσης στους οίνους μετά από εκχύλιση με μικροκύματα (Carew et al., 2014).

Επιπλέον, η επεξεργασία με μικροκύματα είναι ικανή να καταστρέψει τους άγριους μικροοργανισμούς που είναι επικίνδυνοι για την ποιότητα του οίνου, και σήμερα ελέγχεται με την προσθήκη SO₂ στο γλεύκος ή στις δεξαμενές. Οι συγγραφείς ανέφεραν μια παστεριωτική επίδραση της ακτινοβολίας που εφαρμόζεται κατά τη σύνθλιψη των σταφυλιών, εμβολιάζοντας έτσι τους επιλεγμένους εκκινητές για τη διεξαγωγή της ζύμωσης χωρίς την προσθήκη SO₂ (Clodoveo et al., 2016). Χάρη στις αντιμικροβιακές επιδράσεις, τα μικροκύματα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν δυνητικά για την απολύμανση των δοχείων και των βαρελιών οίνου. Οι González et al. 2013 πρότειναν μια νέα εφαρμογή τεχνολογίας μικροκυμάτων που βασίζεται στη χρήση ενός νέου πρωτότυπου εξοπλισμού, ο οποίος εκμεταλλεύεται μικροκύματα υψηλής συχνότητας για τη μείωση του μικροβιακού πληθυσμού σε δρύινα βαρέλια οίνου. Παρατήρησαν μείωση κατά 36-38% για τις ολικές ζύμες (35 έως 67% για τους *Brettanomyces*) και περίπου 91-100% για τα βακτήρια γαλακτικού οξέος και τα βακτήρια οξικού οξέος, χρησιμοποιώντας πολύ σύντομο χρόνο επεξεργασίας (3 λεπτά). Τα ευρήματα αυτής της έρευνας έδειξαν ότι τα μικροκύματα θα ήταν επωφελή για την οينوβιομηχανία και το περιβάλλον, αυξάνοντας τη λειτουργικότητα των βαρελιών, μειώνοντας τη συχνότητα αντικατάστασης, βελτιώνοντας τον μικροβιολογικό έλεγχο του ξύλου δρυός, καθώς και ελαχιστοποιώντας τη χρήση συντηρητικών (González et al., 2013).

2.2.2 Επίδραση μικροκυμάτων στην παλαίωση του οίνου

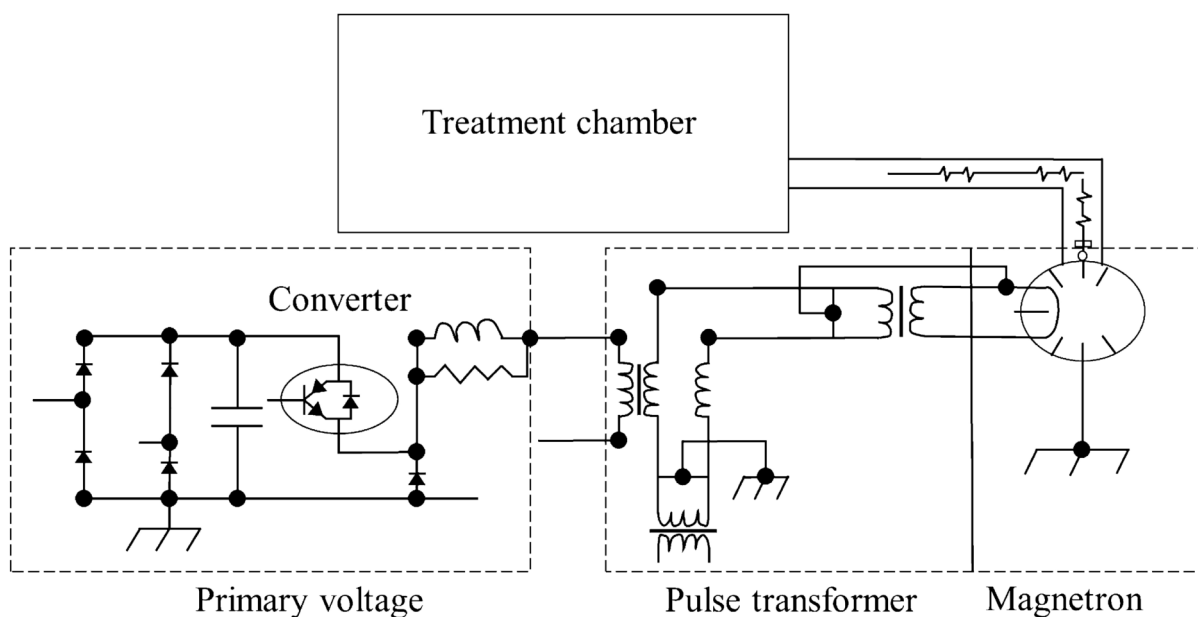
Η κατάλληλη ακτινοβολία με μικροκύματα (χαμηλότερη ισχύς και θερμοκρασία, κατάλληλος χρόνος) θα μπορούσε να επιταχύνει ορισμένες αντιδράσεις παλαίωσης στον ερυθρό οίνο που προχωρούν αργά στον μη επεξεργασμένο οίνο. Όπως γνωρίζουμε, η παλαίωση σε δρύινο βαρέλι μπορεί να αποφέρει άφθονα οφέλη και να βελτιώσει την ποιότητα του οίνου. Επομένως, ο συνδυασμός δρύινων βαρελιών και τεχνολογίας μικροκυμάτων μπορεί να είναι πιο ευνοϊκός για την παλαίωση του οίνου (Yuan et al., 2022). Η παλαίωση με μικροκύματα, ως νέα και πρακτική τεχνολογία, μπορεί να συντομεύσει τη παλαίωση και να βελτιώσει τις ιδιότητες του οίνου. Κατά τη διάρκεια της παλαίωσης οίνου με μικροκύματα, τα πολικά μόρια του οίνου μπορούν να πολωθούν στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο υψηλής συχνότητας, γεγονός που ευνοεί τον επανασυνδυασμό των αδιάλυτων μορίων και επιταχύνει τη διαδικασία αλκοολοποίησης. Από την άλλη πλευρά, ο οίνος, πλούσιος σε πολικά μόρια και λειτουργικές ομάδες, μπορεί να απορροφήσει την ενέργεια μικροκυμάτων και να μεταφερθεί σε ογκομετρική θερμότητα, γεγονός που αποτελεί πλεονέκτημα για τη διαδικασία παλαίωσης. Επιπλέον, τα μικροκύματα μπορούν επίσης να προκαλέσουν και να επιταχύνουν ορισμένες απαραίτητες χημικές αντιδράσεις για τη διαδικασία παλαίωσης του οίνου (Zheng et al., 2011).

Η τάση μεταβολής των χρωματικών χαρακτηριστικών των οίνων που έχουν υποστεί επεξεργασία με μικροκύματα και των μη επεξεργασμένων οίνων είναι πολύ παρόμοια. Οι ολικές φαινολικές ενώσεις, οι ολικές μονομερείς ανθοκυανίνες, οι κύριες ανθοκυανίνες, τα κύρια φλαβονοειδή και τα κύρια φαινολικά οξέα (γαλλικό οξύ, καφεϊκό οξύ, συριγγικό οξύ, (+)-κατεχίνη, Cy-3-glu, Mn-3-glu) παρουσίασαν επίσης παρόμοιες τάσεις μεταβολής κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Με άλλα λόγια, η ακτινοβολία μικροκυμάτων είχε μακροπρόθεσμη επίδραση στις χρωματικές ιδιότητες και τις κύριες φαινολικές ενώσεις του ερυθρού οίνου, αλλαγές που απαιτούν μακρόχρονη παλαίωση κατά την παραδοσιακή επεξεργασία. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η τεχνολογία των μικροκυμάτων, ως υποσχόμενη τεχνολογία τεχνητής παλαίωσης, θα μπορούσε σε σύντομο χρονικό διάστημα να παράγει ερυθρό οίνο παρόμοιας ποιότητας με την παραδοσιακή παλαίωση (Yuan et al., 2022).

Για το λόγο αυτό οι συγγραφείς μελέτησαν τις συγκεντρώσεις των κύριων φαινολικών ενώσεων στους ερυθρούς οίνους ανά δέκα ημέρες. Παρόλο που υπήρχαν κάποιες διακυμάνσεις στις περιεκτικότητες κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, η περιεκτικότητα σε γαλλικό οξύ αυξήθηκε ελαφρώς εντός των 70 ημερών, κάτι το οποίο μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το γαλλικό οξύ ήταν η συστατική μονάδα των πολυφαινολών και ορισμένες πολυμερισμένες φαινολικές ενώσεις υδρολύθηκαν κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης των ερυθρών οίνων, με αποτέλεσμα την αύξηση της περιεκτικότητας σε γαλλικό οξύ. Εν ολίγοις, οι τάσεις μεταβολής ήταν σύμφωνες με την αύξηση του γαλλικού οξέος που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Η συγκέντρωση του γαλλικού οξέος έχει θετική συσχέτιση με τη στυπτικότητα και η στυπτικότητα παίζει κρίσιμο ρόλο στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του οίνου (Zhang et al., 2017). Επιπλέον, το συριγγικό οξύ είναι ένα αποτελεσματικό συμπολυμερές, προϊόν αποικοδόμησης των συμπλόκων του 3-γλυκοζιδίου της μαλδιβίνης στον ερυθρό οίνο. Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, η αποικοδόμηση των συμπλόκων του 3-γλυκοζιδίου της μαλδιβίνης συνοδεύεται αναπόφευκτα από τη συσσώρευση συριγγικού οξέος (Zhao et al., 2013) και η περιεκτικότητα του συριγγικού οξέος αυξάνεται σταδιακά κατά τη διάρκεια της φυσικής παλαίωσης (Zhang et al., 2017). Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, η περιεκτικότητα του συριγγικού οξέος σε ερυθρό οίνο που υποβάλλεται σε επεξεργασία με

μικροκύματα είναι υψηλότερη από ό,τι στο μη επεξεργασμένο, και το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η επεξεργασία με μικροκύματα θα μπορούσε να προωθήσει την αποικοδόμηση των συμπλόκων του 3-γλυκοζιδίου της μαλδιβίνης, δηλαδή η τεχνολογία μικροκυμάτων θα μπορούσε να προωθήσει τη παλαίωση του ερυθρού οίνου (Yuan et al., 2022). Επιπλέον, η (+)-κατεχίνη, μια σημαντική φλαβάν-3-όλη στον ερυθρό οίνο ως συμπρωτεΐνη των ανθοκυανινών, διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στη σταθεροποίηση του χρώματος του οίνου (Puertolas et al., 2010). Οι συγγραφείς παρατήρησαν, μείωση της (+)-κατεχίνης σε όλα τα δείγματα οίνου γεγονός που θα μπορούσε να σχετίζεται με την επίδραση της συν-χρωστικής της με τις ανθοκυανίνες και μπορεί να είναι υπεύθυνη για τη σταθεροποίηση του χρώματος. Επίσης, η (+)-κατεχίνη θα μπορούσε να συνδεθεί με την ομάδα γέφυρας για να παράγει κατιόντα ξανθύλιου και τα κίτρινα προϊόντα οξειδωσης. Η περιεκτικότητα της (+)-κατεχίνης στο επεξεργασμένο με μικροκύματα ερυθρό οίνο είναι χαμηλότερη από εκείνη του μη επεξεργασμένου και αυτό το αποτέλεσμα έδειξε ότι η επεξεργασία με μικροκύματα θα μπορούσε να αυξήσει το χρώμα του οίνου, την ένταση του χρώματος και του δείκτη καφετιάσματος του ερυθρού οίνου. Συνεπώς αποδεικνύεται και πάλι ότι, τα μικροκύματα θα μπορούσαν να προωθήσουν τη γήρανση του ερυθρού οίνου (Yuan et al., 2022).

Οι κύριες ανθοκυανίνες στον ερυθρό οίνο είναι το 3-γλυκοζίδιο της κυανιδίνης και 3-γλυκοζίδιο της μαλδιβίνης. Γενικά, παρατηρείται μια τάση μείωσης των μονομερών αυτών κατά τη διάρκεια της παλαίωσης σε ερυθρό οίνο. Ως αποτέλεσμα της οξειδωσης, της αυτοαποικοδόμησης, της καθίζησης και του σχηματισμού σταθερών συμπλόκων ανθοκυανίνης, οι συγκεντρώσεις του 3-γλυκοζιδίου της κυανιδίνης και 3-γλυκοζιδίου της μαλδιβίνης μειώνονται κατά τη διάρκεια της παλαίωσης (Kanha et al., 2019). Επιπλέον οι συγγραφείς απέδειξαν ότι, η ακτινοβολία μικροκυμάτων μειώνει την περιεκτικότητα τους κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης του οίνου και όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος επεξεργασίας, τόσο ταχύτερος είναι ο ρυθμός μείωσης. Επιπλέον, ο σχετικά ταχύτερος ρυθμός μείωσης δείχνει ότι οι χημικές αντιδράσεις μπορεί να επιταχυνθούν με τον κατάλληλο χρόνο επεξεργασίας με μικροκύματα, με αποτέλεσμα τον ταχύτερο σχηματισμό του χρώματος του οίνου που είναι παρόμοιο με το χρώμα του φυσικά παλαιωμένου οίνου (Yuan et al., 2022). Οι μεταβολές των ανθοκυανινών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παλαίωσης χρησιμοποιήθηκαν ως βάση για την αξιολόγηση της χημικής ηλικίας του οίνου από φρούτα. Οι ελεύθερες ανθοκυανίνες θα μπορούσαν να συνδυαστούν με τις πολυφαινόλες και τους μεταβολίτες κατά τη διάρκεια της ζύμωσης για να σχηματίσουν πιο σταθερά παράγωγα ανθοκυανινών κατά τη διάρκεια της παλαίωσης. Ως εκ τούτου, η περιεκτικότητα σε παράγωγα ανθοκυανινών αυξήθηκε με την πάροδο του χρόνου παλαίωσης. Επιπλέον, σύμφωνα με τους συγγραφείς, τα ηδύποτα βατόμουρου υπό επεξεργασία με χαμηλή συχνότητα (50, 100 και 150 Hz) και με αποθήκευση για 75 ημέρες ήταν υψηλότερη από εκείνη των αρχικών οίνων που αποθηκεύτηκαν για 90 ημέρες. Αυτό υποδηλώνει ότι η επεξεργασία με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος συντομεύει το χρόνο και επιταχύνει τη γήρανση του ηδύποτου βατόμουρου. Η επίδραση με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος μπορεί να πολώσει τα πολικά μόρια στο σώμα του οίνου μέσω της στιγμιαίας υψηλής ενέργειας και του μαγνητικού πεδίου μικροκυμάτων για να σχηματίσει περισσότερους δεσμούς υδρογόνου μεταξύ αιθανόλης και νερού. Ταυτόχρονα, ευνοεί τον ανασυνδυασμό των αδιάλυτων μορίων. Ως αποτέλεσμα, το σώμα του οίνου παρουσιάζει το αποτέλεσμα της φυσικής γήρανσης. Οι Lukic et al., 2019 διαπίστωσαν ότι η επεξεργασία με υπερήχους υπό κατάλληλες συνθήκες μπορεί να επιταχύνει την αντίδραση γήρανσης του οίνου και να συντομεύσει τον κύκλο γήρανσης. Ομοίως, η επίδραση αυτή μπορεί επίσης να συντομεύσει τον χρόνο παλαίωσης του ηδύποτου βατόμουρου (Lukic et al., 2019).



Εικόνα 4: Διάταξη παλλόμενων μικροκυμάτων υψηλής ισχύος (Liu et al., 2024).

Αναφορικά με το ηδύποτο βατόμουρου, οι ελεύθερες ανθοκυανίνες μειώθηκαν σταδιακά και οι πολυμερισμένες ανθοκυανίνες συνέχισαν να αυξάνονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παλαίωσης του ηδύποτου βατόμουρου που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος. Ως αποτέλεσμα, η χημική ηλικία του οίνου αυξήθηκε σταδιακά. Ειδικότερα, η επεξεργασία με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος μπορεί να βελτιώσει τη χρωματική αξία του ηδύποτου βατόμουρου υπό συγκεκριμένες συνθήκες και να συντομεύσει τον κύκλο παλαίωσης, γεγονός που μπορεί να παρουσιάσει μια πιθανή συμβολή στη διαδικασία παλαίωσης (Li et al., 2020). Η τιμή της χρωματική πυκνότητα του ηδύποτου βατόμουρου σε διάφορα μήκη κύματος ($\lambda 420\text{nm}$, $\lambda 520\text{nm}$ και $\lambda 620\text{nm}$) σχετίζεται με το σχηματισμό παραγώγων ανθοκυανίνης. Η τιμή παρουσίασε φθίνουσα τάση κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Η συνθήκη επεξεργασίας παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος σε υψηλή συχνότητα (200 και 250 Hz) επιβράδυνε τη μείωση της τιμής χρωματικής πυκνότητας του ηδύποτου βατόμουρου. Πιθανώς οφείλεται στο ότι η παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος προώθησε τη δημιουργία παραγώγων ανθοκυανίνης (Liu et al., 2024).

Σχετικά με την περιεκτικότητα σε οξικό αιθυλεστέρα στα ηδύποτα βατόμουρου διαπιστώθηκε ότι οι οίνοι που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος στα 50 και 150 Hz έχουν υψηλότερη περιεκτικότητα από τους αρχικούς οίνους μετά από 45 ημέρες αποθήκευσης και η υψηλότερη περιεκτικότητα έφτασε τα 327,03 $\mu\text{g/ml}$ στα 150 Hz. Παράλληλα, η περιεκτικότητα του οκτανοϊκού αιθυλεστέρα είναι υψηλότερη από εκείνη του αρχικού οίνου υπό τις συνθήκες επεξεργασίας 150 και 250 Hz και η υψηλότερη περιεκτικότητα έφτασε τα 216 $\mu\text{g/ml}$ στα 150 Hz. Επιπλέον, μετά από 90 ημέρες αποθήκευσης, η περιεκτικότητα σε διαιθυλο-ηλεκτρικό οξύ στο ηδύποτο βατόμουρου που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος υπό διαφορετικές συνθήκες είναι υψηλότερη από εκείνη του αρχικού οίνου και η υψηλότερη περιεκτικότητα έφτασε τα 110,10 $\mu\text{g/ml}$ στα 50 Hz (Cai et al., 2020).

Παρόλο που η επίδραση με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος έχει διαλείπουσα δράση, εξακολουθεί να παράγει κάποια θερμικά αποτελέσματα. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μικροκυμάτων στην συγκεκριμένη επίδραση προώθησαν επίσης την οξείδωση και την εστεροποίηση του ηδύποτου βατόμουρου. Επιπλέον στα πειράματα των συγγραφέων, η περιεκτικότητα του οξικού πεντυλεστέρα στο ηδύποτο βατόμουρου που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος υπό διαφορετικές συνθήκες ήταν υψηλότερη από εκείνη στον αρχικό οίνο κατά τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης 90 ημερών. Τα αποτελέσματα αυτά έδειξαν ότι η επίδραση των παλλόμενων μικροκυμάτων υψηλής ισχύος στους εστέρες του ηδύποτου βατόμουρου είναι θετική και σταθερή (Liu et al., 2024). Επιπλέον, οι αλκοόλες με την κατάλληλη συγκέντρωση μπορούν να ενεργοποιήσουν το άρωμα των εστέρων και να προωθήσουν την αρμονία. Είναι σημαντικές αρωματικές ουσίες στα φρούτα και εκτός από την αιθανόλη, οι κύριες αλκοόλες στο ηδύποτο βατόμουρου είναι η ισοαμυλική αλκοόλη, η n-εξανόλη, και η φαινυλαιθανόλη. Μεταξύ αυτών, η φαινυλαιθανόλη είναι μια σημαντική αλκοόλη στο κρασί από βατόμουρα, η οποία έχει άρωμα τριαντάφυλλου και παράγεται από το μεταβολισμό των αμινοξέων και της γλυκόζης κατά την αλκοολική ζύμωση του ηδύποτου βατόμουρου (Anton et al. 2014). Κατά τους συγγραφείς, μετά από 45 ημέρες αποθήκευσης, η ολική αλκοόλη στο ηδύποτο βατόμουρου που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος ήταν χαμηλότερη από εκείνη του αρχικού οίνου. Πιθανώς οφειλόταν στο ότι τα παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος επιτάχυναν την αντίδραση εστεροποίησης στο ηδύποτο βατόμουρου. Μετά από 90 ημέρες αποθήκευσης, η περιεκτικότητα της φαινυλαιθανόλης στον οίνο που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος ήταν υψηλότερη από εκείνη του αρχικού οίνου και η υψηλότερη περιεκτικότητα φαινυλαιθανόλης ήταν 396,22 μg/ml στον οίνο που υποβλήθηκε σε επεξεργασία στα 250 Hz. Η ισοαμυλική αλκοόλη εξαφανίστηκε σταδιακά κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης (Synos et al., 2015).

Στο ηδύποτο από βατόμουρα, τα κύρια οξέα που ανιχνεύθηκαν ήταν το οξικό οξύ, το καπροϊκό οξύ και το οκτανοϊκό οξύ. Μετά από 45 ημέρες αποθήκευσης, η περιεκτικότητα σε ολικά οξέα του οίνου που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με διαφορετικές συχνότητες παλλόμενων μικροκυμάτων υψηλής ισχύος ήταν χαμηλότερη από εκείνη του αρχικού οίνου. Το εύρημα αυτό έδειξε ότι τα παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος θα μπορούσε να επιβραδύνει τον σχηματισμό οξέων στο ηδύποτο βατόμουρου. Το οξικό οξύ, το καπροϊκό οξύ και το οκτανοϊκό οξύ στο ηδύποτο βατόμουρου που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με παλλόμενα μικροκύματα υψηλής ισχύος υπό διαφορετικές συνθήκες ήταν χαμηλότερα από εκείνα του αρχικού οίνου (Liu et al., 2024).

Παρά τις θετικές επιδράσεις οι Zheng et al., 2011 διαπίστωσαν ότι η μεγάλη διάρκεια ακτινοβολήσης είχε αρνητική επίδραση στην εμφάνιση του οίνου. Αυτά τα αποτελέσματα της αξιολόγησης συμφωνούσαν με την περιεκτικότητα σε ανθοκυανίνες και την τιμή χρώματος. Ο λόγος είναι ότι το χρώμα του οίνου είναι ένας κύριος δείκτης αξιολόγησης της εμφάνισης, ενώ η σταθερότητα του χρώματος επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε τανίνη, η οποία θα μπορούσε να πολυμεριστεί με την ανθοκυανίνη. Στη χαμηλή ισχύ μικροκυμάτων, η μοριακή δομή παραμένει αμετάβλητη, αλλά έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του οίνου λόγω της συνεχούς απορρόφησης της ενέργειας μικροκυμάτων. Σύμφωνα με τη θεωρία Gibbs-Helmholtz, μια χημική αντίδραση μεταξύ της ανθοκυανίνης και της τανίνης θα συνέβαινε όταν η θερμοκρασία του οίνου υπερβαίνει τους 20 °C, η οποία προκαλεί την αλλαγή του χρώματος και της εμφάνισης (Zheng et al., 2011). Το άρωμα ήταν χαμηλότερο και

ακολουθείται από οξειδωμένη γεύση στην επεξεργασία 140 W/25 min και 420 W/25 min, η οποία έδειξε ότι η υπερβολική διάρκεια ακτινοβόλησης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ορισμένων οξειδώσεων. Στη συνθήκη επεξεργασίας 420 W/10 min, η ποσότητα αρώματος ήταν η υψηλότερη. Το άρωμα του ερυθρού οίνου εξαρτάται κυρίως από την περιεκτικότητα τόσο σε πτητικές αλκοόλες όσο και σε εστέρες του οίνου. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας οίνου με παλαίωση σε μικροκύματα, το δείγμα οίνου απορρόφησε ενέργεια μικροκυμάτων, η οποία επιτάχυνε σημαντικά την αντίδραση εστεροποίησης μεταξύ αιθανόλης και οξικού οξέος. Η μεταβολή του βαθμού εστεροποίησης εξαρτάται από τις διαφορετικές παραμέτρους επεξεργασίας που αφορούν σε ισχύ μικροκυμάτων και τη διάρκεια ακτινοβόλησης, οι οποίες προκάλεσαν τη διαφορά στο άρωμα. Τόσο η ισχύς των μικροκυμάτων όσο και η διάρκεια της ακτινοβόλησης δεν είχαν σημαντική επίδραση στη διάρκεια του αρώματος (Li et al., 2020).

Επιπλέον, η γεύση του οίνου εξαρτάται από το βαθμό των δεσμών υδρογόνου στον οίνο. Για το φρέσκο οίνο, ο βαθμός δεσμού υδρογόνου είναι χαμηλός μεταξύ των μορίων νερού και αιθανόλης, λόγω του ότι το μεγαλύτερο μέρος του μορίου αιθανόλης βρίσκεται σε ελεύθερη κατάσταση και είναι επιρρεπές στην απορρόφηση ενέργειας μικροκυμάτων. Η γεύση του οίνου που έχει ακτινοβοληθεί με μικροκύματα είναι πιο απαλή λόγω της διαδικασίας παλαίωσης με μικροκύματα που αυξάνει τον βαθμό του δεσμού υδρογόνου και μειώνει τον αριθμό της ελεύθερης κατάστασης των μορίων αιθανόλης. Συμπεραίνεται ότι το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει ως αποτέλεσμα τη σύγκρουση μεταξύ των μορίων του νερού και της αιθανόλης, η οποία διασπά το μακρομόριο σε μεμονωμένα μόρια κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας παλαίωσης με μικροκύματα. Αυτά τα μικρά μόρια επανασυνδέονται όταν η ακτινοβόληση με μικροκύματα υπερβαίνει μια ορισμένη δόση, η οποία μειώνει την ποσότητα του νερού σε ελεύθερη κατάσταση και των μορίων αιθανόλης και επιταχύνει τη διαδικασία παλαίωσης (Zheng et al., 2011).

Η επίδραση της ισχύος των μικροκυμάτων είναι σημαντική στη γεύση του ερυθρού οίνου ενώ η διάρκεια της ακτινοβόλησης δεν φαίνεται να έχει καμία επίδραση. Η ακτινοβολία μικροκυμάτων μπορεί να οδηγήσει στην αντίδραση συμπύκνωσης μεταξύ ανθοκυανίνης και τανίνης και να παράγει ένα πορτοκαλί-καφέ πολυμερές, το οποίο μπορεί να καλύψει την πικρή γεύση ορισμένων φαινολικών ενώσεων, οπότε η τανίνη έχει προφανή επίδραση στη γεύση για τον ερυθρό οίνο (Sendri et al., 2024)

Οι μηχανισμοί των ταχέως μεταβαλλόμενων φαινομένων θα πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω, ώστε να παραχθεί οίνος παρόμοιας ποιότητας με το παραδοσιακά παλαιωμένο προϊόν σε μικρότερο χρονικό διάστημα με τη χρήση της τεχνολογίας μικροκυμάτων. (Yuan et al., 2022).

2.2.3 Επίδραση μικροκυμάτων στην παλαίωση άλλων ποτών

Η παλαίωση με μικροκύματα χρησιμοποιεί πεδία μικροκυμάτων για την επιτάχυνση της παλαίωσης των φρέσκων αποσταγμένων ποτών με την έναρξη και επιτάχυνση διαφόρων χημικών αντιδράσεων σε ένα σύστημα πλούσιο σε οργανικά και ανόργανα συστατικά. Ο μηχανισμός της παλαίωσης με πεδίο μικροκυμάτων περιλαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά πεδία υψηλής συχνότητας που δημιουργούν πολικά μόρια στο αποσταγμένο ποτό και προκαλούν πόλωση του νερού, καθώς και τη μετατροπή των μικροκυμάτων σε θερμική ενέργεια που αυξάνει τη θερμοκρασία του σώματος του αποσταγμένου ποτού και στη συνέχεια επιταχύνει τις χημικές αντιδράσεις (Jia et al., 2022, Wang et al., 2022).

Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν μικροκύματα για την επιτάχυνση της παλαίωσης του φρέσκου baijiu και το επεξεργασμένο baijiu που προέκυψε είχε παρόμοιες γεύσεις με αυτό που παλαίωσε φυσικά για 3-4 μήνες φυσικής παλαίωσης. Τα αποτελέσματα των μελετών σχετικά με την επεξεργασία του baijiu με μικροκύματα έδειξαν ότι τα μικροκύματα μπορούν να επιταχύνουν τη μείωση του οξικού οξέος, της μεθανόλης και της ακεταλδεΐδης και να αυξήσουν την περιεκτικότητα του οξικού αιθυλεστέρα στο φρέσκο baijiu (Jiahui et al., 2021). Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε μη ικανοποιητική επεξεργασία και συνολική ποιότητα, ενώ οι υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε μεγαλύτερη εξάτμιση των ενώσεων και, στη συνέχεια, σε απώλεια αρώματος. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η βελτιστοποίηση της ισχύος των μικροκυμάτων, της θερμοκρασίας, του χρόνου επεξεργασίας και άλλων παραμέτρων στη διαδικασία (Wang et al., 2022). Η διαδικασία επεξεργασίας με μικροκύματα είχε πολύ σημαντική επίδραση στη σύνθεση του υγρού. Η συγκέντρωση των αλκοολών παρουσιάζει συνολικά αυξητική τάση. Οι συγκεντρώσεις της n-προπανόλης, της ισοαμυλικής αλκοόλης και της β-φαινυλαιθανόλης αυξήθηκαν περισσότερο μετά την επεξεργασία. Παράλληλα, οι συγκεντρώσεις της ακεταλδεΐδης και της ακετάλης μειώνονται σημαντικά. Όσον αφορά τους εστέρες, οι συγκεντρώσεις του οξικού αιθυλεστέρα και του γαλακτικού αιθυλεστέρα επίσης μειώνονται δραστικά. Οι συγκεντρώσεις άλλων ενώσεων παρέμειναν σχεδόν αμετάβλητες (Dai et al., 2021).

Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας με μικροκύματα είναι διαφορετικά από τα αποτελέσματα της επεξεργασίας με παλλόμενο πεδίο μικροκυμάτων. Μετά τη διαδικασία επεξεργασίας με μικροκύματα, οι συγκεντρώσεις των αλκοολών και των οξέων στο υγρό αυξάνονται, ενώ οι συγκεντρώσεις των εστέρων και των αλδεϋδών μειώνονται σημαντικά σύμφωνα με τους συγγραφείς. Οι συνολικές αρωματικές ενώσεις έχουν την τάση να μειώνονται μετά την επεξεργασία με μικροκύματα. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων των συγγραφέων προκύπτει ότι η διαδικασία επεξεργασίας με μικροκύματα μπορεί να οδηγήσει στην απώλεια των ιδιαίτερων αρωμάτων του κινέζικου λικέρ Baijiu (Hong et al., 2021).

Η σύνθετη επεξεργασία με παλλόμενο πεδίο μικροκυμάτων και μικροκύματα έχει σημαντική επίδραση σε ορισμένες ενώσεις του ποτού όπως στις αλκοόλες, τις αλδεϋδες και τους εστέρες. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η συνολική συγκέντρωση των αλκοολών αυξάνεται. Μεταξύ αυτών, η συγκέντρωση της n-εξανόλης και της β-φαινυλαιθανόλης είναι υψηλότερη, ενώ η συγκέντρωση της n-προπανόλης μειώνεται ελαφρώς. Όσον αφορά τις αλδεϋδες, η συγκέντρωση της ακεταλδεΐδης αυξάνεται κατά 29,057 mg/L, ενώ η συγκέντρωση της ακετάλης μειώνεται κατά 34,620 mg/L στα πειράματα των συγγραφέων. Για τους εστέρες, ο οξικός αιθυλεστέρας μειώνεται κατά 41,308 mg/L. Οι συγκεντρώσεις των άλλων ενώσεων δεν είχαν εμφανείς μεταβολές. Μετά τη σύνθετη επεξεργασία, η συνολική συγκέντρωση των αρωματικών ενώσεων στο υγρό αυξήθηκε. Μεταξύ αυτών, η συγκέντρωση διαφόρων

αλκοολών και οξέων αυξήθηκε, ενώ η συγκέντρωση εστέρων και αλδευδών δεν άλλαξε πολύ (Dai et al., 2021).

Τα κύρια συστατικά του αποστάγματος είναι το νερό και η αιθανόλη, και τα δύο αυτά συστατικά είναι εύκολο να σχηματίσουν δεσμούς υδρογόνου. Η δομή των δεσμών υδρογόνου των μορίων νερού-αιθανόλης στο κινεζικό λικέρ έχει μελετηθεί και μπορεί να επηρεαστεί από τη συγκέντρωση αλκοόλης, τα ιχνοστοιχεία και το χρόνο αποθήκευσης (Nose et al., 2006). Για τα αποσταγμένα οινοπνευματώδη ποτά, οι αλλαγές της δομής των δεσμών υδρογόνου έχουν θεωρηθεί ότι σχετίζονται με τη γεύση. Ωστόσο, δεν έχει γίνει εμπεριστατωμένη και συστηματική έρευνα για να αποκαλυφθεί η επιστημονική σχέση μεταξύ της δομής των δεσμών υδρογόνου και της γεύσης του αλκοολούχου ποτού. Παρόλα αυτά, είναι αναμφισβήτητο ότι η ανάλυση της δομής των δεσμών υδρογόνου είναι ένα αποτελεσματικό μέσο για την ανάπτυξη της τεχνολογίας τεχνητής παλαίωσης (Dai et al., 2021).

2.3 Υπέρηχοι

2.3.1 Τι είναι και εφαρμογή τους στην οινολογία

Οι υπέρηχοι υψηλής ισχύος είναι μια καινοτόμος τεχνολογία επεξεργασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους οίνους με πολλούς τρόπους. Για παράδειγμα, έχουν διεξαχθεί πολλές μελέτες σχετικά με τη χρήση των υπερήχων για τη σταθεροποίηση των μικροβίων στον οίνο και για την επιτάχυνση της διαδικασίας παλαίωσης των οίνων (García et al., 2013, Tao et al., 2014). Παρά τις προαναφερθείσες μελέτες, οι περισσότερες από τις διεξαχθείσες έρευνες σχετικά με την εφαρμογή των υπερήχων στην παραγωγή οίνου σχετίζονται με την επίδραση της τεχνολογίας στην εκχύλιση διαφόρων βιοδραστικών συστατικών όπως φαινολικά, φλαβονοειδή, τανίνες και άλλα που είναι υπεύθυνα για τον χρώμα και τη γεύση του οίνου (Zhang et al., 2017). Γενικά, όταν εφαρμόζεται σε έναν οίνο, η επίδραση με υπέρηχους προκαλεί τόσο φυσικές και χημικές επιδράσεις, οι οποίες αναμένεται να τροποποιήσουν τις φυσικοχημικές ιδιότητες και να βελτιώσουν την ποιότητα του προϊόντος κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Ωστόσο πρώτα απ' όλα, η εφαρμογή των υπερήχων θα πρέπει να εξασφαλίζει την διατήρηση των οργανοληπτικών ιδιοτήτων των οίνων και την αντιμικροβιακή επίδραση. Η αντικατάσταση των αντιοξειδωτικών και αντιμικροβιακών επιδράσεων του διοξειδίου του θείου (SO₂) είναι ακόμη δύσκολη στο να επιτευχθεί. Ωστόσο, ο συνδυασμός των υπερήχων μαζί με την προσθήκη αντιοξειδωτικών (μείωση του SO₂ και γλουταθειόνης) θα μπορούσε να είναι μια κατάλληλη πρακτική για την επίτευξη αυτού του σκοπού, ιδίως όσον αφορά τη σταθερότητα του οίνου κατά την παλαίωση (Tao et al., 2014).

Οι υπέρηχοι είναι ηχητικά κύματα με συχνότητες υψηλότερες από το ανώτερο ακουστικό όριο της ανθρώπινης ακοής (Fresno et al., 2019). Η τεχνική βασίζεται στην εφαρμογή μηχανικών ηχητικών κυμάτων με συχνότητες μεταξύ 20 kHz και 100 MHz που προκαλούν ακουστική σπηλαίωση σε υγρό μέσο. Οι έντονες κλίσεις πίεσης και θερμοκρασίας επιταχύνουν τις χημικές και φυσικές μεταβολές, προκαλώντας ρήξη των κυττάρων και επιτρέποντας μεγαλύτερη μεταφορά ύλης (García-Martín et al., 2016, García et al., 2023, Clodoveo et al., 2016). Τα κρουστικά κύματα που δημιουργούνται προάγουν μια κατάσταση δόνησης στο υγρό με συνεχείς μεταφορές θερμότητας και μάζας. Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά των υπερήχων είναι η δυνατότητα τους να ενισχύει την αυτοδιάλυση αυξάνοντας το ρυθμό και την έκταση της διάσπασης των κυττάρων της ζύμης (García et al., 2013). Επιπλέον, οι υπέρηχοι μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά την εκχύλιση των πολυσακχαριτών από ένα υδατικό διάλυμα των μυκήτων χωρίς να μεταβάλλεται το μοριακό τους βάρος. Επομένως, οι υπέρηχοι θα μπορούσαν να αποτελέσουν μια αξιόπιστη τεχνολογία για την επιτάχυνση της αυτολυτικής διαδικασίας των ζυμομυκήτων και την απελευθέρωση πολυσακχαριτών τροποποιώντας τη δομή του κυτταρικού τοιχώματος. Είναι σημαντικό να καθοριστεί η βέλτιστη συχνότητα και ο βέλτιστος χρόνος για την επεξεργασία με υπέρηχους (Liu et al., 2016).

Οι Liu et al., 2016 παρατήρησαν την ικανότητα των υπερήχων να επιταχύνουν τη λύση των ζυμομυκήτων και να αυξάνουν την απελευθέρωση των πολυσακχαριτών. Ωστόσο, αποδεικνύεται ότι η επίδραση του επιπέδου αλκοόλης στην απελευθέρωση των πολυσακχαριτών εξαρτάται επίσης από το χρησιμοποιούμενο στέλεχος, επιβεβαιώνοντας για άλλη μια φορά την πολυπλοκότητα της αυτολυτικής διαδικασίας (Liu et al., 2016).

Όπως έχει προαναφερθεί, η παλαίωση σε οινολάσπες είναι μια τεχνική για τη βελτίωση της αρωματικής και γευστικής πολυπλοκότητας του οίνου, κυρίως με τη βελτίωση του σώματός του και τη μείωση της στυπτικότητας. Ωστόσο, η αυτολυτική διαδικασία είναι αργή, με αποτέλεσμα υψηλό κόστος παραγωγής. Οι συγγραφείς αξιολόγησαν την επίδραση της προσθήκης οινολασπών με υπέρηχους και του συνδυασμού της με κομμάτια δρυός, ως νέα τεχνική για την επιτάχυνση της διαδικασίας παλαίωσης και τη βελτίωση της αρωματικής ποιότητας παλαιωμένου ερυθρού οίνου. Η διάσπαση των κυττάρων λόγω των υπέρηχων επαληθεύτηκε με οπτικό μικροσκόπιο από τους συγγραφείς. Τα αποτελέσματα έδειξαν αύξηση της περιεκτικότητας σε πολυσακχαρίτες κατά 20% και υποδηλώνουν αύξηση της αντιοξειδωτικής ικανότητας της οινολάσπης. Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στις ζυμωτικές πτητικές ενώσεις και στον ολικό δείκτη πολυφαινολών, εκτός από τους οίνους που ήρθαν σε επαφή με το ξύλο. Η επίδραση με υπέρηχους των οινολασπών είχε κάποια προστατευτική επίδραση στην ολική περιεκτικότητα σε ανθοκυανίνες, ωστόσο η ένταση του χρώματος ήταν σημαντικά χαμηλότερη στις επεξεργασίες με υπέρηχους. Η επίδραση δεν προκάλεσε κανένα ελάττωμα σε οργανοληπτικό επίπεδο. Επομένως, οι υπέρηχοι θα μπορούσαν να επιτρέψουν τη μείωση της προσθήκης SO₂ στον οίνο, καθώς και τη μείωση των χρόνων παλαίωσης (Fresno et al., 2019).

2.3.2 Επίδραση των υπερήχων στην παλαίωση των οίνων

Πρόσφατα, οι García et al., 2023 εξέτασαν την εφαρμογή των υπερήχων στις ποιοτικές ιδιότητες των ερυθρών οίνων. Επιπροσθέτως, οι συγγραφείς ανέφεραν ότι οι διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας με υπέρηχους επηρεάζουν τις χρωματικά χαρακτηριστικά και τροποποιούν σημαντικά την περιεκτικότητα των ολικών φαινολικών μέσω της διέγερσης των αντιδράσεων πολυμερισμού που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της φυσικής παλαίωσης του οίνου, χωρίς σημαντικές μεταβολές στις βασικές φυσικοχημικές παραμέτρους, όπως το pH, η ολική και πτητική οξύτητα (Ferraretto et al., 2016). Επιπλέον, ορισμένες μελέτες έδειξαν ότι οι υπέρηχοι επηρεάζουν την ηλεκτρική αγωγιμότητα του ερυθρού οίνου, προκαλούν τη δημιουργία ελεύθερων ριζών στον οίνο και προκαλούν αλλαγές στη σύνθεση του αρώματος του οίνου και στις οργανοληπτικές ιδιότητες (σχηματισμός οξειδωμένων αρωμάτων). Ωστόσο, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτές τις μελέτες δεν είναι ακόμη επαρκή για να συναχθεί πώς η χρήση διαφορετικών συστημάτων υπερήχων, όπως λουτρά υπερήχων ή καθετήρες εμφύσησης υπερήχων, θα μπορούσε να οδηγήσει σε διαφορετικές επιδράσεις στις ποιοτικές ιδιότητες του οίνου καθώς και στα χαρακτηριστικά του κατά την παλαίωση. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαία η περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης των διαφορετικών συστημάτων υπερήχων και των συνθηκών διεργασίας (δηλαδή της συχνότητας, της έντασης, της διάρκειας επεξεργασίας και της θερμοκρασίας) σε ένα ευρύτερο φάσμα ποιοτικών ιδιοτήτων του οίνου (Lukić et al., 2016).

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας με υπέρηχους, διάφορες φυσικές (σπηλαιώση και μικρομηχανικές κρούσεις) και χημικές επιδράσεις (σχηματισμός ελευθέρων ριζών και ιόντων) συμβαίνουν ταυτόχρονα ή ξεχωριστά και επηρεάζουν την ποιότητα του επεξεργασμένου μέσου. Επίσης, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η αύξηση της έντασης των υπερήχων, η οποία συσχετίζεται άμεσα με το πλάτος, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των χημικών αντιδράσεων (πιο βίαια κατάρρευση φυσαλίδων). Επιπλέον, οι παροδικές φυσαλίδες σπηλαιώσης είναι λιγότερο πολυάριθμες σε χαμηλές συχνότητες, γεγονός που ευνοεί τις φυσικές επιδράσεις αντί των χημικές. Από την άλλη πλευρά, οι υψηλότερες θερμοκρασίες προκαλούν αύξηση της πίεσης των ατμών, η οποία προκαλεί περισσότερες ατμούς διαλυτή να εισέλθουν στην κοιλότητα της φυσαλίδας και, κατά συνέπεια, η επίδραση των υπερήχων λόγω της λιγότερο βίαιης κατάρρευσης της φυσαλίδας μειώνονται. Η επίδραση των υπερήχων στον οίνο αποδίδεται κυρίως στην ακουστική σπηλαιώση που δημιουργεί τοπικές υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, και κατά συνέπεια προκαλεί χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν φυσιολογικά κατά την παλαίωση του οίνου (Chemat et al., 2017).

Όσον αφορά τις αλλαγές στις φαινολικές ενώσεις του οίνου, οι συγγραφείς παρατήρησαν ότι η συχνότητα των υπερήχων είναι η σημαντικότερη μεταβλητή που επηρέαζε τις συνολικές ελεύθερες ανθοκυανίνες, ενώ το πλάτος των υπερήχων έχει μεγαλύτερη επίδραση στις ολικές φλαβαν-3-όλες. Εκτός αυτού, το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης που οφείλεται σε αλληλεπίδραση μεταξύ των μεταβλητών στην φαινολική σύνθεση του επεξεργασμένου οίνου οφειλόταν στη συχνότητα επί τη θερμοκρασία λουτρού. Γενικά, μια υψηλότερη τιμή της συχνότητας είχε ως αποτέλεσμα χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ολικές ελεύθερες ανθοκυανίνες, ανεξάρτητα από τις άλλες μεταβλητές της διεργασίας. Παρομοίως, μια υψηλότερη συχνότητα υπερήχων μαζί με υψηλότερη θερμοκρασία λουτρού επίσης οδήγησε σε χαμηλότερη περιεκτικότητα φαινολικών ενώσεων. Έχει παρατηρηθεί από τους συγγραφείς

ότι η αποικοδόμηση των φαινολικών ενώσεων με υπερήχους εξαρτάται από τη συχνότητα και ότι η χαμηλή συχνότητα υπερήχων (20 kHz) δεν επηρεάζει τη σταθερότητα των φαινολικών. Επιπλέον, είναι γνωστό ότι η αποικοδόμηση της φαινόλης είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερες συχνότητες. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη περιεκτικότητα σε ολικά ελεύθερες ανθοκυανίνες παρατηρήθηκε από τους Lukić et al., 2016 σε συνθήκες 40% πλάτους, 37 kHz συχνότητα και 60 °C μετά από 50-65 λεπτά επεξεργασίας και ήταν η πιο κοντινή σε αυτό του μη επεξεργασμένου οίνου. Από την άλλη πλευρά, η υψηλότερη περιεκτικότητα σε ολικές φλαβαν-3-όλες επιτεύχθηκε σε πλάτος 100%, συχνότητα 80 kHz και 40 °C μετά από 90 λεπτά ηχητικής επεξεργασίας (Lukić et al., 2016). Μία παρόμοια συμπεριφορά παρατηρήθηκε επίσης από τους Zhang et al., 2016 για τους υπερήχους του ερυθρού οίνου Cabernet Sauvignon. Οι συγγραφείς πρότειναν ότι η υψηλή πτητικότητα του οίνου (λόγω της περιεκτικότητας σε αιθανόλη) προάγει το σχηματισμό ελεύθερων ριζών μέσω του φαινομένου της σπηλαιώσης η οποία με τη σειρά της προκαλεί οξειδωτική βλάβη, κυρίως των φαινολικών ενώσεων (Zhang et al., 2016). Οι συγγραφείς διαπίστωσαν πολυμερισμό των φαινολικών ενώσεων στον ερυθρό οίνο που προάγεται από υπερήχους σε χαμηλές ηχητικές πιέσεις. Ωστόσο, ορισμένες έρευνες υποδεικνύουν χαμηλότερο βαθμό χημικής αποσύνθεσης των φαινολικών ενώσεων όταν οι υπέρηχοι χρησιμοποιούνται ως μέθοδος εκχύλισης σε χαμηλές συχνότητες των 20-40 kHz σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες (Lukić et al., 2016).

Συνολικά, τα αποτελέσματα των συγγραφέων αποδεικνύουν ότι δεν υπάρχει σαφής τάση στη συνολική φαινολική σύνθεση σε διαφορετικά πλάτη και διάρκειες επεξεργασίας των υπέρηχων, το οποίο θα μπορούσε να οφείλεται σε ενισχυμένο πολυμερισμό/αποπολυμερισμό, συνχρωματισμό, ισομερισμό και αντιδράσεων αποσύνθεσης κατά τη διάρκεια της επίδρασης με υπερήχους. Έτσι, οι αλλαγές στη φαινολική σύνθεση είναι πιθανό να σχετίζονται με το ήδη αναφερθέν φαινόμενο της σπηλαιώσης, το οποίο πυροδοτεί αντιδράσεις οξείδωσης στους οίνους (οι φαινόλες οξειδώνονται σε κινόνες, ενώ το οξυγόνο ανάγεται σε υπεροξείδιο του υδρογόνου) (García-Martín et al., 2016). Σπηλαιώση παρήγαγε επίσης μια ποικιλία χημικών αντιδράσεων από τις ελεύθερες ρίζες που δημιουργούνται και που θεωρείται η κύρια αιτία της υποβάθμισης των φαινολικών ενώσεων. Από την άλλη πλευρά, οι Ferraretto et al., 2016 διαπίστωσαν ότι οι ελεύθερες ανθοκυανίνες στους ερυθρούς οίνους δεν τροποποιήθηκαν από τους υπερήχους σε επεξεργασία (200W εξόδου, 20 kHz, καθετήρας 13mm, 30-90%, 1-5 λεπτά), ενώ οι υψηλότερες συνθήκες επεξεργασίας (υψηλότερα πλάτη και μεγαλύτερη διάρκεια εκθέσεις) είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση των φλαβαν-3-ολών, δηλαδή των μονομερών κατεχινών. Η πιθανή εξήγηση για την αύξηση των κατεχινών είναι ότι η επεξεργασία με υπερήχους προάγει τον αποπολυμερισμό και τις αντιδράσεις ανασυνδυασμού των φαινολικών ενώσεων. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης υποδηλώνουν επίσης ότι η εφαρμογή της μεθόδου με κατάλληλες συνθήκες διεργασίας μπορεί να επιταχύνει στον οίνο αντιδράσεις παλαιώσης (Ferraretto et al., 2016).

Ομοίως πολλές μελέτες έχουν αποδείξει ότι η επεξεργασία με υψηλής πίεσης υπερήχους με τη χρήση αισθητήρα υπερήχων έχει υψηλότερη και εντοπισμένη ένταση σε σύγκριση με την επίδραση με χρήση λουτρού υπερήχων, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη ένταση υπερήχων ή σπηλαιώσης και ανομοιόμορφη κατανομή των υπερήχων. Γενικά, τα υψηλότερα πλάτη μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλότερες εντάσεις, οι οποίες μπορούν να προωθήσουν ορισμένες ανεπιθύμητες επιδράσεις (ένωση και αποικοδόμηση). Αλλά επίσης, τα υψηλότερα πλάτη μπορούν να προκαλέσουν διάβρωση του αισθητήρα υπερήχων, οδηγώντας σε ανάδευση αντί για σπηλαιώση και σε μία αδύναμη κατανομή των υπερήχων μέσω του επεξεργασμένου

μέσου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν στα πειράματα των συγγραφέων είναι απαραίτητο να αποφεύγεται ακραίες συνθήκες διεργασίας (δηλαδή συχνότητα, πλάτος, επεξεργασία διάρκεια) προκειμένου να διατηρηθεί η φαινολική σύνθεση του οίνου (Chemat et al., 2017).

Όσον αφορά τις φαινολικές ουσίες οι συγγραφείς μελέτησαν επίσης, τα αποτελέσματα της επεξεργασίας με υψηλή ισχύ υπέρηχους μαζί με την προσθήκη αντιοξειδωτικών (SO₂ και GSH) στη φαινολική, χρωματική και αρωματική σύνθεση των ερυθρών οίνων κατά τη διάρκεια 6 μηνών αποθήκευσης στις φιάλες. Παρόλο που οι παράμετροι που αναλύθηκαν επηρεάστηκαν από την περιεκτικότητα και τον τύπο των αντιοξειδωτικών που χρησιμοποιήθηκαν, μπορεί να παρατηρηθεί μια γενική τάση για όλους τους οίνους. Όπως φαίνεται, υπάρχει μια τάση μείωσης της περιεκτικότητας ολικών ελεύθερων ανθοκυανών και ολικών φλαβαν-3-ολών με την πάροδο του χρόνου. Μετά από 3 και 6 μήνες παλαίωσης, παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών μεταχειρίσεων, υποδεικνύοντας ότι η επεξεργασία με υπέρηχους υψηλής ισχύς επηρέασε τόσο τις ολικές όσο και τις επιμέρους φαινολικές ενώσεις. Συγκεκριμένα, μετά από 6 μήνες αποθήκευσης τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε υπέρηχους παρουσίασαν σημαντικά χαμηλότερη περιεκτικότητα σε φαινολικές ενώσεις σε σύγκριση με τα μη επεξεργασμένα (Lukić et al., 2016).

Είναι ήδη γνωστό ότι η περιεκτικότητα των φαινολικών ενώσεων μειώνεται κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης λόγω της πιθανής χημικής οξείδωσής τους. Εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη πληροφοριών στην επιστημονική βιβλιογραφία σχετικά με την επίδραση των υπερήχων στη σύνθεση του αρώματος του οίνου, ιδίως σε σημαντικές ομάδες αρωμάτων, όπως οι ανώτερες αλκοόλες, τα λιπαρά οξέα και τα τερπένια (Chemat et al., 2017). Επιπλέον, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών επεξεργασιών των δειγμάτων οίνου, που σημαίνει ότι η επεξεργασία με υψηλή ισχύ υπερήχων δεν επηρέασε τους ολικούς εστέρες, τις ολικές ανώτερες αλκοόλες και τα ολικά τερπένια των οίνων αμέσως μετά την επίδραση καθώς και καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου αποθήκευσης. Ωστόσο, οι οίνοι δεν είχαν καμία σχέση με το αποτέλεσμα της δοκιμής, μετά από 6 μήνες αποθήκευσης τα δείγματα που υποβλήθηκαν σε υπέρηχους παρουσίασαν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε συγκεντρώσεις ολικών λιπαρών οξέων σε σύγκριση με το μη επεξεργασμένο οίνο, υποδεικνύοντας ότι η επεξεργασία επηρέασε αυτή την ομάδα αρωματικών συστατικών (Lukić et al., 2016).

Εκτός αυτού, η επίδραση της προσθήκης αντιοξειδωτικών (SO₂ και GSH) δεν ήταν αξιοσημείωτη στην περιεκτικότητα σε ολικούς εστέρες, ολικές ανώτερες αλκοόλες και ολικών τερπενίων, ενώ η υψηλότερη συγκέντρωση αντιοξειδωτικών (SO₂ και GSH) οδήγησε σε οίνους με υψηλότερη περιεκτικότητα σε ολικά λιπαρά οξέα. Επιπλέον, αναφέρθηκε ότι η GSH σε συνδυασμό με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε SO₂ θα μπορούσε να επιβραδύνει το ρυθμό οξείδωσης των αρωματικών ενώσεων, όπως οι πτητικές θειόλες, μονοτερπένια και εστέρες (Lukić et al., 2016).

Επίσης παρατηρείται ότι, το χρώμα του οίνου και η χρωματική πυκνότητα των επεξεργασμένων οίνων είναι σημαντικά υψηλότερα από τους μη επεξεργασμένους οίνους, επιπλέον, όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος υπέρηχων, τόσο υψηλότερη είναι η αύξηση του χρώματος και της χρωματικής πυκνότητας κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Δηλαδή, η ακτινοβολία με υπέρηχους θα μπορούσε να προβάλλει σημαντικά το χρώμα του ερυθρού οίνου, και αυτό μπορεί να οφείλεται στις τοπικές στιγμιαίες υψηλές θερμοκρασίες και τις

υψηλές πιέσεις που δημιουργούνται από την ακουστική σπηλαιώση, οι οποίες μπορούν να προάγουν ελεύθερες ρίζες και αλυσιδωτές αντιδράσεις που οδηγούν στις πιο έγχρωμες χρωστικές ουσίες (Zhang et al., 2016).

Όπως αναφέρθηκε πριν οι φαινολικές ενώσεις οξειδώνονται κατά την παλαίωση. Ο δείκτης μαυρίσματος αντιπροσωπεύει το βαθμό μαυρίσματος, ο οποίος συνδέεται στενά με μια σειρά πολύπλοκων αντιδράσεων οξειδοαναγωγής που συνήθως λαμβάνουν χώρα κατά την παλαίωση του οίνου. Ο δείκτης μαυρίσματος στους υπερηχητικά επεξεργασμένους οίνους όσο και στους μη επεξεργασμένους οίνους αυξάνεται βαθμιαία κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Συγκεκριμένα, όσο περισσότερο διαρκεί ο υπερηχητικός χρόνος, τόσο υψηλότερο είναι ο δείκτης μαυρίσματος του οίνου, ο οποίος είναι παρόμοιος με τη μεταβολή τάση του χρώματος και της χρωματικής πυκνότητας κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης. Γενικά, επικρατεί η μη ενζυμική οξειδωτική αμαύρωση κατά την αποθήκευση του οίνου, η οποία αποδίδεται κυρίως σε μια σειρά από πολύπλοκες αντιδράσεις που μπορούν να παράγουν καφέ χρωστικές ουσίες που αυξάνουν το δείκτη μαυρίσματος και την ένταση του χρώματος (Kallithraka et al., 2009). Συγκριτικά, η αύξηση του δείκτη μαυρίσματος στους οίνους που έχουν υποστεί επεξεργασία με υπερήχους είναι υψηλότερη και πιθανόν να οφείλεται στις ελεύθερες ρίζες που προκαλούνται από τους υπερήχους, οι οποίες είναι οι πιο σημαντικοί εκλυτικοί παράγοντες για την έναρξη ορισμένων χημικών αλυσιδωτών αντιδράσεων που σχετίζονται με τον χρωματισμό στον ερυθρό οίνο, δηλαδή, αυτή η αύξηση του δείκτη μαυρίσματος από τους υπερήχους δείχνει ότι η ακτινοβολία με υπερήχους μπορεί να επιταχύνει ορισμένες συγκεκριμένες χημικές αντιδράσεις και να εμπλουτίσει τα συστατικά του οίνου (Zhang et al., 2017).

Η ακτινοβολία με υπερήχους θα μπορούσε επίσης να προωθήσει το σχηματισμό κίτρινου χρώματος που αντανάκλα τη συσσώρευση χρωστικών κατιόντων ξανθυλίου που προέρχονται από την (+)-κατεχίνη (García-Martín et al., 2016). Στα πειράματά τους οι συγγραφείς επιβεβαίωσαν επίσης ότι οι υπέρηχοι θα μπορούσαν να ενισχύσουν τη δημιουργία κατιόντων ξανθυλίου και των αιθυλεστέρων και, κατά συνέπεια, να συμβάλουν στο σχηματισμό του κίτρινου χρώματος του πρότυπου οίνου. Επιπλέον, όταν ο πρότυπος οίνος εκτίθεται σε υπερήχους κάθε δεύτερη ημέρα, παρατηρείται ότι η ίδια συγκέντρωση των ενώσεων ξανθυλίου δημιουργείται σε μικρότερο χρονικό διάστημα καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος σε σύγκριση με οίνο που δεν υποβλήθηκε σε επεξεργασία. Ως εκ τούτου, ο μέσος ρυθμός δημιουργίας του ξανθυλίου θα μπορούσε επίσης να ενισχυθεί. Επιπλέον, η σημαντική ενίσχυση της χρωστικής ουσίας που ξεκίνησε από τους υπερήχους κάθε δευτερόλεπτο υποδηλώνουν ότι η σχετική μακροχρόνια επεξεργασία με υπερήχους έπαιξε κρίσιμο ρόλο στην επιτάχυνση της παραγωγής των ενώσεων ξανθυλίου στον πρότυπο οίνο, οι οποίες θα μπορούσαν να παραχθούν φυσικά κατά τη διάρκεια της παλαίωσης (Fu et al., 2018).

Λαμβάνοντας υπόψη τη μεγάλη επιρροή του οξυγόνου στην ωρίμανση του οίνου, είναι απαραίτητο να διερευνηθεί η επίδραση των υπερήχων σε συνδυασμό με την πρόσληψη οξυγόνου στο σχηματισμό κατιόντων ξανθυλίου (García-Martín et al., 2016). Σύμφωνα με τους συγγραφείς δημιουργήθηκαν περισσότερα κατιόντα ξανθυλίου στους πρότυπους οίνους που αερίστηκαν μόνο σε σύγκριση με εκείνους που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία μόνο με υπερήχους, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αναπλήρωση επαρκούς ποσότητας οξυγόνου είναι πιο κρίσιμη για τη δημιουργία των κίτρινων χρωστικών ουσιών εάν η αρχική περιεκτικότητα σε οξυγόνο είναι ανεπαρκής. Επιπλέον, οι επεξεργασμένοι με υπερήχους πρότυποι οίνοι με αναπλήρωση οξυγόνου εμφάνισαν μια κοντινή συγκέντρωση ξανθυλίου που παράγεται σε πρότυπους οίνους με επαρκές οξυγόνο με την ίδια συνθήκη υπερήχων, η οποία είναι σημαντικά

υψηλότερη από εκείνους που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία μόνο με υπερήχους. Θα μπορούσε να συναχθεί ότι η επίδραση των υπερήχων στις αντιδράσεις μπορεί να είναι εξασθενημένη ή περιορισμένη λόγω της έλλειψης οξυγόνου (Fu et al., 2018). Γενικά, τα μόρια του οξυγόνου μετατρέπονταν σε άλλα οξειδωτικά είδη, όπως οι υπεροξειδικές ρίζες καθώς και υπεροξειδίο του υδρογόνου όταν εκτίθεται σε υπερήχους σε υδατικό διάλυμα. Ορισμένα από αυτά θα μπορούσαν να προωθήσουν την αντίδραση Fenton ή να συμμετάσχουν στα στάδια οξείδωσης που περιλαμβάνουν το σχηματισμό των κίτρινων χρωστικών ουσιών (Kidak et al., 2006).

Στην περίπτωση αυτή, ωστόσο, λόγω της επίδρασης απαέρωσης των υπερήχων, ορισμένες φυσαλίδες και πυρήνες σπηλαιώσης θα συμπιέζονταν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας με υπερήχους, μειώνοντας την ποσότητα του διαλυμένου οξυγόνου στο πρότυπο οίνο και εμποδίζοντας τη δημιουργία αυτών των οξειδωτικών ειδών, επηρεάζοντας κατά συνέπεια τη συσσώρευση των κατιόντων ξανθυλίου σε συνθήκες έλλειψης οξυγόνου (Fu et al., 2018).

Η εφαρμογή της τεχνολογίας υπερήχων στον οίνο έχει αξιοποιηθεί ελάχιστα και αυτή είναι η πρώτη μελέτη σχετικά με την απελευθέρωση ενώσεων που σχετίζονται με τη δρυ από τα κομμάτια δρυός στο σύστημα οίνου υπό επεξεργασία υπέρηχων. Δεδομένου ότι η σύνθεση του οίνου είναι σημαντικά πολύπλοκη και η κινητική της εκχύλισης των ενώσεων που σχετίζονται με τη δρυ από τα κομμάτια δρυός εξαρτάται επίσης από τη σύνθεση του οίνου θα πρέπει να διεξαχθούν περισσότερες μελέτες για τη διερεύνηση της κινητικής συμπεριφοράς της έκπλυσης των φαινολικών σε διάφορους οίνους (Karvela et al., 2008). Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η επεξεργασία με υπερήχους σε κατάλληλες συνθήκες μπορεί να τροποποιήσει θετικά τη σύνθεση του οίνου, συντομεύοντας έτσι τον χρόνο παλαίωσης του οίνου, ενώ η επεξεργασία με ακατάλληλο τρόπο μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ποιότητας του οίνου (Pingret et al., 2013 , Tao et al., 2014).

2.3.3 Επίδραση των υπερήχων στην παλαίωση άλλων ποτών

Όπως έχει αναφερθεί πιο πριν, κατά τη διάρκεια της παλαίωσης του μπράντι, λαμβάνουν χώρα πολλές φυσικοχημικές διεργασίες που αφορούν το αποσταγμένο ποτό και το ξύλο των βαρελιών (Zhang et al., 2013). Λόγω αυτών των αντιδράσεων, η περιεκτικότητα των μπράντι σε πολυφαινόλες και η περιεκτικότητά τους σε οργανικά οξέα αυξάνεται με την παλαίωση. Οι αντιδράσεις αυτές είναι αργές και η παλαίωση των μπράντι υψηλής ποιότητας διαρκεί αρκετά χρόνια (Schwartz et al., 2014). Στη μελέτη των συγγραφέων πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη ενός συστήματος που χρησιμοποιεί την κυκλοφορία του αποστάγματος οίνου μέσω έγκλειστων τεμαχίων αμερικανικής δρυός και την εφαρμογή ενέργειας υπερήχων με σκοπό την παραγωγή παλαιωμένων αποσταγμάτων οίνου και μετρήθηκαν οι επιδράσεις των μεταβλητών λειτουργίας στα χαρακτηριστικά του παραγόμενου ποτού (Delgado-González et al., 2017).

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι υψηλότερες ισχύς των υπερήχων, σχεδόν 40 W/L, σε συνδυασμό με την κίνηση του ποτού, βελτιώνουν την εκχύλιση των φαινολικών ενώσεων κατά 33,94%, μετά από επτά ημέρες παλαίωσης. Στη συνέχεια, διαπιστώθηκε ότι το καλύτερο απόσταγμα που παράγεται με αυτή τη μέθοδο παλαίωσης προκύπτει με υψηλό αλκοολικό τίτλο του αποσταγμένου οίνου και μεγάλη ποσότητα δρύνων τεμαχίων, καθώς και με θερμοκρασία δωματίου και υψηλό ρυθμό ροής. Επιπλέον, η παρουσία οξυγόνου στο δείγμα και η απουσία φωτός αυξάνουν την ποιότητα του παραγόμενου αποστάγματος. Τέλος, η εφαρμογή ενέργειας υπερήχων σε μεγάλους παλμούς σχετίζεται με τη βελτίωση δύο σημαντικών δεικτών παλαίωσης: της έντασης του χρώματος και του δείκτη ολικών πολυφαινολών. Ωστόσο, η απόχρωση δεν επηρεάζεται σημαντικά από την επεξεργασία με υπέρηχους. Η απόχρωση είναι μια χρωματική παράμετρος που επηρεάζεται μόνο από την απορρόφηση των ενώσεων και δεν επηρεάζεται από τη συγκέντρωσή τους. Η οργανοληπτική ανάλυση των παλαιωμένων δειγμάτων έδειξε ότι τα παλαιωμένα αποστάγματα είχαν καλύτερες βαθμολογίες από το αρχικό αποσταγμένο οίνο (Delgado-González et al., 2017).

Οι υπέρηχοι μπορούν επίσης να παράγουν ελεύθερες ρίζες κατά το στάδιο της σπηλαίωσης του διαλύτη. Η επίδραση με υπέρηχους καθαρού νερού παράγει υδροξύλιο και υπεροξείδιο του υδρογόνου. Αυτό μπορεί να προκαλέσει άλλα οξειδωτικά είδη, τα οποία συμμετέχουν σε ορισμένες διαδικασίες εκχύλισης που βασίζονται σε αντιδράσεις οξειδωσης, όπως η παλαίωση του οίνου και του μπράντι σε ξύλινα βαρέλια (Kidak et al., 2006). Βρέθηκαν από τους Delgado-González et al., 2017 υψηλότερες τιμές ολικών φαινολικών ενώσεων στα εκχυλίσματα που προέκυψαν από την εκχύλιση με υπέρηχους σε σχέση με εκείνα που προέκυψαν από τη συμβατική εκχύλιση (Delgado-González et al., 2017). Άλλοι συγγραφείς Tao et al., 2014 , Chemat et al., 2017 αποδίδουν το γεγονός αυτό στο φαινόμενο της σπηλαίωσης με υπέρηχους, το οποίο είναι υπεύθυνο για την επιτάχυνση των διαδικασιών εκχύλισης (Tao et al., 2014 , Chemat et al., 2017).

Τα οργανικά οξέα στο μπράντι λαμβάνονται κυρίως από τη διαδικασία παλαίωσης, επειδή τα περισσότερα από αυτά, όπως το τρυγικό οξύ και το μηλικό οξύ, υπάρχουν στο κρασί που χρησιμοποιείται προηγουμένως για τον εμποτισμό του ξύλου των βαρελιών. Επιπλέον, ορισμένα οργανικά οξέα, όπως το γαλακτικό οξύ και το οξικό οξύ, λαμβάνονται από τη διαδικασία απόσταξης (Schwartz et al., 2014).

Στα πειράματα των Delgado-González et al., 2017, καμία μεταβλητή δεν είναι κρίσιμη για την εκχύλιση του οξικού και του γαλακτικού οξέος, αν και η έκθεση στο φως και ο αερισμός επηρεάζουν περισσότερο την ικανότητα εκχύλισης του τρυγικού οξέος. Επιπλέον υπήρξε συσχέτιση της εκχύλισης του τρυγικού οξέος με οξειδωτικά μέσα (Delgado-González et al., 2017). Στα δείγματα ανιχνεύθηκαν και ταυτοποιήθηκαν μόνο πέντε φαινολικές και φουρανοειδείς ενώσεις: φουρφουραλδεΐδη, βανιλικό οξύ, συριγγικό οξύ, βανιλίνη και συριγγαλδεΐδη. Η ποσότητα των τσιπς, η έκθεση στο φως και ο ρυθμός ροής είναι κρίσιμες μεταβλητές για τη συγκέντρωση της βανιλίνης. Η ποσότητα των τεμαχίων, ο ρυθμός ροής, η θερμοκρασία και ο αερισμός είναι οι κρίσιμες μεταβλητές για τη συγκέντρωση της συριγγαλδεΐδης. Αυτό συμβαίνει, διότι η βανιλίνη και η συριγγαλδεΐδη είναι ενώσεις που προκύπτουν κατά την αλλοίωση, που παράγεται από το οξυγόνο, της λιγνίνης που περιέχεται στα τεμαχίδια ξύλου και οι κρίσιμες μεταβλητές σχετίζονται με την οξυγόνωση και την τυρβώδη ροή του ποτού (Delgado-González et al., 2017). Τέλος, όλες οι προαναφερθείσες μεταβλητές είναι κρίσιμες για την παρουσία συριγγικού οξέος στα δείγματα (Delgado-González et al., 2017). Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι το οξύ αυτό εμπλέκεται σε πολλές αντιδράσεις οξείδωσης και πολυμερισμού και η περιεκτικότητά του μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από τις συνθήκες εκχύλισης. Στα πειράματα των συγγραφέων η τιμές των περιεκτικότητων συμφωνούν με εκείνες που ελήφθησαν από το μπράντι που υποβλήθηκε σε παραδοσιακή παλαιώση και στο κονιάκ που παλαιώθηκε με ξυλοτύπους (Canas et al., 2017).

Οι υπέρηχοι έχουν θετική επίδραση και σε άλλα ποτά. Για παράδειγμα, η επεξεργασία με υπέρηχους σε λικέρ καφέ μετά από έξι ώρες εφαρμογής, η περιεκτικότητα σε αλκοόλη, η περιεκτικότητα σε καφεΐνη και η θολερότητα ήταν παρόμοια με συμβατική παλαιώση μετά από 180 ημέρες (Krüger et al., 2022). Επιπλέον, μελετήθηκε στο ηδύποτο βατόμουρου η δυνατότητα επεξεργασίας με υπέρηχους για την επιτάχυνση της παλαιώσης του από τους Li et al., 2020. Το ηδύποτο από βατόμουρα είναι ένα υψηλής αξίας μεταποιημένο προϊόν από εξαιρετικά ευπαθή φρούτα βατόμουρου, τα οποία καταναλώνονται ευρέως. Σε αυτό μελετήθηκε η αξιολόγηση της επίδρασης των υπερήχων στο φρέσκο ηδύποτο βατόμουρου υπό διαφορετικές συνθήκες στις αλλαγές στην εμφάνιση του χρώματος και στο προφίλ των ανθοκυανών κατά τη διάρκεια του πρώιμου (Li et al., 2020).

Το ηδύποτο βατόμουρο χωρίς καμία επεξεργασία έδειξε πρόοδο της ωρίμανσης από τον πολυμερισμό μεταξύ των ελεύθερων ανθοκυανών και των άχρωμων πολυφαινολών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παλαιώσης. Η τιμή της χρωματικής πυκνότητας, που ορίζεται ως το άθροισμα των τιμών απορρόφησης του ηδύποτου βατόμουρου σε διαφορετικά μήκη κύματος (420nm, 520nm, και 620nm) που εμπλέκονται στο σχηματισμό των παραγώγων των ανθοκυανών ιόντων, παρουσίασαν μια ανοδική τάση διαφοροποίησης από το μη επεξεργασμένο οίνο (Li et al., 2020). Η ισχύς των υπερήχων έχει θεωρηθεί ως κεντρικός μεταβλητός παράγοντας στην επεξεργασία από την υπερηχητική παραγωγή σπηλαίωσης που προκύπτει από την ενέργεια (Lukić, et al., 2019). Έτσι, η ισχύ της κλάσης των 90 W, 180 W, 270 W και 360 W εφαρμόστηκαν στο φρέσκο ηδύποτο βατόμουρου για τη διερεύνηση των αλλαγών στις παραμέτρους του χρώματος και των ανθοκυανών κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης.

Η ισχύς των 180 W και 270 W παρουσίασαν καλύτερα προστατευτικά αποτελέσματα χρώματος, όπως καταδεικνύεται από μια σχετικά μικρή χρωματική διαφορά, που σημαίνει ότι η απώλεια χρώματος σταθεροποιείται. Κατά συνέπεια, η επίδραση υπερήχων σε διαφορετικές

ισχύς 90 W, 180 W, 270 W και 360 W, επέδειξε θετική και προσιτή επίδραση στην προστασία του χρώματος. Ανάμεσά τους, επεξεργασία για 20 λεπτά παρουσίασε την καλύτερη διατήρηση του χρώματος. Επιπλέον οι συγγραφείς τονίζουν την αρνητική επίδραση στο χρώμα από την αποικοδόμηση των ανθοκυανινών, όπου υπερισχύει έναντι της θετικής συμβολής από τη δημιουργία παραγώγων όταν η επεξεργασία διαρκεί πάνω από 30 λεπτά (Li et al., 2020). Ομοίως με τον οίνο, οι διαφορετικές ανθοκυανίνες παίζουν αναμφισβήτητα αιτιώδη ρόλο στην απόδοση του χρώματος που κυμαίνεται από πορτοκαλοκόκκινο έως βαθύ κόκκινο και στο ηδύποτο βατόμουρου με άφθονες ανθοκυανίνες (Sun et al., 2019). Η επεξεργασία με υπέρηχους που είναι κρίσιμη για την απόδοση του χρώματος στον οίνο φρούτων μπορεί ενδεχομένως να επηρεάσει τη σταθερότητα των ενεργών συστατικών και μπορεί να επιταχύνει την αποικοδόμηση, τη συμπύκνωση ή τον πολυμερισμό των ανθοκυανίνες (Lukić, et al., 2019).

Επιπλέον, οι συγγραφείς παρατήρησαν αύξηση σε ορισμένες από τις ανθοκυανίνες λόγω των αντιδράσεων πολυμερισμού το οποίο έδειξε ικανοποιητική αύξηση της χημικής ηλικίας του οίνου και καλύτερη αντοχή στη λεύκανση με SO₂. Οι περίπλοκες αλλαγές των διαφορετικών ανθοκυανινών που προκαλούνται από μέτρια επεξεργασία υπέρηχων συνέβαλε στην καλύτερη χρωματική διαφοροποίηση και την αντίστοιχη τιμή χρώματος ανθοκυανίνης. Έτσι, η μη επιθυμητή χρωματική εκτροπή αντιστράφηκε κάπως από την επεξεργασία με υπέρηχους. Ειδικότερα, η υπερβολική επεξεργασία των υπέρηχων σε ισχύ, χρόνο και κύκλους σχεδόν δεν είχε καμία επιπλέον λειτουργία σε σύγκριση με ορισμένες ειδικές συνθήκες. Συνολικά, η θεραπεία με υπέρηχους μπορούσε να διαχωρίσει με επιτυχία το δείγμα ηδύποτου βατόμουρου από το μη επεξεργασμένο δείγμα ως προς τα χρωματικά χαρακτηριστικά. Επίσης επιβεβαιώθηκε με βάση την αντιοξειδωτική δοκιμές ότι η αντιοξειδωτική δραστηριότητα του ηδύποτου βατόμουρου δεν θα είναι αποδυναμωθεί (Li et al., 2020).

Μια άλλη σημαντική ιδιότητα της χρήσης των υπέρηχων σε υγρά συστήματα είναι ο σχηματισμός ελεύθερων ριζών. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το καθαρό νερό κορεσμένο με ένα αδρανές αέριο υφίσταται διάσπαση στο εσωτερικό του, παράγοντας έτσι τις ρίζες H και OH, οι οποίες μπορούν να επανασυνδεθούν για να σχηματίσουν νερό κορεσμένο με ένα αδρανές αέριο. Η παρουσία ελεύθερων ριζών που παράγονται με αυτή τη διαδικασία μπορεί να προκαλέσει οξειδωτικές αντιδράσεις, οι οποίες συμβάλλουν στη συμπλοκοποίηση των αρωμάτων και των αρωματικών ουσιών των παλαιωμένων ποτών, με την παρουσία φαινολικών ενώσεων και πτητικών ενώσεων, από την αντίδραση μεταξύ του νεαρού ποτού και των ξύλινων βαρελιών (Krüger et al., 2022).

Τέλος, η ένταση της εφαρμογής των υπέρηχων μπορεί επίσης να έχει αρνητικά αποτελέσματα. Οι συγγραφείς διερεύνησαν την επίδραση της ισχύος των υπέρηχων σε διαφορετικά πλάτη (50%, 75% και 100% πλάτος) και της αύξησης της θερμοκρασίας στην αντιοξειδωτική ικανότητα, το χρώμα, τις ολικές φαινολικές ενώσεις, το βαθμό μη ενζυμικού μαυρίσματος και τις οργανοληπτικές ιδιότητες με τη χρήση ηλεκτρονικής γλώσσας, σε σχέση με το ηδύποτο βατόμουρου. Η επεξεργασία σε 50% πλάτος για τρία και έξι λεπτά θεωρήθηκε το καλύτερο αποτέλεσμα. Από την αισθητηριακή αξιολόγηση προέκυψε το συμπέρασμα ότι τα ποτά που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με υπέρηχους έλαβαν χαμηλότερες βαθμολογίες (για τη γεύση, την οσμή, το άρωμα και το χρώμα), σε σύγκριση με τα μη επεξεργασμένα δείγματα. Οι υπέρηχοι μπορούν να προκαλέσουν την ταχεία ισομερίωση ενώσεων και τις αντιδράσεις οξείδωσης οι οποίες συμβαίνουν ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης με τις ελεύθερες ρίζες που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας με υπέρηχους. Τα αποτελέσματα έδειξαν επίσης ότι το πλάτος 100% είχε μεγαλύτερο αντίκτυπο στο μη ενζυμικό καφέ χρώμα,

το οποίο μπορεί να εξηγηθεί από την υψηλότερη συγκέντρωση ανθοκυανών, οι οποίες αποικοδομούνται ως αποτέλεσμα των αντιδράσεων Maillard. (Jambrak et al., 2017).

2.4 Υπερ υψηλή πίεση

2.4.1 Τι είναι και χρήσεις στην οινολογία

Εκτός από τις προαναφερθείσες τεχνικές, νέες και εναλλακτικές φυσικές μέθοδοι έχουν δείξει δυνατότητες για την επιτάχυνση της διαδικασίας παλαίωσης των οίνων και την παραγωγή οίνων με ευχάριστα φυσικοχημικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά (Clodoveo et al., 2016). Μία από αυτές τις φυσικές μεθόδους είναι η υψηλή υδροστατική πίεση, η οποία αποκτά ολοένα και μεγαλύτερη σημασία ως τεχνολογία επεξεργασίας τροφίμων, όχι μόνο λόγω της ικανότητάς της να συντηρεί τα τρόφιμα, αλλά και λόγω της δυνατότητάς της να επιτυγχάνει ενδιαφέροντα λειτουργικά αποτελέσματα. Στον οινολογικό τομέα, η υψηλή υδροστατική πίεση έχει προταθεί για τη συντήρηση του γλεύκους και του οίνου (Sun et al., 2016) λόγω της ικανότητάς της να αδρανοποιεί βακτήρια και ζύμες χρησιμοποιώντας πιέσεις περίπου 200 και 500 MPa (González-Arenzana et al., 2016).

Η επεξεργασία με υψηλή υδροστατική πίεση έχει εφαρμοστεί ευρέως στη βιομηχανία τροφίμων. Συνήθως χρησιμοποιεί διάλυμα με βάση το νερό ως μέσο για τη μετάδοση σχεδόν στιγμιαίων και ισοστατικών πιέσεων στο εύρος από 0 έως 800 MPa. Η επεξεργασία αυτή είναι μια αποτελεσματική τεχνολογία για την αύξηση της ασφάλειας των τροφίμων και την παράταση της διάρκειας ζωής τους (Zhang et al., 2012). Επιπλέον, η υψηλή υδροστατική πίεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση των φυσικοχημικών παραμέτρων των τροφίμων, ώστε να παραχθούν πιο υγιεινά και θρεπτικά προϊόντα (Chen et al., 2012). Μέχρι σήμερα, αρκετά προϊόντα τροφίμων, όπως χυμοί φρούτων, προϊόντα κρέατος και θαλασσινά έχουν εμπορευματοποιηθεί με επιτυχία. Όσον αφορά την εφαρμογή της υψηλής υδροστατικής πίεσης στον οίνο, οι περισσότερες έρευνες επικεντρώνονται στην επίδρασή της στην αδρανοποίηση ανεπιθύμητων μικροοργανισμών στον οίνο. Από την άλλη πλευρά, οι χημικές αντιδράσεις κατά την παλαίωση του οίνου αναμένεται να επηρεαστούν από την υψηλή υδροστατική πίεση σύμφωνα με την αρχή του Le Chatelier. Η μείωση του όγκου που προκαλείται από την επίδραση μπορεί να οδηγήσει στην αλλαγή της ισορροπίας των χημικών αντιδράσεων (Sun et al., 2016). Για το λόγο αυτό, η υψηλή υδροστατική πίεση μπορεί δυνητικά να χρησιμοποιηθεί για να επηρεάσει τις χημικές αντιδράσεις στον οίνο και να επιταχύνει τη διαδικασία παλαίωσης του οίνου (Tao et al., 2014).

Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι οι εν λόγω επεξεργασίες υπό πίεση επηρεάζουν τα φυσικοχημικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του ερυθρού οίνου, οδηγώντας σε χαρακτηριστικά που μοιάζουν με παλαιωμένα, δηλαδή πιο πορτοκαλοκόκκινο χρώμα, χαμηλότερη στυπτικότητα, υψηλότερη ένταση αρώματος μαγειρεμένων φρούτων και χαμηλότερη ένταση φρουτώδους νότας (Santos et al., 2019, Sun et al., 2015). Οι περισσότερες από αυτές τις τροποποιήσεις του ερυθρού οίνου σε υψηλή υδροστατική πίεση σχετίζονται με τη μείωση της περιεκτικότητας σε μονομερείς ανθοκυανίνες, φαινολικά οξέα και φλαβανόλες λόγω της εμφάνισης αντιδράσεων πολυμερισμού και διάσπασης των προανθοκυανιδίων (Santos et al., 2015). Ως εκ τούτου, η τεχνολογία αυτή έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ως οινολογική πρακτική στην οينوποίηση για την επιτάχυνση των αντιδράσεων των φαινολικών ενώσεων που οδηγούν σε χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τη διαδικασία παλαίωσης του οίνου (Santos et al., 2019).

Υπερ-υψηλή πίεση ή υψηλή υδροστατική πίεση, είναι μια μέθοδος κατά την οποία τα τρόφιμα σφραγίζονται σε δοχεία ή τοποθετούνται σε νερό ή άλλα υγρά υπό πίεση (100 MPa) για να αποστειρωθούν και να αδρανοποιηθούν τα ένζυμα ή για να αλλαγή των λειτουργικών ιδιοτήτων ενός προϊόντος. Υπό υπερ-υψηλή πίεση, ο όγκος του προϊόντος συμπιέζεται, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη βαθύτερη διείσδυση των πρωτεϊνών και άλλων μακρομορίων στο προϊόν, με αποτέλεσμα την καταστροφή των τρισδιάστατων δομών. Έτσι, η υπερ-υψηλή πίεση δεν επηρεάζει μόνο τη μορφολογία των κυττάρων, αλλά μεταβάλλει επίσης τους υδρόφιλους ιοντικούς και υδρόφοβους δεσμούς στην τρισδιάστατη δομή του βιολογικού υλικού. Αυτό το μπορεί, για παράδειγμα, να οδηγήσει σε μετουσίωση αμύλου και πρωτεϊνών και αδρανοποίηση ενζύμων, τα οποία μπορεί να έχουν επιπτώσεις στην υφή του προϊόντος. Η πίεση είναι άμεσα και ομοιόμορφα στο προϊόν, ανεξάρτητα από το μέγεθος, το σχήμα και τον όγκο του. Κάποιοι συγγραφείς έχουν δείξει ότι η διάρκεια ζωής του γάλακτος, των φρούτων, των λαχανικών και άλλων τροφίμων θα μπορούσαν να παραταθούν με την επεξεργασία αυτής. Οι πρωτεΐνες πήζουν στα 500 MPa και σχηματίζουν πηκτή στα 700 MPa, η οποία επίσης καταστρέφει μικροοργανισμούς (Chen et al., 2012).

Ορισμένες μελέτες, χρησιμοποιώντας πιέσεις μεταξύ 200 MPa και 500 MPa για 1 έως 20 λεπτά, έδειξαν την αδρανοποίηση μυκήτων, ζυμομυκήτων και βακτηρίων γαλακτικού οξέος σε οίνους χωρίς να προκαλούνται σημαντικές αλλαγές στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του οίνου (Buzgul et al., 2012). Ωστόσο, οι σοβαρές επεξεργασίες υπερ υψηλής πίεσης (650 MPa για 1 ώρα και 2 ώρες) άλλαξαν τα φυσικοχημικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του ερυθρού οίνου, δηλαδή τη μείωση της έντασης του χρώματος και της περιεκτικότητας σε φαιολικές ενώσεις. Όσον αφορά τις οργανοληπτικές ιδιότητες, η ξινή και φρουτώδης οσμή του οίνου έγινε λιγότερο έντονη μετά από 2 ώρες πίεσης, ενώ οι εντάσεις διαφόρων χαρακτηριστικών, συμπεριλαμβανομένης της στυπτικότητας και της αλκοολικής και πικρής γεύσης, ενισχύθηκαν ελαφρώς (Tao et al., 2014). Πρόσφατα, μελέτες έδειξαν ότι οι μέτριες επεξεργασίες HHP, 425 MPa και 500 MPa για 5 λεπτά, επηρέασαν μακροπρόθεσμα τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των ερυθρών και λευκών οίνων δηλαδή περισσότερο πορτοκαλοκόκκινο χρώμα και μειωμένη αντιοξειδωτική δραστηριότητα και ολική περιεκτικότητα σε φαινόλες (Santos et al., 2013).

2.4.2 Επίδραση της υπερ υψηλής πίεσης στον οίνο

Η υψηλή υδροστατική πίεση, με τη χρήση φιαλών διαπερατών από οξυγόνο, μπορεί ενδεχομένως να χρησιμοποιηθεί ως διαδικασία παλαίωσης των οίνων σε σχέση με την πολυμερή φαινολική σύνθεση, εναλλακτικά ή συμπληρωματικά με άλλες διαδικασίες παλαίωσης, όπως τα ξυλοτεμαχίδια, σε μια συντονισμένη στρατηγική προσέγγιση για την παραγωγή οίνων με τα αισθητηριακά χαρακτηριστικά που απαιτούν οι καταναλωτές, διατηρώντας την παράδοση μαζί με την καινοτομία (González-Arenzana et al., 2016). Οι επιδράσεις της τεχνολογίας αυτής στα χρωματικά χαρακτηριστικά και τη φαινολική σύνθεση του ερυθρού οίνου έχουν μελετηθεί στο παρελθόν (Santos et al., 2013, Sun et al., 2016, Tao et al., 2014). Αυτές οι έρευνες αποκάλυψαν ότι δεν αναμενόταν να εμφανιστούν χημικές αντιδράσεις σε εμπορικές συνθήκες παστερίωσης υψηλής υδροστατικής πίεσης, όπου οι πιέσεις κυμαίνονταν από 400 έως 700 MPa, οι θερμοκρασίες δεν ήταν υψηλότερες από 40-50 °C και οι χρόνοι παραμονής δεν ήταν μεγαλύτεροι από μερικά λεπτά. Ως εκ τούτου, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο χρόνος διατήρησης υπό πίεση και η θερμοκρασία είναι κρίσιμες παράμετροι για την εμφάνιση αντιδράσεων συμπύκνωσης ανθοκυανών υπό πίεση με βάση τη μελέτη των συγγραφέων. Ο παραδοσιακός πειραματικός σχεδιασμός μπορεί να αλλάξει μόνο έναν παράγοντα κάθε φορά, ενώ οι υπόλοιποι είναι σταθεροί, πράγμα που είναι χρονοβόρο και δαπανηρό. Επιπλέον, αγνοούνται πιθανές επιδράσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραγόντων και ενδέχεται να μην εξαχθούν σωστά ολοκληρωμένα συμπεράσματα (Sun et al., 2016).

Σχετικά με τα φυσικοχημικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του ερυθρού οίνου οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι, η κατεργασία υψηλής υδροστατικής πίεσης των 500 MPa για 5 λεπτά δεν ήταν ικανή να μεταβάλλει τις φυσικοχημικές ιδιότητες του οίνου. Ωστόσο, διαπίστωσαν ότι η υψηλή υδροστατική πίεση σε 300 MPa και 20 °C για 2 ώρες παρήγαγε ερυθρούς οίνους με καλό άρωμα και γεύση. Επιπλέον, η μελέτη των (Corrales et al., 2008) αποκάλυψε ότι οι συνδυασμένες επεξεργασίες θερμοκρασίας/πίεσης (70 °C, 600 MPa) για 1 ώρα επηρέασαν τις αντιδράσεις συμπύκνωσης των ανθοκυανών. Έτσι, θα μπορούσε να συναχθεί το συμπέρασμα ότι τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των οίνων επηρεάζονται λιγότερο από την υψηλή υδροστατική πίεση όταν η χρησιμοποιούμενη πίεση είναι χαμηλότερη από 600 MPa και/ή ο χρόνος διατήρησης της πίεσης είναι μικρότερος από 1 h. Ωστόσο, μια υψηλότερη πίεση (≥ 600 MPa) και/ή μεγαλύτερος χρόνος διατήρησης της πίεσης (≥ 1 h) μπορεί ενδεχομένως να επηρεάσει τη βιοχημική σταθεροποίηση του οίνου. Μέχρι στιγμής, δεν υπάρχουν πληροφορίες σχετικά με την επίδραση της υψηλής υδροστατικής πίεσης στα φυσικοχημικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του ερυθρού οίνου όταν η πίεση υπερβαίνει τα 600 MPa και η συμπίεση διαρκεί περισσότερο από 1 h (Tao et al., 2014).

Οι υπό πίεση οίνοι είχαν υψηλότερο άρωμα μαγειρεμένων φρούτων και χαμηλότερο φρουτώδες και λουλουδάτο άρωμα από τους μη υπό πίεση οίνους. Ωστόσο, οι επιδράσεις αυτές γίνονται αντιληπτές μόνο μετά από τουλάχιστον 6 μήνες αποθήκευσης (Sun et al., 2016). Τα αποτελέσματα αυτά, σε συνδυασμό με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε ελεύθερα αμινοξέα και την υψηλότερη περιεκτικότητα σε φουράνια στους υπό πίεση οίνους, υποδηλώνουν την επίδραση των επεξεργασιών υψηλής υδροστατικής πίεσης στην επιτάχυνση των αντιδράσεων Maillard που λαμβάνουν χώρα κατά την περίοδο αποθήκευσης των οίνων (Santos et al., 2013). Ωστόσο, οι επιδράσεις της υψηλής υδροστατικής πίεσης στην πτητική σύνθεση του οίνου κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης είναι ακόμη σε μεγάλο βαθμό άγνωστες (Santos et al., 2013).

Επιπλέον, ορισμένες μελέτες έδειξαν ότι οι επεξεργασίες υψηλής υδροστατικής πίεσης προάγουν μεταβολές στην πτητική σύνθεση ορισμένων προϊόντων τροφίμων που επεξεργάζονται, αλλάζοντας τη γεύση τους. Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι οι συγκεντρώσεις της εξανάλης και της cis-3-εξενάλης αυξήθηκαν σε δείγματα τομάτας που υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με 500 MPa για 3 λεπτά λόγω της οξείδωσης των ελεύθερων λιπαρών οξέων μετά από επεξεργασίες υπό πίεση. Επίσης, αναφέρθηκε ότι σε πολτούς φράουλας που αποθηκεύτηκαν υπό πίεση (400 MPa σε θερμοκρασία περιβάλλοντος για 20 λεπτά) για 30 ημέρες στους 4 °C, αυξήθηκε η περιεκτικότητα σε βουτυρικό μεθύλιο, 2-μεθυλοβουτυρικό οξύ, εξανοϊκό οξύ, βουτυρικό αιθύλιο, εξανοϊκό αιθύλιο, 1-εξανόλη και λιναλοόλη (Sun et al., 2016).

Συνοπτικά, μετά την επεξεργασία με υψηλή υδροστατική πίεση, πολλές προφανείς αλλαγές συνέβησαν στις μη χρωματισμένες φαινολικές ενώσεις στους ερυθρούς οίνους και η τάση αλλαγής της σύνθεσης των φαινολικών οξέων και των φλαβαν-3-ολών του οίνου που υποβλήθηκε σε επεξεργασία με υψηλή υδροστατική πίεση είναι παρόμοια με τη φυσική γήρανση του οίνου σε κάποιο βαθμό. Το πιο σημαντικό είναι ότι, υπό τις συνθήκες που οι οίνοι με γεωγραφική ένδειξη και οι ποικιλιακοί οίνοι έχουν σημασία στην οινοβιομηχανία, διαπιστώθηκε ότι η επεξεργασία με υψηλή υδροστατική πίεση δεν άλλαξε τη διάκριση της ποικιλίας σταφυλιών και της γεωγραφικής προέλευσης των σταφυλιών με βάση τα φαινολικά οξέα και τις φλαβαν-3-όλες, γεγονός που απέδειξε ότι όταν χρησιμοποιείται η επεξεργασία με υψηλή υδροστατική πίεση για την προσομοίωση της γήρανσης των οίνων, δεν θα οδηγήσει σε καμία επιπλέον συνέπεια στην αλλαγή των μη χρωματισμένων φαινολικών χαρακτηριστικών της περιοχής ή της ποικιλίας. Από αυτή την άποψη, στο μέλλον, η επεξεργασία υψηλής υδροστατικής πίεσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε οίνους με γεωγραφική ένδειξη και μονοποικιλιακούς οίνους για την προσομοίωση της παλαίωσης των οίνων. Απ' όσο γνωρίζουμε, αυτή είναι η πρώτη αναφορά που δείχνει ότι η επεξεργασία υψηλής υδροστατικής πίεσης δεν είχε καμία επίδραση στα μη χρωματισμένα φαινολικά χαρακτηριστικά της περιοχής και της ποικιλίας του ερυθρού οίνου. Ωστόσο, απαιτείται ακόμη περαιτέρω μελέτη, ιδίως μια συστηματική συγκριτική μελέτη μεταξύ της διαδικασίας της επεξεργασίας αυτής και της παραδοσιακής διαδικασίας παλαίωσης σε βαρέλι, καθώς θα μας βοηθήσει να γνωρίσουμε με μεγαλύτερη σαφήνεια τον μηχανισμό και την επίδραση της επεξεργασίας στους οίνους (Sun et al., 2016).

Μία άλλη επίδραση της εφαρμογής υπερ υψηλής πίεσης στους οίνους είναι η σταθερότητά τους. Οι πρωτεΐνες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην κολλοειδή σταθερότητα και τη διαύγεια του λευκού οίνου (Sauvage et al., 2010). Ο σχηματισμός ενός μη ελκυστικού αποθέματος στον εμφιαλωμένο οίνο, που προκαλείται από τη συσσωμάτωση πρωτεϊνών κατά την αποθήκευση, είναι ένα συνηθισμένο ελάττωμα των εμπορικών οίνων, το οποίο τους καθιστά μη αποδεκτούς από τους καταναλωτές.

Μετά την επεξεργασία υπό υπερ υψηλή πίεση παρατηρείται μείωση του διοξειδίου του θείου (ελεύθερου και ολικού) σε σύγκριση με την παραδοσιακή τεχνική σταθεροποίησης του οίνου. Στα 450 MPa, η πρωτοταγής δομή μειώνεται στις πρωτεΐνες του οίνου, γεγονός που θα μπορούσε να σχετίζεται με την αύξηση των διαμοριακών αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πρωτεϊνών και άλλων μη πρωτεϊνικών ενώσεων στον οίνο. Επιπλέον, η μείωση της ενθαλπίας τήξης και η αύξηση της θερμοκρασίας τήξης θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη θερμική σταθερότητα των πρωτεϊνών του οίνου και να καθυστερήσουν τον σχηματισμό θολώματος. Τα ευρήματά των συγγραφέων υποδηλώνουν ότι η συμπίεση στα 450 MPa μπορεί να συμβάλει

σημαντικά στη σταθεροποίηση των πρωτεϊνών στον οίνο Sauvignon blanc. Τέλος, οι τροποποιήσεις στη δομή των πρωτεϊνών, η θερμική σταθερότητα των πρωτεϊνών και η σταθερότητα του οίνου εξαρτώνται από την ένταση της επεξεργασίας με υψηλή υδροστατική πίεση (Munizaga et al., 2014).

Στα πειράματα των Santos et al., 2015 οι λευκοί και οι ερυθροί οίνοι μετά από 2 μήνες αποθήκευσης αποκάλυψαν παρόμοιο προφίλ σε κετόνες, ακετάλες, φουράνια και αλδεΐδες, μεταξύ των δειγμάτων με διαφορετικές επεξεργασίες, καθώς η σχετική αφθονία των χημικών ομάδων είναι ομοιογενής για όλους τους οίνους. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα της προεπισκόπησης που δείχνουν ότι μετά από 2 μήνες αποθήκευσης, η επίδραση των δύο επεξεργασιών υπό πίεση στη σύνθεση των πτητικών ουσιών τόσο του λευκού όσο και του ερυθρού οίνου ήταν ελάχιστη. Ωστόσο, μετά από 9 μήνες αποθήκευσης είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ότι, τόσο για τους λευκούς όσο και για τους ερυθρούς οίνους που υποβλήθηκαν σε πίεση, τα πτητικά προφίλ κάθε αλδεΐδης, κετόνης, φουρανίου και ακεταλικής ένωσης ήταν πολύ διαφορετικά σε σύγκριση με τους οίνους που δεν υποβλήθηκαν σε πίεση. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν ότι ο αντίκτυπος των επεξεργασιών υπό πίεση τόσο στους λευκούς όσο και στους ερυθρούς οίνους ήταν αισθητός μόνο μετά από αρκετούς μήνες αποθήκευσης (Santos et al., 2015).

Οι οξικές ενώσεις, οι κετόνες και οι πτητικές ενώσεις Maillard, όπως η φουρφουράλη και η βενζαλδεΐδη, έχουν την τάση να αυξάνονται γραμμικά κατά τη διάρκεια των οξειδωτικών συνθηκών παλαίωσης λόγω της αντίδρασης Maillard και της οξείδωσης των αλκοολών και των λιπαρών οξέων και αναφέρονται ως πιθανοί δείκτες ηλικίας των οίνων sherry και Madeira (Sun et al., 2013). Επομένως, φαίνεται ότι τα δείγματα οίνων υπό πίεση διαθέτουν πτητική σύνθεση χαρακτηριστική των ταχύτερα παλαιωμένων/θερμικά επεξεργασμένων οίνων. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η επεξεργασία επηρεάζει τη μακροπρόθεσμη σύνθεση των πτητικών ουσιών των λευκών και ερυθρών οίνων και φαίνεται να επιταχύνει την εξέλιξή τους κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, γεγονός που είναι ιδιαίτερα εμφανές για μεγαλύτερες περιόδους αποθήκευσης (Santos et al., 2015).

2.4.3 Επίδραση της υπερ υψηλής πίεσης σε άλλα ποτά

Η επεξεργασία με υπερ υψηλή πίεση χρησιμοποιείται σήμερα παγκοσμίως σε διάφορες εφαρμογές επεξεργασίας τροφίμων για την παραγωγή προϊόντων υψηλότερης ποιότητας που μέχρι σήμερα δεν ήταν δυνατή. Η επεξεργασία με υπερ υψηλή πίεση έχει επίσης χρησιμοποιηθεί στην επεξεργασία οίνου. Οι Tao et al., 2014 μελέτησαν την επίδραση της επεξεργασίας με υπερ υψηλή πίεση στις φυσικοχημικές και αισθητηριακές ιδιότητες του ερυθρού οίνου. Ανέφεραν ότι η υπερ υψηλή πίεση επηρέασε σημαντικά τα χρωματικά χαρακτηριστικά και τη φαινολική σύνθεση του οίνου μετά από επεξεργασία στα 650 MPa για 0,25, 0,5, 1 και 2 ώρες. Επιπλέον, η επεξεργασία αυτή για 2 ώρες στα 650 MPa αναφέρθηκε ότι μείωσε σημαντικά την ένταση της ξινής και φρουτώδους οσμής του οίνου. Σε άλλη έρευνα, οι Munizaga et al., 2014 ανέφεραν ότι η επεξεργασία με υπερ υψηλή πίεση είχε ως αποτέλεσμα την τροποποίηση των α -ελικών και β -φύλλων δομών των πρωτεϊνών του οίνου. Η επεξεργασία έχει αποδειχθεί επίσης ότι είναι επωφελής και για την επιτάχυνση της ωρίμανσης του τυριού. Ωστόσο, μπορεί να έχει επίδραση στην παλαίωση των λικέρ. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η υψηλή υδροστατική πίεση επηρεάζει τις χημικές διεργασίες που συμβαίνουν κατά την παλαίωση αποσταγμένων ποτών, σύμφωνα με την αρχή του Le Chatelier. Οι ισορροπίες των χημικών αντιδράσεων ενδέχεται να μεταβληθούν λόγω της μείωσης του όγκου που προκαλείται από την πίεση (Sun et al., 2016). Εξαιτίας αυτού, η τεχνολογία αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επηρεάσει τις χημικές αντιδράσεις στο αποσταγμένο ποτό και να επιταχύνει τη διαδικασία παλαίωσης (Tao et al., 2012).

Τα αποτελέσματα της μελέτης των συγγραφέων για ένα κινέζικο λικέρ έδειξαν ότι η επεξεργασία με υπερ υψηλή πίεση προκάλεσε σημαντική μείωση του οξικού οξέος, ενώ οι συγκεντρώσεις οξικού αιθυλεστέρα και εξανοϊκού αιθυλεστέρα αυξήθηκαν μετά την επεξεργασία με υπερ υψηλή πίεση. Τα αποτελέσματα της οργανοληπτικής αξιολόγησης έδειξαν ότι η συνολική ποιότητα του επεξεργασμένου με υπερ υψηλή πίεση κινέζικου λικέρ ήταν καλύτερη από τα μη παλαιωμένα, και οι μέσες οργανοληπτικές βαθμολογίες τοποθέτησαν τα επεξεργασμένα με υπερ υψηλή πίεση δείγματα μεταξύ των μη παλαιωμένων και των παλαιωμένων, αλλά πιο κοντά στα παλαιωμένα, αποδεικνύοντας έτσι μια ευνοϊκή μετάβαση στη διαδικασία παλαίωσης. Ως εκ τούτου, η επεξεργασία με υπερ υψηλή πίεση έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει ένα καλό συμπλήρωμα για την παλαίωση του κινέζικου λικέρ. Ενδέχεται να είναι επιθυμητές περαιτέρω μελέτες πριν από την εφαρμογή αυτής της τεχνολογίας σε εμπορική χρήση (Zhu et al., 2016).

Μια άλλη χρήση της τεχνολογίας είναι στα αποστάγματα σόργου. Η περιεκτικότητα σε οξικό αιθυλεστέρα των προσομοιωμένων αποσταγμάτων σόργου βελτιώθηκε αποτελεσματικά μέσω της ομοιογενούς επεξεργασίας υπερ υψηλής πίεσης. Πέντε φορές ομογενοποίησης υπό πίεση ομογενοποιητή 50 MPa έδειξαν τα καλύτερα αποτελέσματα. Ωστόσο, με την αύξηση της συχνότητας επεξεργασίας, η περιεκτικότητα των αλκοολούχων ποτών σε αλκοόλη μειώθηκε. Στο πείραμα για το λικέρ σόργου, διαπιστώθηκε ότι η ενισχυμένη βελτιωμένη επίδραση του αρώματος επιτεύχθηκε κατά την ομογενή επεξεργασία με ρύθμιση υψηλής θερμοκρασίας 20 °C. Οι εφαρμογές της υπερ υψηλής πίεσης φαίνεται να είναι πολλά υποσχόμενες όσον αφορά την τεχνητή επιτάχυνση της διαδικασίας ωρίμανσης, εντός μιας ώρας, και τη βελτίωση της ποιότητας των φρέσκων αλκοολούχων ποτών- η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί περαιτέρω στην παρασκευή αλκοολούχων ποτών για την απόκτηση υψηλότερων οικονομικών οφελών με τη μείωση του υψηλού κόστους παραγωγής. Εν κατακλείδι, η τεχνολογία έχει

προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της απλότητας, της συνέπειας, της φιλικότητας προς το περιβάλλον και της ασφάλειάς της (Chang et al., 2019).

Επιπλέον, πολλοί ερευνητές έχουν εφαρμόσει την τεχνολογία της υψηλής υδροστατικής πίεσης στο ποτό baijiu. Ορισμένοι από αυτούς πιστεύουν ότι όταν εφαρμόζεται στο baijiu, η υψηλή υδροστατική πίεση μειώνει την επιφανειακή τάση και έχει συμπιεστική επίδραση στο υγρό, η οποία μειώνει την απόσταση μεταξύ των μορίων, προωθεί την αναδιάταξη των μορίων αιθανόλης και νερού, αυξάνει την κινητική ενέργεια της αιθανόλης και του νερού και προωθεί τη σύνδεση των δεσμών υδρογόνου (Li et al., 2020). Οι επεξεργασίες στα 300 και 400 MPa είχαν ως αποτέλεσμα σημαντικές αλλαγές στα συστατικά του αρώματος του baijiu και τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν τις τάσεις μείωσης της συγκέντρωσης των αλκοολών, των αλδεϋδών και του οξικού αιθυλεστέρα, οι οποίες ήταν συμβατές με εκείνες της φυσικής διαδικασίας γήρανσης (Zhu et al., 2016). Ωστόσο, μετά από 2-6 μήνες αποθήκευσης, η διαφορά μεταξύ των πρωτογενών πτητικών χημικών ουσιών που παράγονται με τη χρήση υψηλής υδροστατικής πίεσης και του μη επεξεργασμένου baijiu σταδιακά εξαφανίστηκε (Wang et al., 2022). Το παροδικό αποτέλεσμα της επεξεργασίας ενδέχεται να μην διατηρηθεί κατά τη διάρκεια της μακροχρόνιας αποθήκευσης (Zhu et al., 2016).

Επίσης, το baijiu πρέπει να συσκευάζεται με μαλακό υλικό πριν από την επεξεργασία για την προώθηση της συμπίεσης και η επιλογή των υλικών συσκευασίας πρέπει επίσης να εξεταστεί προσεκτικά. Τα ακατάλληλα υλικά μπορεί να οδηγήσουν στην εισαγωγή κρυφών μη ασφαλών ουσιών (Wang et al., 2022).

Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας αποσταγμένων ποτών χρησιμοποιώντας τεχνολογία εκτόξευσης νερού υπερ υψηλής πίεσης, το υγρό συμπιέζεται εφαρμόζοντας παλινδρομική εμβολοφόρο αντλία υπερ υψηλής πίεσης. Στη συνέχεια, το υγρό ρέει σε συσσωρευτή και εκτοξεύεται από διάφορα ακροφύσια μετά τη σταθεροποίηση της πίεσης. Η εκτίναξη του αποσταγμένου ποτού από το ακροφύσιο είναι μια διαδικασία άμεσης αποσυμπίεσης, η οποία αυξάνει τη μοριακή κινητική ενέργεια και επιταχύνει την εξάτμιση συστατικών με χαμηλά σημεία βρασμού, όπως ακεταλδεϋδη και υδρόθειο, επιτρέποντάς τους να διαφύγουν ταχύτερα από το αποσταγμένο ποτό και να μειώσουν την οσμή του σε πρόσφατα αποσταγμένα ποτά (Wang et al., 2022). Η φυσική ενέργεια που παρέχεται από την υπερ υψηλή πίεση μπορεί να μετατραπεί στην ενέργεια ενεργοποίησης που απαιτείται για τις χημικές αντιδράσεις, οι οποίες μπορούν να σπάσουν τους δεσμούς υδρογόνου και να προωθήσουν χημικές αντιδράσεις όπως, η σύνθεση και η αποσύνθεση (Tao et al., 2014). Χρησιμοποιώντας την διαδικασία αυτή οι Wang et al., 2022 εξέτασαν τις επιδράσεις της τεχνολογίας εκτόξευσης νερού υπερ υψηλής πίεσης στη γεύση baijiu. Ένας πίδακας νερού 350 MPa προκάλεσε τη μείωση της περιεκτικότητας σε μεθανόλη και ολικό εστέρα, καθώς και μείωσε τις συγκεντρώσεις υψηλότερων αλκοολών. Οι συγγραφείς πέτυχαν χαμηλότερα επίπεδα 3-μεθυλο-βουτανόλης, 2-μεθυλο-προπανόλης, ακεταλδεϋδης και ακετάλης σε παλαιωμένα αποσταγμένα ποτά χρησιμοποιώντας πίδακα νερού υπερ υψηλής πίεσης. Επιπλέον, η αύξηση της πίεσης είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής συγκέντρωσης οξέος και ποικίλους βαθμούς μείωσης για τους τρεις κύριους εστέρες που υπάρχουν στο αποσταγμένο ποτό (Wang et al., 2022).

Τα αποτελέσματα των προαναφερθεισών μελετών δείχνουν σαφώς ότι η τεχνολογία εκτόξευσης νερού υπερ υψηλής πίεσης αφαιρεί κυρίως τις οσμές στα φρέσκα αποστάγματα, αλλά δεν μπορεί να προωθήσει το σχηματισμό παλαιωμένων γεύσεων. Επιπλέον, αυτή η διαδικασία αυξάνει την ταχύτητα ροής αέρα και την περιοχή επαφής μεταξύ του αποσταγμένου

ποτού και του αέρα, εξατμίζοντας το αποσταγμένο ποτό σε διάφορους βαθμούς και οδηγώντας στην απώλεια αποσταγμένου ποτού σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, η διαδικασία απαιτεί υψηλές ηλεκτρικές εισόδους (Jia et al., 2022).

Η ποικιλομορφία των καινοτόμων μεθόδων τεχνητής παλαίωσης που προκαλείται από τις διαφορές στις παραδοσιακές μεθόδους παλαίωσης των ανατολικών και δυτικών αποσταγμένων ποτών αντικατοπτρίζεται καλά στις παραπάνω μελέτες. Η χρήση θραυσμάτων ξύλου είναι απαραίτητη για την παλαίωση του ουίσκι, του κονιάκ και του ρούμι και συμπληρώνεται από μικροοξυγόνωση και φυσικές τεχνικές που επιταχύνουν τη διάλυση των συστατικών δρυός. Στην περίπτωση του baijiu, αυτό επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ενέργειας για την επιτάχυνση των χημικών αντιδράσεων που πρέπει να συμβούν. Αν και υπάρχουν μερικά πειραματικά φαινόμενα που δείχνουν ότι οι φυσικές τεχνικές για τη θεραπεία του baijiu μπορούν να προωθήσουν τη μετατροπή των χημικών συστατικών μειώνοντας την ενέργεια ενεργοποίησης των χημικών αντιδράσεων ή αυξάνοντας τον αριθμό των ελεύθερων ριζών, τα αποτελέσματα των μελετών παρέχουν μόνο μια συνοπτική ανάλυση των αλλαγών στα κύρια συστατικά και υπάρχει μικρή παρακολούθηση των πολλών ισχυρών συστατικών ιχνών αρώματος (Wang et al., 2022).

Επιπλέον, πολλές τεχνολογίες ήταν αποτελεσματικές μόνο για τη διαδικασία "de-fresh" του φρέσκου baijiu και μόνο περιορισμένα ερευνητικά στοιχεία σχετικά με την ικανότητά του να προάγει το σχηματισμό αρωμάτων γήρανσης σε αποσταγμένα ποτά. Επιπλέον, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξακολουθεί να είναι αμφίβολη. Ως εκ τούτου, απαιτείται περαιτέρω έρευνα για να αποκαλυφθεί εάν οι φυσικές τεχνολογίες είναι αξιόπιστες για την επιτάχυνση της γήρανσης του baijiu και ποιος είναι ο μηχανισμός. Επί του παρόντος, αυτές οι τεχνικές δεν έχουν ακόμη συλλάβει πλήρως τα χαρακτηριστικά γεύσης των αποσταγμένων ποτών που ωριμάζουν χρησιμοποιώντας παραδοσιακές τεχνικές παλαίωσης και πολλά αλκοολούχα ποτά υψηλής ποιότητας εξακολουθούν να χρησιμοποιούν παραδοσιακές τεχνικές παλαίωσης. Δεδομένου ότι το υλικό και η σύνθεση του περιέκτη διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στον προσδιορισμό της ξεχωριστής γεύσης του αποσταγμένου ποτού, η χρήση ορισμένων δοχείων αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση (Jia et al., 2022).

Ο συνδυασμός φυσικών τεχνικών και υλικών δοχείων αποθήκευσης μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των σημερινών τεχνικών γήρανσης, τόσο όσον αφορά τη συντόμευση του χρόνου παλαίωσης όσο και την ενίσχυση της ποιότητας της γεύσης. Επιπλέον, η δημιουργία νέων υλικών θα μπορούσε να επιταχύνει την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας. Ωστόσο, το κόστος και οι πιθανοί κίνδυνοι για την ασφάλεια των τροφίμων θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη κατά τη χρήση αυτών των νέων μεθόδων γήρανσης (Wang et al., 2022).

3. Συμπεράσματα

Η μέθοδος του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου έχει αναδειχθεί ως μια καινοτόμος τεχνολογία με σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με το κόστος και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, ειδικά στον τομέα των τροφίμων και της ποιοποίησης. Η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής προσφέρει πολλά οφέλη, όπως χαμηλό ενεργειακό κόστος, σύντομους χρόνους επεξεργασίας, και μείωση της ανάγκης για χημικά συντηρητικά, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι το χαμηλό ενεργειακό κόστος που απαιτεί. Σε σύγκριση με άλλες μη θερμικές μεθόδους, όπως η υψηλή υδροστατική πίεση, η χρήση παλλόμενων ηλεκτρικών πεδίων απαιτεί πολύ μικρότερη ενέργεια. Αυτό συμβάλλει στη μείωση των λειτουργικών εξόδων για τις βιομηχανίες τροφίμων και ποτών. Η χαμηλή κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντική, καθώς μειώνει τα συνολικά κόστη παραγωγής και επηρεάζει θετικά τη βιωσιμότητα των επιχειρήσεων. Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή επιτρέπει σύντομους χρόνους επεξεργασίας. Οι παλμοί του ηλεκτρικού πεδίου έχουν πολύ μικρή διάρκεια, γεγονός που μειώνει τον χρόνο που απαιτείται για την επεξεργασία των τροφίμων ή των ποτών. Αυτό σημαίνει ταχύτερη παραγωγή και δυνατότητα υψηλής αποδοτικότητας, γεγονός που μειώνει το κόστος και επιτρέπει την αύξηση της παραγωγής χωρίς επιπτώσεις στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η απλότητα του εξοπλισμού για την εφαρμογή της μεθόδου είναι επίσης ένα σημαντικό πλεονέκτημα. Ο εξοπλισμός αποτελείται κυρίως από μια πηγή υψηλής τάσης, μια συστοιχία πυκνωτών, έναν διακόπτη και έναν θάλαμο επεξεργασίας. Αυτή η απλότητα του εξοπλισμού μειώνει το αρχικό κόστος επένδυσης και τη συντήρηση, καθιστώντας την τεχνολογία προσβάσιμη για μεγάλες βιομηχανίες παραγωγής. Στον περιβαλλοντικό τομέα, η μέθοδος του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου προσφέρει αρκετά οφέλη. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασία δωματίου, μειώνοντας την ανάγκη για θέρμανση και κατά συνέπεια την κατανάλωση ενέργειας. Η χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση συνδέεται με μειωμένες εκπομπές CO₂, γεγονός που είναι ευεργετικό για το περιβάλλον. Επίσης, η τεχνολογία μειώνει την ανάγκη για χημικά συντηρητικά όπως το SO₂. Οι επεξεργασίες με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο μπορούν να επιτύχουν την αδρανοποίηση μικροοργανισμών χωρίς τη χρήση χημικών, μειώνοντας έτσι την περιβαλλοντική επιβάρυνση από την παραγωγή και χρήση αυτών των ουσιών. Η βελτίωση της ποιότητας των τροφίμων και ποτών μέσω της μεθόδου παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου μπορεί επίσης να έχει θετικές επιπτώσεις στον περιορισμό των αποβλήτων. Η διατήρηση της θρεπτικής αξίας και της γεύσης, καθώς και η επιτάχυνση της παλαίωσης και εκχύλισης των φαινολικών ενώσεων, οδηγούν σε προϊόντα με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και μειωμένα απορρίμματα. Συνολικά όσον αφορά το κόστος και το περιβαλλοντικό αντίκτυπο, η μέθοδος του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου παρέχει μια οικονομικά αποδοτική και περιβαλλοντικά φιλική λύση για τη βιομηχανία τροφίμων και ποτών, συνδυάζοντας χαμηλό ενεργειακό κόστος, σύντομους χρόνους επεξεργασίας, και μειωμένη χρήση χημικών συντηρητικών. Αυτό καθιστά την τεχνολογία αυτή ελκυστική για τις επιχειρήσεις που επιθυμούν να ενσωματώσουν βιώσιμες πρακτικές στην παραγωγική τους διαδικασία.

Η μέθοδος του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου έχει αναδειχθεί ως μια ενδιαφέρουσα τεχνολογία για την επιτάχυνση της παλαίωσης του οίνου, προσφέροντας τόσο πλεονεκτήματα όσο και μειονεκτήματα στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του οίνου. Σημαντικά

πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν την ενίσχυση της έντασης του χρώματος και την αύξηση της περιεκτικότητας σε φαινόλες, γεγονός που βελτιώνει τη γεύση και την οργανοληπτική ποιότητα του οίνου. Η τεχνολογία αυτή επιταχύνει την αντίδραση συμπίκνωσης μεταξύ προανθοκυανιδινών και ακεταλδεΐδης, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της πολυπλοκότητας του οίνου και την ελάφρυνση της στυπτικής γεύσης. Επιπλέον, η μέθοδος επιτρέπει τη βελτίωση των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών μέσω της αλληλεπίδρασης με ξυλοτεμαχίδια, ενισχύοντας τις αρωματικές νότες. Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα. Η υπερβολική ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις, όπως μείωση της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας και ανισορροπία στην οξύτητα του οίνου. Επίσης, η εφαρμογή της μεθόδου σε υψηλές εντάσεις μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες αλλαγές στη χημική σύσταση του οίνου, μειώνοντας την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Εν τέλει, ενώ η μέθοδος του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα στην επιτάχυνση της παλαίωσης, η σωστή ρύθμιση των παραμέτρων της εφαρμογής είναι κρίσιμη για την αποφυγή αρνητικών επιπτώσεων στην ποιότητα του οίνου. Τέλος, η μέθοδος του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου χρησιμοποιείται επίσης για την επιτάχυνση της παλαίωσης αποσταγμένων ποτών, προσφέροντας αρκετά πλεονεκτήματα αλλά και προκλήσεις. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα είναι η βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος. Η επεξεργασία με ηλεκτρικό πεδίο ενισχύει τη συγκέντρωση ευεργετικών συστατικών όπως τανίνες και φαινόλες, οι οποίες συμβάλλουν στη βελτίωση της γεύσης και του αρώματος. Επιπλέον, η τεχνολογία επιταχύνει τις χημικές αντιδράσεις, όπως η εστεροποίηση, μειώνοντας τον χρόνο που απαιτείται για την παλαίωση. Έτσι, ποτά όπως το μπράντι και το Baijiu παρουσίασαν αυξημένη συγκέντρωση εστέρων και άλλων πτητικών συστατικών, ενώ οι επιβλαβείς πτητικές ενώσεις, όπως οι αλδεΐδες και οι κετόνες, μειώθηκαν. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα. Κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, υπάρχει κίνδυνος εισαγωγής μεταλλικών στοιχείων από τα ηλεκτρόδια, όπως Fe, Cr, Zn και Mn, που μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τη γεύση του ποτού. Επίσης, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός συστήματος επεξεργασίας με παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι τεχνικά περίπλοκος, ενώ η μέθοδος μπορεί να απαιτεί ειδικές συνθήκες πίεσης για να προστατεύσει τα αέρια που περιέχονται στα ποτά. Συνολικά, η τεχνολογία του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην επιτάχυνση της παλαίωσης και στη βελτίωση της ποιότητας των αποσταγμένων ποτών, αλλά συνοδεύεται από προκλήσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

Σχετικά με την τεχνολογία μικροκυμάτων, αυτή έχει αναδειχθεί ως μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την επιτάχυνση διαδικασιών επεξεργασίας, όπως η παλαίωση και η εκχύλιση, προσφέροντας σημαντικά οφέλη τόσο σε οικονομικό όσο και σε περιβαλλοντικό επίπεδο. Αρχικά, όσον αφορά το κόστος, η αρχική επένδυση για την εγκατάσταση εξοπλισμού μικροκυμάτων μπορεί να είναι υψηλή. Οι συσκευές αυτές είναι ειδικά σχεδιασμένες για να διαχειρίζονται την τεχνολογία μικροκυμάτων και συνήθως απαιτούν σημαντική χρηματοδότηση για την αγορά και εγκατάστασή τους. Ωστόσο, με την πρόοδο της τεχνολογίας, το κόστος των συσκευών έχει μειωθεί, καθιστώντας την τεχνολογία πιο προσιτή. Παράλληλα, οι λειτουργικές δαπάνες περιλαμβάνουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία πρέπει να προέρχεται από βιώσιμες πηγές για να μειωθεί ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος. Η σωστή διαχείριση της ενέργειας και η συντήρηση του εξοπλισμού είναι κρίσιμες για την εξασφάλιση της αποδοτικότητας και της μακροχρόνιας λειτουργίας του, επηρεάζοντας το

συνολικό κόστος. Αν και η αρχική επένδυση και οι λειτουργικές δαπάνες ενδέχεται να είναι σημαντικές, τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας μικροκυμάτων συχνά υπερτερούν. Η μείωση του χρόνου επεξεργασίας και η βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος μπορούν να οδηγήσουν σε συνολική μείωση των εξόδων παραγωγής. Για παράδειγμα, στην οινοποιία, η χρήση μικροκυμάτων για την επιτάχυνση της παλαίωσης του οίνου μπορεί να μειώσει τον χρόνο αναμονής και να βελτιώσει την ποιότητα του τελικού προϊόντος, προσφέροντας οικονομικά οφέλη για τη βιομηχανία. Αναφορικά με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, η τεχνολογία μικροκυμάτων προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Η μείωση του χρόνου επεξεργασίας οδηγεί σε εξοικονόμηση ενέργειας. Η θερμότητα που παράγεται από τα μικροκύματα προκαλεί άμεσες αλλαγές στις μοριακές δομές των υλικών, μειώνοντας την ανάγκη για επιπλέον θερμότητα και έτσι μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας. Ωστόσο, η ενέργεια που χρησιμοποιείται πρέπει να προέρχεται από βιώσιμες πηγές για να ελαχιστοποιηθεί η περιβαλλοντική επιβάρυνση. Επιπλέον, η τεχνολογία μικροκυμάτων μειώνει την ανάγκη για χημικά συντηρητικά και πρόσθετα. Στην οινοποιία, η επεξεργασία με μικροκύματα μπορεί να μειώσει την ανάγκη για προσθήκη SO₂ ή άλλων συντηρητικών, βελτιώνοντας την ποιότητα του προϊόντος με πιο φυσικό τρόπο και μειώνοντας την περιβαλλοντική επιβάρυνση από χημικά απόβλητα. Επίσης, η τεχνολογία μικροκυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απολύμανση εξοπλισμού, όπως βαρέλια και δοχεία, μειώνοντας την ανάγκη για συχνές αντικαταστάσεις και μειώνοντας τα απόβλητα. Η ικανότητα των μικροκυμάτων να μειώνουν τον μικροβιακό πληθυσμό μπορεί επίσης να συμβάλει στη μείωση της χρήσης χημικών καθαριστικών.

Συνολικά, η τεχνολογία μικροκυμάτων προσφέρει σημαντικά οφέλη, μειώνοντας το κόστος και την περιβαλλοντική επιβάρυνση, εφόσον χρησιμοποιείται με υπεύθυνο τρόπο. Παρά τις αρχικές δαπάνες και την ανάγκη για διαχείριση της ενέργειας, τα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας καθιστούν τα μικροκύματα μια βιώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική επιλογή για την βελτίωση των διαδικασιών επεξεργασίας.

Η μέθοδος παλαίωσης του οίνου με μικροκύματα παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως η επιτάχυνση της διαδικασίας παλαίωσης και η βελτίωση των χαρακτηριστικών του οίνου. Η τεχνολογία αυτή μπορεί να συντομεύσει σημαντικά τον χρόνο παλαίωσης, επιταχύνοντας τις χημικές αντιδράσεις και επηρεάζοντας θετικά τη χρωματική αξία του οίνου, τις φαινολικές ενώσεις και τα αρωματικά χαρακτηριστικά. Τα μικροκύματα μπορούν να πολώσουν τα πολικά μόρια του οίνου, ευνοώντας τον επανασυνδυασμό των αδιάλυτων μορίων και επιταχύνοντας την ανάπτυξη του χρώματος και της γεύσης. Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα. Η υπερβολική διάρκεια ακτινοβολήσης ή υψηλή ισχύς μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπιθύμητες οξειδώσεις και αλλαγές στη γεύση και το χρώμα του οίνου. Ειδικότερα, η παρατεταμένη έκθεση σε μικροκύματα μπορεί να προκαλέσει μείωση της περιεκτικότητας σε ορισμένες φαινολικές ενώσεις, όπως οι ανθοκυανίνες, και να επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στην εμφάνιση του οίνου. Επίσης, η επίδραση της ακτινοβολήσης εξαρτάται από την ισχύ και τη διάρκεια της, με την ισχύ να παίζει σημαντικότερο ρόλο στη γεύση του οίνου. Ενώ η τεχνολογία των μικροκυμάτων προσφέρει ένα υποσχόμενο μέσο για ταχεία παλαίωση του οίνου, απαιτούνται προσεκτικές ρυθμίσεις και περαιτέρω έρευνες για την επίτευξη της επιθυμητής ποιότητας χωρίς αρνητικές παρενέργειες. Τέλος, η μέθοδος της παλαίωσης με

μικροκύματα προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στην επεξεργασία των αποσταγμένων ποτών. Από τη μία πλευρά, επιταχύνει τη διαδικασία παλαίωσης, μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο ωρίμανσης. Όπως και στον οίνο, τα μικροκύματα δημιουργούν ηλεκτρομαγνητικά πεδία που προκαλούν πόλωση των μορίων και μετατροπή της ενέργειας σε θερμότητα, επιταχύνοντας τις χημικές αντιδράσεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει στη μείωση ανεπιθύμητων συστατικών όπως το οξικό οξύ και η μεθανόλη, καθώς και στην αύξηση επιθυμητών ενώσεων όπως το οξικό αιθυλέστερα. Επίσης, παρατηρείται αύξηση των συγκεντρώσεων αλκοολών όπως η n-προπανόλη και η β-φαινυλαιθανόλη, οι οποίες ενδέχεται να βελτιώσουν τη γεύση του ποτού. Παρόλα αυτά, προκύπτουν και σημαντικά μειονεκτήματα. Οι υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας μπορούν να οδηγήσουν σε υπερβολική εξάτμιση και απώλεια αρωματικών ενώσεων, μειώνοντας την ποιότητα του αρώματος. Επίσης, η διαδικασία μπορεί να προκαλέσει μείωση των συγκεντρώσεων άλλων ουσιών, όπως οι εστέρες και οι αλδεΐδες, επηρεάζοντας αρνητικά τη συνολική γεύση και αρωματική ποιότητα του ποτού. Για την αποφυγή αυτών των αρνητικών επιπτώσεων, είναι απαραίτητη η προσεκτική ρύθμιση της ισχύος, της θερμοκρασίας και του χρόνου επεξεργασίας. Συνολικά, ενώ η μέθοδος των μικροκυμάτων μπορεί να προσφέρει γρήγορη και αποτελεσματική παλαίωση, απαιτεί λεπτομερή έλεγχο για τη διατήρηση της ποιότητας του ποτού.

Η τεχνολογία των υπερήχων υψηλής ισχύος προσφέρει επίσης σημαντικά πλεονεκτήματα στην παραγωγή οίνου, όσον αφορά τη μείωση του κόστους και τον περιορισμό του περιβαλλοντικού αντίκτυπου. Οι υπέρηχοι επιταχύνουν τη διαδικασία παλαίωσης και την εκχύλιση βιοδραστικών συστατικών, όπως οι πολυσακχαρίτες, φαινολικά και τανίνες, που συμβάλλουν στη γεύση και το άρωμα του οίνου. Η επιτάχυνση της παλαίωσης με αυτή τη μέθοδο μειώνει τον χρόνο παραγωγής, με αποτέλεσμα τη μείωση των κόστους που σχετίζεται με την αποθήκευση και διαχείριση του προϊόντος. Η παραδοσιακή παλαίωση είναι αργή και δαπανηρή, κάτι που η χρήση των υπερήχων μπορεί να εξομαλύνει, καθιστώντας την παραγωγική διαδικασία πιο οικονομική. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι η μείωση της χρήσης διοξειδίου του θείου (SO₂), ενός συντηρητικού που χρησιμοποιείται ευρέως στην οινοπαραγωγή. Οι υπέρηχοι, σε συνδυασμό με αντιοξειδωτικά όπως η γλουταθειόνη, μπορούν να μειώσουν την ανάγκη για SO₂, προσφέροντας έτσι έναν πιο φιλικό προς το περιβάλλον τρόπο συντήρησης του οίνου. Αυτό μειώνει τόσο τα κόστη των χημικών προσθέτων όσο και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της παραγωγής, καθιστώντας τη διαδικασία πιο βιώσιμη. Η βελτίωση της εκχύλισης των βιοδραστικών συστατικών με τη χρήση υπερήχων προσφέρει επίσης ποιοτικά πλεονεκτήματα, ενισχύοντας τη γεύση και την αντιοξειδωτική ικανότητα του οίνου. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε πολυσακχαρίτες κατά 20%, όπως αναφέρεται σε μελέτες, καταδεικνύει τη σημαντική συμβολή της τεχνολογίας αυτής στη βελτίωση του προϊόντος. Συγκεκριμένα στην οινοπαραγωγή η μέθοδος παρουσιάζει πλεονεκτήματα, αλλά και ορισμένα μειονεκτήματα στην ποιότητα του οίνου. Από τη μία πλευρά, επιταχύνει τη φυσική παλαίωση του οίνου, βελτιώνει την εκχύλιση φαινολικών ενώσεων και ανθοκυανινών και αυξάνει την ένταση του χρώματος, ειδικά στους ερυθρούς οίνους. Παράλληλα, συμβάλλει στη μείωση του χρόνου αποθήκευσης, προσφέροντας καλύτερο έλεγχο της σύνθεσης του οίνου. Επιπλέον, οι υπέρηχοι μπορούν να βελτιώσουν τις αντιοξειδωτικές ιδιότητες του οίνου

μέσω της ενίσχυσης του πολυμερισμού των φαινολικών ενώσεων. Συνεπώς, η μέθοδος των υπερήχων μπορεί να μειώσει τα κόστη παραγωγής, να βελτιώσει την ποιότητα του οίνου και να μειώσει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, προσφέροντας μια πιο αποδοτική και βιώσιμη λύση για την οινοπαραγωγή. Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα. Η δημιουργία ελεύθερων ριζών μέσω της σπηλαίωσης μπορεί να προκαλέσει οξειδωτική αποικοδόμηση των φαινολικών ενώσεων, μειώνοντας την ποιότητα με το πέρασμα του χρόνου. Επιπλέον, οι διαφοροποιήσεις στις παραμέτρους επεξεργασίας (συχνότητα, ένταση, διάρκεια) δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον ακριβή προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών. Ακόμη, οι υψηλές εντάσεις υπερήχων ενδέχεται να επηρεάσουν αρνητικά τις αρωματικές ενώσεις, όπως τα λιπαρά οξέα και οι ανώτερες αλκοόλες. Τέλος, η χρήση υπερήχων σε υψηλές εντάσεις μπορεί να προκαλέσει φθορά του εξοπλισμού, κάτι που ενδέχεται να επηρεάσει την ποιότητα της επεξεργασίας.

Η χρήση υπερήχων χρησιμοποιείται επίσης για την επιτάχυνση της παλαίωσης αλκοολούχων ποτών. Ένα βασικό πλεονέκτημα είναι η βελτίωση της εκχύλισης φαινολικών ενώσεων, οι οποίες ενισχύουν την ποιότητα και την οργανοληπτική αξία των ποτών όπως συμβαίνει και στον οίνο αντίστοιχα. Σε συγκριτικά σύντομο χρονικό διάστημα, όπως επτά ημέρες, η μέθοδος των υπερήχων μπορεί να αποδώσει βελτιώσεις έως και 33,94% στην εκχύλιση αυτών των ενώσεων. Επίσης, η χρήση υπερήχων βελτιώνει δύο κρίσιμους δείκτες παλαίωσης, την ένταση του χρώματος και την ολική περιεκτικότητα σε πολυφαινόλες, ενώ επιταχύνει τη διαδικασία, η οποία συνήθως απαιτεί χρόνια. Ταυτόχρονα, η μέθοδος αυτή έχει δείξει θετικά αποτελέσματα και σε άλλα ποτά, όπως τα λικέρ καφέ και ο οίνος από βατόμουρα, όπου επιτεύχθηκαν παρόμοια οφέλη σε σημαντικά μικρότερο χρονικό διάστημα σε σχέση με την παραδοσιακή παλαίωση. Σχετικά με τα μειονεκτήματα, παρατηρείται ότι η υπερβολική έκθεση σε υπερήχους, ειδικά όταν χρησιμοποιείται υψηλή ένταση και μεγάλης διάρκειας επεξεργασία, μπορεί να οδηγήσει σε αρνητικές επιδράσεις, όπως η αποικοδόμηση των ανθοκυανινών και η δημιουργία ανεπιθύμητων χρωματικών εκτροπών. Επιπλέον, η παραγωγή ελεύθερων ριζών κατά τη σπηλαίωση μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες οξειδωτικές αντιδράσεις, επηρεάζοντας αρνητικά τις οργανοληπτικές ιδιότητες του προϊόντος. Ακόμη, η επεξεργασία με υπερήχους μπορεί να επηρεάσει το χρώμα και τη γεύση των ποτών, καθώς η διαδικασία μπορεί να προκαλέσει μη ενζυμικό μαύρισμα λόγω αντιδράσεων Maillard. Συμπερασματικά, ενώ οι υπερήχοι προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην επιτάχυνση της παλαίωσης και την ποιότητα των ποτών, η χρήση τους απαιτεί προσεκτική διαχείριση των παραμέτρων για την αποφυγή αρνητικών επιδράσεων στο τελικό προϊόν.

Όπως οι προαναφερθείσες μέθοδοι, έτσι και η τεχνολογία υψηλής υδροστατικής πίεσης έχει αναδειχθεί ως μια καινοτόμος μέθοδος επεξεργασίας τροφίμων και οίνων, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα αλλά και προκλήσεις ως προς το κόστος και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί πιέσεις που κυμαίνονται από 200 έως 800 MPa για να επηρεάσει τις φυσικοχημικές ιδιότητες των τροφίμων, με την ικανότητα να συντηρεί και να τροποποιεί τα προϊόντα με ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Από οικονομική άποψη, η εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί σημαντική επένδυση. Οι μηχανές που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή και διατήρηση τέτοιων πιέσεων είναι ακριβές και η συντήρησή τους προσθέτει επιπλέον έξοδα. Επίσης, η ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία και συντήρηση αυτών

των πιέσεων συνιστά ένα σημαντικό λειτουργικό κόστος. Ωστόσο, τα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να αντισταθμίσουν τα παραπάνω έξοδα σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Η μέθοδος επιτρέπει την επιτάχυνση της διαδικασίας παλαίωσης, την παρασκευή προϊόντων με βελτιωμένα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά και τη συντήρηση τροφίμων με αυξημένη διάρκεια ζωής, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερα έσοδα από την πώληση προϊόντων υψηλότερης ποιότητας. Από περιβαλλοντική σκοπιά, η υπερ υψηλή πίεση προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους επεξεργασίας τροφίμων που απαιτούν θερμότητα ή χημικά πρόσθετα, η υψηλή υδροστατική πίεση χρησιμοποιεί μόνο νερό ως μέσο μεταφοράς της πίεσης, μειώνοντας την ανάγκη για επιβλαβείς ουσίες και την παραγωγή αποβλήτων. Αυτή η μέθοδος επιφέρει λιγότερη επιβάρυνση στο περιβάλλον σε σχέση με άλλες τεχνικές συντήρησης και επεξεργασίας, όπως η θερμική επεξεργασία ή η χρήση συντηρητικών. Ωστόσο, το ενεργειακό αποτύπωμα της μεθόδου, λόγω της υψηλής ενέργειας που απαιτείται για τη διατήρηση των πιέσεων, αποτελεί ένα περιβαλλοντικό παράγοντα που δεν πρέπει να αγνοηθεί. Επιπλέον, η χρήση της έχει αποδείξει την ικανότητά της να αδρανοποιεί μικροοργανισμούς, όπως βακτήρια και ζύμες, χωρίς να επηρεάζει δραματικά τα φυσικοχημικά και οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των τροφίμων. Στον τομέα της οινοποιίας, η μέθοδος αυτή έχει δείξει ότι μπορεί να επιταχύνει τη διαδικασία παλαίωσης του οίνου, τροποποιώντας τα χαρακτηριστικά του, όπως το χρώμα και η στυπτικότητα, με αποτέλεσμα την παραγωγή οίνων που έχουν χαρακτηριστικά παλαιωμένων. Η τεχνολογία έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε διάφορα προϊόντα τροφίμων, όπως χυμοί φρούτων, κρέας και θαλασσινά, επηρεάζοντας θετικά την ασφάλεια και την ποιότητά τους. Η μέθοδος της υψηλής υδροστατικής πίεσης όσον αφορά στην παλαίωση του οίνου προσφέρει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Από τη μια πλευρά, η μέθοδος παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα. Η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιτάχυνση της παλαίωσης του οίνου, προσφέροντας βελτιωμένα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, όπως ενισχυμένο άρωμα μαγειρεμένων φρούτων και μειωμένη φρουτώδη και λουλουδάτη νότα.

Επιπλέον, η τεχνολογία αυτή συμβάλλει στη διατήρηση των χαρακτηριστικών των ποικιλιών σταφυλιών και της γεωγραφικής προέλευσης του οίνου, επιτρέποντας την προσομοίωση της παλαίωσης χωρίς να αλλοιώνει σημαντικά τις φαινολικές συνθέσεις των οίνων. Ωστόσο, υπάρχουν και μειονεκτήματα. Η εφαρμογή υπερ υψηλής πίεσης άνω των 600 MPa και για χρονικά διαστήματα μεγαλύτερα από 1 ώρα ενδέχεται να επηρεάσει αρνητικά τη βιοχημική σταθερότητα του οίνου, προκαλώντας αλλαγές στις φυσικοχημικές ιδιότητες και την πτητική σύνθεση του οίνου. Ειδικότερα, οι μεταβολές στη φαινολική σύνθεση και η μείωση της περιεκτικότητας σε αμινοξέα μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά το τελικό προϊόν. Επίσης, αν και οι επεξεργασίες δεν φαίνεται να αλλοιώνουν σημαντικά τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά αρχικά, οι επιπτώσεις τους γίνονται πιο έντονες με την πάροδο του χρόνου, καθώς η αποθήκευση μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές αλλαγές στη σύνθεση των πτητικών ενώσεων. Συνολικά, η υψηλή υδροστατική πίεση είναι μια υποσχόμενη τεχνολογία για την ταχεία παλαίωση του οίνου, αλλά η εφαρμογή της απαιτεί προσεκτικό έλεγχο παραμέτρων όπως η πίεση και ο χρόνος, προκειμένου να αποφευχθούν αρνητικές επιπτώσεις στην ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Η υπερ υψηλή πίεση χρησιμοποιείται επίσης στην επεξεργασία αποσταγμένων ποτών. Για παράδειγμα, η επεξεργασία κινέζικων λικέρ με υπερ υψηλή πίεση είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση του οξικού οξέος και την αύξηση των συγκεντρώσεων οξικού αιθυλεστέρα και εξανοϊκού αιθυλεστέρα. Αυτές οι αλλαγές βελτίωσαν τη γεύση των λικέρ, κάνοντάς τα να πλησιάζουν τα παλαιωμένα προϊόντα, αλλά απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για τη βελτίωση της τεχνολογίας για εμπορική χρήση. Ωστόσο, ενδέχεται να επηρεάσει αρνητικά την παλαίωση ορισμένων ποτών, όπως τα λικέρ, λόγω των χημικών αντιδράσεων που προκαλούνται από τη μεταβολή του όγκου υπό πίεση. Στην περίπτωση των αποσταγμένων ποτών, όπως τα αποστάγματα σόργου και το baijiu, η υπερ υψηλή πίεση βελτίωσε την περιεκτικότητα σε οξικό αιθυλεστέρα, αν και μείωσε την περιεκτικότητα σε αλκοόλη. Στο baijiu, η υπερ υψηλή πίεση επηρεάζει τα αρώματα του ποτού, αλλά οι αλλαγές δεν είναι πάντα διαρκείς και ενδέχεται να εξαφανιστούν μετά από μακροχρόνια αποθήκευση. Η τεχνολογία εκτόξευσης νερού υψηλής πίεσης μειώνει την περιεκτικότητα σε ανεπιθύμητα συστατικά και βελτιώνει τη γεύση του baijiu, αλλά έχει μειονεκτήματα, όπως η απώλεια αποσταγμένου ποτού λόγω αυξημένης ταχύτητας ροής αέρα και η ανάγκη για υψηλές ηλεκτρικές εισόδους, που επηρεάζουν το κόστος. Συμπερασματικά, η υπερ υψηλή πίεση αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για τη βιομηχανία τροφίμων και οίνων, με σημαντικά οφέλη όσον αφορά την επιτάχυνση της παλαίωσης και τη συντήρηση προϊόντων. Ωστόσο, η υψηλή αρχική επένδυση και το ενεργειακό κόστος της μεθόδου αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η τεχνολογία προσφέρει μια οικολογική εναλλακτική στις παραδοσιακές μεθόδους επεξεργασίας, αλλά η βιωσιμότητά της εξαρτάται από τη συνεχιζόμενη εξέλιξη και βελτίωση των σχετικών τεχνολογιών και διαδικασιών.

Η σύγκριση των μεθόδων επεξεργασίας οίνων και ποτών, όπως το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο, οι υπέρηχοι υψηλής ισχύος, τα μικροκύματα και η υψηλή υδροστατική πίεση, παρουσιάζει ενδιαφέρον λόγω των διαφορετικών πλεονεκτημάτων και περιορισμών που κάθε τεχνολογία προσφέρει.

Η μέθοδος του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου συνήθως έχει χαμηλότερο ενεργειακό κόστος σε σύγκριση με τους υπέρηχους. Το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δεν απαιτεί θερμότητα για την επεξεργασία των ποτών, γεγονός που μειώνει το ενεργειακό κόστος και είναι πιο φιλικό προς το περιβάλλον, καθώς ελαχιστοποιεί τις εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με την παραγωγή ενέργειας. Η μέθοδος των υπέρηχων απαιτεί σημαντική ποσότητα ενέργειας γεγονός που μπορεί να αυξήσει το συνολικό κόστος παραγωγής. Από την άποψη των οργανοληπτικών χαρακτηριστικών, οι υπέρηχοι είναι εξαιρετικοί στην εκχύλιση αρωματικών και γευστικών στοιχείων. Αυτό τους καθιστά ιδανικούς για ποτά όπως οι οίνοι, όπου η ένταση των αρωμάτων και της γεύσης είναι κρίσιμη. Αντίθετα, το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο διατηρεί καλύτερα τη δομή και τις θρεπτικές αξίες των ποτών λόγω της έλλειψης θερμότητας, αλλά δεν εξάγει τα αρώματα με την ίδια αποτελεσματικότητα.

Όσον αφορά την μέθοδο του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου έναντι της υψηλής υδροστατικής πίεσης, η μέθοδος του παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου συνήθως έχει χαμηλότερο ενεργειακό κόστος και σε σύγκριση με την υψηλή υδροστατική πίεση. Η υψηλή υδροστατική πίεση απαιτεί σημαντική επένδυση για την κατασκευή και συντήρηση του εξοπλισμού υπερ υψηλής πίεσης, καθιστώντας την πιο δαπανηρή. Στον περιβαλλοντικό τομέα, η τεχνολογία παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου προσφέρει σαφή πλεονεκτήματα, καθώς λειτουργεί σε

θερμοκρασία δωματίου και μειώνει την ανάγκη για χημικά συντηρητικά, κάτι που συντελεί στη μείωση των εκπομπών CO₂. Αντίθετα, η υψηλή υδροστατική πίεση απαιτεί μεγάλες ποσότητες ενέργειας για τη δημιουργία και διατήρηση υψηλών πιέσεων, κάτι που έχει μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Σε ό,τι αφορά τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο μπορεί να ενισχύσει την ένταση του χρώματος και την περιεκτικότητα σε φαινόλες του οίνου, βελτιώνοντας τη γεύση και την ποιότητα. Η υψηλή υδροστατική πίεση, από την άλλη πλευρά, διατηρεί τη γεύση και τα αρώματα χωρίς σημαντικές αλλαγές, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια κάποιων ευαίσθητων ενώσεων λόγω της πίεσης.

Σχετικά με την τεχνολογία παλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου και των μικροκυμάτων, η τεχνολογία των μικροκυμάτων απαιτεί και αυτή υψηλότερη αρχική επένδυση και τα λειτουργικά έξοδα μπορεί να είναι υψηλότερα λόγω της κατανάλωσης ενέργειας. Ωστόσο, η βελτίωση της ποιότητας του τελικού προϊόντος και η μείωση του χρόνου επεξεργασίας με την χρήση μικροκυμάτων μπορούν να οδηγήσουν σε συνολική μείωση των εξόδων παραγωγής. Αντίθετα, το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο έχει χαμηλότερο κόστος ενέργειας και από την μέθοδο των μικροκυμάτων αλλά η ποιότητα του προϊόντος μπορεί να μην είναι τόσο βελτιωμένη όσο με τη χρήση μικροκυμάτων. Όσον αφορά τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, τα μικροκύματα μπορούν να επιταχύνουν τη διαδικασία παλαίωσης του οίνου, βελτιώνοντας την ένταση του χρώματος και τις φαινολικές ενώσεις, ενώ το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο μπορεί επίσης να βελτιώσει τη γεύση και τη συνολική ποιότητα, αλλά με λιγότερη ένταση σε σύγκριση με τα μικροκύματα.

Η σύγκριση μεταξύ μικροκυμάτων και υψηλής υδροστατικής πίεσης δείχνει ότι τα μικροκύματα προσφέρουν γρήγορη επεξεργασία, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο παραγωγής. Ωστόσο, η θερμότητα που χρησιμοποιούν, παρόμοια με τους υπέρηχους, μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των ποτών, προκαλώντας αλλαγές στη γεύση και τα αρώματα. Αντίθετα, η υψηλή υδροστατική πίεση διατηρεί καλύτερα τη φυσική γεύση και υφή των ποτών, καθώς δεν χρησιμοποιεί θερμότητα. Παρά το γεγονός ότι απαιτεί μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση και πιο περίπλοκες διαδικασίες, η υψηλή υδροστατική πίεση είναι πιο κατάλληλη για ποτά όπου η διατήρηση των φυσικών χαρακτηριστικών είναι κρίσιμη. Αν και τα μικροκύματα είναι πιο γρήγορα, η υψηλή υδροστατική πίεση παρέχει ανώτερη μικροβιακή αδρανοποίηση χωρίς την ανάγκη θερμότητας, εξασφαλίζοντας υψηλότερη ποιότητα προϊόντος.

Η τεχνολογία υπέρηχων είναι συνήθως πιο οικονομική από την τεχνολογία μικροκυμάτων, αλλά η αρχική επένδυση και οι λειτουργικές δαπάνες εξαρτώνται από την ποιότητα και την ισχύ του εξοπλισμού. Οι υπέρηχοι προσφέρουν πλεονεκτήματα στην εκχύλιση φαινολικών ενώσεων και τη βελτίωση της γεύσης, αλλά η χρήση τους μπορεί να προκαλέσει οξειδωτική αποικοδόμηση και μείωση των αρωματικών χαρακτηριστικών αν δεν ρυθμιστούν σωστά οι παράμετροι. Η περιβαλλοντική επίπτωση των υπέρηχων μπορεί να είναι μικρότερη από αυτή των μικροκυμάτων, λόγω της μειωμένης ανάγκης για ενέργεια. Ωστόσο, η δημιουργία ελεύθερων ριζών μέσω της σπηλαίωσης μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητες οξειδωτικές αντιδράσεις, κάτι που πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Η υψηλή υδροστατική πίεση απαιτεί σημαντική επένδυση για την κατασκευή και τη λειτουργία του εξοπλισμού, καθιστώντας την πιο δαπανηρή από τους υπέρηχους. Ωστόσο, η υψηλή

υδροστατική πίεση προσφέρει πλεονεκτήματα στη διατήρηση της ποιότητας του ποτού, χωρίς σημαντικές αλλαγές στις γεύσεις και τα αρώματα, σε σύγκριση με τους υπερήχους που μπορεί να οδηγήσουν σε αλλαγές λόγω της δημιουργίας ελεύθερων ριζών. Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της υψηλής υδροστατικής πίεσης είναι συνήθως μεγαλύτερος λόγω της υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης για την επίτευξη υψηλών πιέσεων, σε αντίθεση με τους υπερήχους που καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια.

Συνολικά, η πιο οικονομική και περιβαλλοντικά φιλική μέθοδος επεξεργασίας ποτών είναι το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Με το χαμηλό ενεργειακό κόστος και τη λειτουργία χωρίς θερμότητα, αυτή η τεχνολογία μειώνει τις εκπομπές CO₂ και περιορίζει την ανάγκη για χημικά συντηρητικά, καθιστώντας την ιδιαίτερα φιλική προς το περιβάλλον. Έτσι, προσφέρει μια οικονομικά αποδοτική και βιώσιμη λύση σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες. Ακολουθούν οι υπέρηχοι, οι οποίοι, αν και απαιτούν μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση, διακρίνονται για την εξαιρετική τους ικανότητα να εκχυλίζουν αρωματικές και γευστικές ενώσεις. Αυτή η ικανότητα ενισχύει τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των ποτών, προσφέροντας πιο έντονη γεύση και άρωμα, ιδιαίτερα σε προϊόντα όπως ο οίνος. Η τεχνολογία των μικροκυμάτων προσφέρει τα πλεονεκτήματα της γρήγορης επεξεργασίας, γεγονός που μπορεί να μειώσει τον συνολικό χρόνο παραγωγής και συνεπώς να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους. Ωστόσο, η χρήση θερμότητας ενδέχεται να αλλοιώσει τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του ποτού, προκαλώντας πιθανές αλλαγές στη γεύση και τα αρώματα, κάτι που μπορεί να είναι ανεπιθύμητο σε προϊόντα υψηλής ποιότητας. Από την άλλη πλευρά, η υψηλή υδροστατική πίεση κατατάσσεται ως η πλέον δαπανηρή μέθοδος, τόσο λόγω της υψηλής κατανάλωσης ενέργειας που απαιτεί αλλά και λόγω του κόστους κατασκευής και συντήρησης του εξοπλισμού. Αυτή η μέθοδος έχει τον μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, αλλά ταυτόχρονα προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στη διατήρηση των φυσικών χαρακτηριστικών των ποτών. Η υψηλή υδροστατική πίεση, παρά το κόστος και τις ενεργειακές της απαιτήσεις, εξασφαλίζει ποιοτικά προϊόντα με υψηλό επίπεδο μικροβιακής αδρανοποίησης, διατηρώντας αναλλοίωτα τα φυσικά αρώματα και τη γεύση των ποτών. Όσον αφορά τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, τόσο η υπερ υψηλή πίεση όσο και το παλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο ξεχωρίζουν, καθώς δεν χρησιμοποιούν θερμότητα και προστατεύουν τα αρωματικά στοιχεία του προϊόντος. Αντίθετα, για πιο γρήγορη επεξεργασία, η τεχνολογία των μικροκυμάτων είναι η καταλληλότερη, ενώ για ανώτερη ποιότητα προϊόντων, η υψηλή υδροστατική πίεση είναι η καλύτερη επιλογή. Συμπερασματικά, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας επεξεργασίας εξαρτάται από τις ανάγκες της παραγωγής, το κόστος, τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο και τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Η εξισορρόπηση ανάμεσα στην εξοικονόμηση ενέργειας, την ποιότητα και την ταχύτητα επεξεργασίας είναι καθοριστική για την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου.

4. Βιβλιογραφία

- Alexandre, H., & Guilloux-Benatier, M. (2006). Yeast autolysis in sparkling wine - A review. In *Australian Journal of Grape and Wine Research* (Vol. 12, Issue 2, pp. 119–127). <https://doi.org/10.1111/j.1755-0238.2006.tb00051.x>
- Antón, M. J., Suárez Valles, B., García Hevia, A., & Picinelli Lobo, A. (2014). Aromatic profile of ciders by chemical quantitative, gas chromatography-olfactometry, and sensory analysis. *Journal of Food Science*, 79(1). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12323>
- Aoshima, H., Hossain, S. J., Koda, H., & Kiso, Y. (2009). Why Is an Aged Whiskey Highly Valued? . *Current Nutrition & Food Science*, 5(3), 204-208. <https://doi.org/10.2174/157340109789007090>
- Arapitsas, P., Antonopoulos, A., Stefanou, E., & Dourtoglou, V. G. (2004). Artificial aging of wines using oak chips. *Food Chemistry*, 86(4), 563–570. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.10.003>
- Arapitsas, P., Speri, G., Angeli, A., Perenzoni, D., & Mattivi, F. (2014). The influence of storage on the “chemical age” of red wines. *Metabolomics*, 10(5), 816–832. <https://doi.org/10.1007/s11306-014-0638-x>
- Areshian, G. E., Gasparyan, B., Avetisyan, P. S., Pinhasi, R., Wilkinson, K., Smith, A., Hovsepyan, R., & Zardaryan, D. (2012). The chalcolithic of the Near East and south-eastern Europe: Discoveries and new perspectives from the cave complex Areni-1, Armenia. *Antiquity*, 86(331), 115–130. <https://doi.org/10.1017/S0003598X00062499>
- Balcerek, M., Katarzyna Pielech-Przybylska, Urszula Dziekońska-Kubczak, Piotr Patelski, & Ewelina Strąk. (2017). *Changes in the Chemical Composition of Plum Distillate During Maturation with Oak Chips under Different Conditions*.
- Bautista-Ortín, A. B., Fernández-Fernández, J. I., López-Roca, J. M., & Gómez-Plaza, E. (2007). The effects of enological practices in anthocyanins, phenolic compounds and wine colour and their dependence on grape characteristics. *Journal of Food Composition and Analysis*, 20(7), 546–552. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2007.04.008>
- Bordiga, M., Travaglia, F., Locatelli, M., Coisson, J. D., & Arlorio, M. (2011). Characterisation of polymeric skin and seed proanthocyanidins during ripening in six *Vitis vinifera* L. cv. *Food Chemistry*, 127(1), 180–187. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.141>
- Bozalongo, R., Carrillo, J. D., Torroba, M. Á. F., & Tena, M. T. (2007). Analysis of French and American oak chips with different toasting degrees by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1173(1–2), 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2007.09.079>
- Budić-Leto, I., Lovrić, T., Kljusurić, J. G., Pezo, I., & Vrhovšek, U. (2006). Anthocyanin composition of the red wine Babić affected by maceration treatment. *European Food Research and Technology*, 222(3–4), 397–402. <https://doi.org/10.1007/s00217-005-0067-1>

- Cai, W., Tang, F., Guo, Z., Guo, X., Zhang, Q., Zhao, X., Ning, M., & Shan, C. (2020). Effects of pretreatment methods and leaching methods on jujube wine quality detected by electronic senses and HS-SPME–GC–MS. *Food Chemistry*, 330. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127330>
- Canas, S. (2017). Phenolic composition and related properties of aged wine spirits: Influence of barrel characteristics. a review. In *Beverages* (Vol. 3, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/beverages3040055>
- Canas, S., Caldeira, I., Anjos, O., & Belchior, A. P. (2019). Phenolic profile and colour acquired by the wine spirit in the beginning of ageing: Alternative technology using micro-oxygenation vs traditional technology. *LWT*, 111, 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.05.018>
- Carew, A. L., Close, D. C., & Damberg, R. G. (2015). Yeast strain affects phenolic concentration in Pinot noir wines made by microwave maceration with early pressing. *Journal of Applied Microbiology*, 118(6), 1385–1394. <https://doi.org/10.1111/jam.12785>
- Carew, A. L., Sparrow, A. M., Curtin, C. D., Close, D. C., & Damberg, R. G. (2014). Microwave Maceration of Pinot Noir Grape Must: Sanitation and Extraction Effects and Wine Phenolics Outcomes. *Food and Bioprocess Technology*, 7(4), 954–963. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1112-x>
- Carpena, M., Pereira, A. G., Prieto, M. A., & Simal-Gandara, J. (2020). Wine aging technology: Fundamental role of wood barrels. In *Foods* (Vol. 9, Issue 9). MDPI Multidisciplinary Digital Publishing Institute. <https://doi.org/10.3390/foods9091160>
- Chang, A. C. (2003). The effects of gamma irradiation on rice wine maturation. *Food Chemistry*, 83(3), 323–327. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00050-5)
- Chang, C. K., Ko, W. C., Chen, Y. A., Chan, Y. J., Cheng, K. C., Lai, P. S., & Hsieh, C. W. (2019). Evaluation of using high-pressure homogenization technology in enhancing the aroma synthesis of sorghum spirits. *LWT*, 105, 314–320. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.01.053>
- Chemat, F., Rombaut, N., Sicaire, A. G., Meullemiestre, A., Fabiano-Tixier, A. S., & Abert-Vian, M. (2017). Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. In *Ultrasonics Sonochemistry* (Vol. 34, pp. 540–560). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.035>
- Chen, X., Li, L., You, Y., Mao, B., Zhao, W., & Zhan, J. (2012). The Effects of Ultra-high Pressure Treatment on the Phenolic Composition of Red Wine. In *Afr. J. Enol. Vitic* (Vol. 33, Issue 2).
- Cioch-Skoneczny, M., Bajerski, M., Klimczak, K., Satora, P., & Skoneczny, S. (2023). Influence of oak chips addition on the physicochemical properties of beer. *European Food Research and Technology*, 249(1), 183–197. <https://doi.org/10.1007/s00217-022-04143-3>
- Clodoveo, M. L., Dipalmo, T., Rizzello, C. G., Corbo, F., & Crupi, P. (2016). Emerging technology to develop novel red winemaking practices: An overview. In *Innovative*

Food Science and Emerging Technologies (Vol. 38, pp. 41–56). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.08.020>

Coelho, E., Teixeira, J. A., Domingues, L., Tavares, T., & Oliveira, J. M. (2019). Factors affecting extraction of adsorbed wine volatile compounds and wood extractives from used oak wood. *Food Chemistry*, 295, 156–164.

<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.093>

Cosme, F., Nunes, F. M., & Filipe-Ribeiro, L. (Eds.). (2021). *Chemistry and Biochemistry of Winemaking, Wine Stabilization and Aging*. BoD–Books on Demand, (Chapter 5, pp. 95–120).

Corrales, M., Butz, P., & Tauscher, B. (2008). Anthocyanin condensation reactions under high hydrostatic pressure. *Food Chemistry*, 110(3), 627–635.

<https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2008.02.055>

Cuyckens, F., & Claeys, M. (2004). Mass spectrometry in the structural analysis of flavonoids. In *Journal of Mass Spectrometry* (Vol. 39, Issue 1, pp. 1–15).

<https://doi.org/10.1002/jms.585>

Dai, N., Zhang, X., Cai, Z., Ji, W., Wu, Y., Li, K., Shao, T., & Cui, X. (2021). The effect of different pulsed magnetic field and microwave composite treatment on the aroma compounds and sensory characteristics of soy-sauce flavor Chinese liquor. *CYTA - Journal of Food*, 19(1), 793–804. <https://doi.org/10.1080/19476337.2021.1992017>

del Alamo-Sanza, M., & Nevares, I. (2018). Oak wine barrel as an active vessel: A critical review of past and current knowledge. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 58, Issue 16, pp. 2711–2726). Taylor and Francis Inc.

<https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1330250>

del Fresno, J. M., Morata, A., Escott, C., Loira, I., Cuerda, R., & Suárez-Lepe, J. A. (2019). Sonication of yeast biomasses to improve the ageing on lees technique in red wines. *Molecules*, 24(3).

<https://doi.org/10.3390/molecules24030635>

Delgado-González, M. J., García-Moreno, M. de V., & Guillén-Sánchez, D. A. (2022). A Theoretical Approximation of the Accelerating Effects of Ultrasound about the Extraction of Phenolic Compounds from Wood by Wine Spirits. *Foods*, 11(4).

<https://doi.org/10.3390/foods11040517>

Delgado-González, M. J., Sánchez-Guillén, M. M., García-Moreno, M. V., Rodríguez-Dodero, M. C., García-Barroso, C., & Guillén-Sánchez, D. A. (2017). Study of a laboratory-scaled new method for the accelerated continuous ageing of wine spirits by applying ultrasound energy. *Ultrasonics Sonochemistry*, 36, 226–235.

<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.11.031>

Dodd, E. K. (2020). *Roman and late antique wine production in the eastern Mediterranean : a comparative archaeological study at Antiochia ad Cragum (Turkey) and Delos (Greece)*.

Dumitriu, G. D., Teodosiu, C., Gabur, I., Cotea, V. V., Peinado, R. A., & de Lerma, N. L. (2019). Evaluation of aroma compounds in the process of wine ageing with oak chips. *Foods*, 8(12).

<https://doi.org/10.3390/foods8120662>

- Echave, J., Barral, M., Fraga-Corral, M., Prieto, M. A., & Simal-Gandara, J. (2021). Bottle aging and storage of wines: A review. In *Molecules* (Vol. 26, Issue 3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/molecules26030713>
- Eder, R., Návojská, J., Brandes, W., Nauer, S., & Frančáková, H. (2012). Influence of different oak chips on aroma compounds in wine Höhere Bundeslehranstalt und das Bundesamt für Wein-und Obstbau in Klosterneuburg INFLUENCE OF DIFFERENT OAK CHIPS ON AROMA COMPOUNDS IN WINE. In *Journal of Microbiology* (Issue 4). <https://www.researchgate.net/publication/266348739>
- El Darra, N., Rajha, H. N., Ducasse, M. A., Turk, M. F., Grimi, N., Maroun, R. G., Louka, N., & Vorobiev, E. (2016). Effect of pulsed electric field treatment during cold maceration and alcoholic fermentation on major red wine qualitative and quantitative parameters. *Food Chemistry*, 213, 352–360. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.073>
- Evrendilek, G. A., Li, S., Dantzer, W. R., & Zhang, Q. H. (2004). Pulsed electric field processing of beer: Microbial, sensory, and quality analyses. *Journal of Food Science*, 69(8). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb09892.x>
- Fan, W., Xu, Y., & Yu, A. (2006). Influence of oak chips geographical origin, toast level, dosage and aging time on volatile compounds of apple cider. *Journal of the Institute of Brewing*, 112(3), 255–263. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2006.tb00721.x>
- Fernández De Simón, B., Martínez, J., Sanz, M., Cadahía, E., Esteruelas, E., & Muñoz, A. M. (2014). Volatile compounds and sensorial characterisation of red wine aged in cherry, chestnut, false acacia, ash and oak wood barrels. *Food Chemistry*, 147, 346–356. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.09.158>
- Ferraretto, P., & Celotti, E. (2016). Preliminary study of the effects of ultrasound on red wine polyphenols. *CYTA - Journal of Food*, 14(4), 529–535. <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1149520>
- Francisco García Martín, J., & hui Feng, C. (2016). *Ultrasound for accelerating the wine ageing process from physicochemical point of view*. <https://www.researchgate.net/publication/298791009>
- Fu, X. Z., Zhang, Q. A., Zhang, B. S., & Liu, P. (2018). Effect of ultrasound on the production of xanthylum cation pigments in a model wine. *Food Chemistry*, 268, 431–440. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.120>
- García Martín, J. F., & Sun, D. W. (2013). Ultrasound and electric fields as novel techniques for assisting the wine ageing process: The state-of-the-art research. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 33, Issue 1, pp. 40–53). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2013.06.005>
- Garde-Cerdán, T., Marsellés-Fontanet, A. R., Arias-Gil, M., Ancín-Azpilicueta, C., & Martín-Belloso, O. (2008). Effect of storage conditions on the volatile composition of wines obtained from must stabilized by PEF during ageing without SO₂. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9(4), 469–476. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.05.002>

- Gonen, L. D., Tavor, T., & Spiegel, U. (2021). The positive effect of aging in the case of wine. *Mathematics*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/math9091012>
- González-Arenzana, L., Santamaría, P., López, R., Garijo, P., Gutiérrez, A. R., Garde-Cerdán, T., & López-Alfaro, I. (2013). Microwave technology as a new tool to improve microbiological control of oak barrels: A preliminary study. *Food Control*, 30(2), 536–539. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.08.008>
- González-Arenzana, L., Sevenich, R., Rauh, C., López, R., Knorr, D., & López-Alfaro, I. (2016). Inactivation of *Brettanomyces bruxellensis* by High Hydrostatic Pressure technology. *Food Control*, 59, 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.04.038>
- González-Centeno, M. R., Teissedre, P.-L., Thibon, C., & Chira, K. (2020). Does barrel size influence white wine aging quality? *IVES Technical Reviews, Vine and Wine*. <https://doi.org/10.20870/ives-tr.2020.3305>
- González-Manzano, S., Santos-Buelga, C., Dueñas, M., Rivas-Gonzalo, J. C., & Escribano-Bailón, T. (2008). Colour implications of self-association processes of wine anthocyanins. *European Food Research and Technology*, 226, 483–490.
- Guasch-Jané, M. R., Andrés-Lacueva, C., Jáuregui, O., & Lamuela-Raventós, R. M. (2006). First evidence of white wine in ancient Egypt from Tutankhamun's tomb. *Journal of Archaeological Science*, 33(8), 1075–1080. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.11.012>
- Harutyunyan, M., & Malfeito-Ferreira, M. (2022a). Historical and Heritage Sustainability for the Revival of Ancient Wine-Making Techniques and Wine Styles. In *Beverages* (Vol. 8, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/beverages8010010>
- Harutyunyan, M., & Malfeito-Ferreira, M. (2022b). The Rise of Wine among Ancient Civilizations across the Mediterranean Basin. In *Heritage* (Vol. 5, Issue 2, pp. 788–812). MDPI. <https://doi.org/10.3390/heritage5020043>
- Hernanz, D., Gallo, V., Recamales, Á. F., Meléndez-Martínez, A. J., González-Miret, M. L., & Heredia, F. J. (2009). Effect of storage on the phenolic content, volatile composition and colour of white wines from the varieties Zalema and Colombard. *Food Chemistry*, 113(2), 530–537. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.096>
- Hong, J., Wang, J., Zhang, C., Zhao, Z., Tian, W., Wu, Y., Chen, H., Zhao, D., & Sun, J. (2021). Unraveling variation on the profile aroma compounds of strong aroma type of Baijiu in different regions by molecular matrix analysis and olfactory analysis. *RSC Advances*, 11(53), 33511–33521. <https://doi.org/10.1039/d1ra06073b>
- Hoz, A., Díaz-Ortiz, À., & Moreno, A. (2005). Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects. *Chemical Society Reviews*, 34(2), 164–178. <https://doi.org/10.1039/b411438h>
- Jia, W., Fan, Z., Du, A., Shi, L., & Ren, J. (2022). Characterisation of key odorants causing honey aroma in Feng-flavour Baijiu during the 17-year ageing process by multivariate analysis combined with foodomics. *Food Chemistry*, 374. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131764>

- Jourdes, M., Michel, J., Saucier, C., Quideau, S., & Teissedre, P. L. (2011). Identification, amounts, and kinetics of extraction of C-glucosidic ellagitannins during wine aging in oak barrels or in stainless steel tanks with oak chips. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 401(5), 1535–1543. <https://doi.org/10.1007/s00216-011-4949-8>
- Kallithraka, S., Salacha, M. I., & Tzourou, I. (2009). Changes in phenolic composition and antioxidant activity of white wine during bottle storage: Accelerated browning test versus bottle storage. *Food Chemistry*, 113(2), 500–505. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.07.083>
- Kanha, N., Surawang, S., Pitchakarn, P., Regenstein, J. M., & Laokuldilok, T. (2019). Copigmentation of cyanidin 3-O-glucoside with phenolics: Thermodynamic data and thermal stability. *Food Bioscience*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2019.100419>
- Karvela, E., Makris, D. P., Kefalas, P., & Moutounet, M. (2008). Extraction of phenolics in liquid model matrices containing oak chips: Kinetics, liquid chromatography-mass spectroscopy characterisation and association with in vitro antiradical activity. *Food Chemistry*, 110(1), 263–272. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.02.001>
- Kielbasa, P., Drózdź, T., & Popardowski, E. (2021). Influence of coniferous wood conditioning by pulsed electric field on its combustion heat characteristics. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(3), 1–15. <https://doi.org/10.3390/app11030983>
- Klán, P., Literák, J., & Relich, S. (2001). Molecular photochemical thermometers: investigation of microwave superheating effects by temperature dependent photochemical processes. In *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* (Vol. 143).
- Krüger, R. T., Alberti, A., & Nogueira, A. (2022). Current Technologies to Accelerate the Aging Process of Alcoholic Beverages: A Review. In *Beverages* (Vol. 8, Issue 4). MDPI. <https://doi.org/10.3390/beverages8040065>
- Le Floch, A., Jourdes, M., & Teissedre, P. L. (2015). Polysaccharides and lignin from oak wood used in cooperage: Composition, interest, assays: A review. In *Carbohydrate Research* (Vol. 417, pp. 94–102). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2015.07.003>
- Li, X., Zhang, L., Peng, Z., Zhao, Y., Wu, K., Zhou, N., Yan, Y., Ramaswamy, H. S., Sun, J., & Bai, W. (2020). The impact of ultrasonic treatment on blueberry wine anthocyanin color and its In-vitro anti-oxidant capacity. *Food Chemistry*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127455>
- Lin, Z. R., Zeng, X. A., Yu, S. J., & Sun, D. W. (2012). Enhancement of Ethanol-Acetic Acid Esterification Under Room Temperature and Non-catalytic Condition via Pulsed Electric Field Application. *Food and Bioprocess Technology*, 5(7), 2637–2645. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0678-4>
- Liu, L., Loira, I., Morata, A., Suárez-Lepe, J. A., González, M. C., & Rauhut, D. (2016). Shortening the ageing on lees process in wines by using ultrasound and microwave treatments both combined with stirring and abrasion techniques. *European Food Research and Technology*, 242(4), 559–569. <https://doi.org/10.1007/s00217-015-2566-z>

- Liu, S., Li, S., Li, S., Wang, Y., Fan, L., & Zhou, J. (2024). Effects of high power pulsed microwave on the enhanced color and flavor of aged blueberry wine. *Food Science and Biotechnology*, 33(1), 33–45. <https://doi.org/10.1007/s10068-023-01325-x>
- Liu, Y., He, F., Shi, Y., Zhang, B., & Duan, C. Q. (2018). Effect of the high pressure treatments on the physicochemical properties of the young red wines supplemented with pyruvic acid. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 48, 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.010>
- López, N., Puértolas, E., Condón, S., Álvarez, I., & Raso, J. (2008a). Application of pulsed electric fields for improving the maceration process during vinification of red wine: Influence of grape variety. *European Food Research and Technology*, 227(4), 1099–1107. <https://doi.org/10.1007/s00217-008-0825-y>
- López, N., Puértolas, E., Condón, S., Álvarez, I., & Raso, J. (2008b). Effects of pulsed electric fields on the extraction of phenolic compounds during the fermentation of must of Tempranillo grapes. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9(4), 477–482. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.11.001>
- Lukić, K., Brnčić, M., Ćurko, N., Tomašević, M., Valinger, D., Denoya, G. I., Barba, F. J., & Ganić, K. K. (2019). Effects of high power ultrasound treatments on the phenolic, chromatic and aroma composition of young and aged red wine. *Ultrasonics Sonochemistry*, 59. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104725>
- Ma, T., Wang, J., Wang, H., Zhao, Q., Zhang, F., Ge, Q., Li, C., Gamboa, G. G., Fang, Y., & Sun, X. (2022). Wine aging and artificial simulated wine aging: Technologies, applications, challenges, and perspectives. *Food Research International*, 153, 110953. <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2022.110953>
- Mandal, V., & Hemalatha, S. (2007). *Microwave Assisted Extraction-An Innovative and Promising Extraction Tool for Medicinal Plant Research*. <https://www.researchgate.net/publication/237218276>
- Marsellés-Fontanet, À. R., Puig, A., Olmos, P., Mínguez-Sanz, S., & Martín-Belloso, O. (2009). Optimising the inactivation of grape juice spoilage organisms by pulse electric fields. *International Journal of Food Microbiology*, 130(3), 159–165. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2008.12.034>
- Martínez, J. M., Delso, C., Maza, M. A., Álvarez, I., & Raso, J. (2019). Pulsed electric fields accelerate release of mannoproteins from *Saccharomyces cerevisiae* during aging on the lees of Chardonnay wine. *Food Research International*, 116, 795–801. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.013>
- Martínez-Gil, A., Del Alamo-Sanza, M., Sánchez-Gómez, R., & Nevares, I. (2018). Different woods in cooperage for oenology: A review. In *Beverages* (Vol. 4, Issue 4). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/beverages4040094>
- Maza, M. A., Delso, C., Álvarez, I., Raso, J., & Martínez, J. M. (2020). Effect of pulsed electric fields on mannoproteins release from *Saccharomyces cerevisiae* during the aging on lees of Caladoc red wine. *LWT*, 118. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108788>

- Muñoz García, R., Martínez-Lapuente, L., Guadalupe, Z., Ayestarán, B., Marchante, L., Díaz-Maroto, M. C., Pérez Porras, P., Bautista Ortín, A. B., Gómez-Plaza, E., & Pérez-Coello, M. S. (2023). Ultrasound and microwave techniques for assisting ageing on lees of red wines. *Food Chemistry*, 426. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136660>
- Nonier, M. F., Vivas, N., Vivas de Gaulejac, N., Pianet, I., & Fouquet, E. (2007). A kinetic study of the reactions of (+)-catechin with aldehydes derived from toasted oak. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 87(11), 2081-2091. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2968>
- Nose, A., & Hojo, M. (2006). Hydrogen bonding of water-ethanol in alcoholic beverages. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 102(4), 269–280. <https://doi.org/10.1263/jbb.102.269>
- Ntourtoglou, G. V., Drosou, F., Enoch, Y., Tsapou, E. A., Bozinou, E., Athanasiadis, V., Chatzilazarou, A., Dourtoglou, E. G., Lalas, S. I., & Dourtoglou, V. G. (2021). Extraction of volatile aroma compounds from toasted oak wood using pulsed electric field. *Journal of Food Processing and Preservation*, 45(6). <https://doi.org/10.1111/jfpp.15577>
- Nunes, P., Muxagata, S., Correia, A. C., Nunes, F. M., Cosme, F., & Jordão, A. M. (2017). Effect of oak wood barrel capacity and utilization time on phenolic and sensorial profile evolution of an Encruzado white wine. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(14), 4847–4856. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8355>
- Peng, Q., Xu, X., Xing, W., Hu, B., Shen, C., Tian, R., Li, X., Xu, Q., Chen, J., Chen, F., Zou, H. J., & Xie, G. (2017). Ageing status characterization of Chinese spirit using scent characteristics combined with chemometric analysis. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 44, 212–216. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.006>
- Pérez-Serradilla, J. A., & de Castro, M. D. L. (2008). Role of lees in wine production: A review. In *Food Chemistry* (Vol. 111, Issue 2, pp. 447–456). <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.04.019>
- Pingret, D., Fabiano-Tixier, A. S., & Chemat, F. (2013). Degradation during application of ultrasound in food processing: A review. In *Food Control* (Vol. 31, Issue 2, pp. 593–606). <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2012.11.039>
- Puértolas, E., López, N., Condón, S., Álvarez, I., & Raso, J. (2010). Potential applications of PEF to improve red wine quality. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 21, Issue 5, pp. 247–255). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2010.02.002>
- Režek Jambrak, A., Šimunek, M., Zeko, A., Herceg, Z., & Vukušić, T. (2017). Antioxidant, quality and electronic tongue sensory parameters of thermosonicated blueberry nectar. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 44, 202–211. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2017.04.015>
- Roullier-Gall, C., Witting, M., Moritz, F., Gil, R. B., Goffette, D., Valade, M., Schmitt-Kopplin, P., & Gougeon, R. D. (2016). Natural oxygenation of Champagne wine during ageing on lees: A metabolomics picture of hormesis. *Food Chemistry*, 203, 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.02.043>

- Salacha, M. I., Kallithraka, S., & Tzourou, I. (2008). Browning of white wines: Correlation with antioxidant characteristics, total polyphenolic composition and flavanol content. *International Journal of Food Science and Technology*, *43*(6), 1073–1077. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2007.01567.x>
- Sánchez-Córdoba, C., Durán-Guerrero, E., & Castro, R. (2021). Olfactometric and sensory evaluation of red wines subjected to ultrasound or microwaves during their maceration or ageing stages. *LWT*, *144*. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111228>
- Santos, M. C., Nunes, C., Ferreira, A. S., Jourdes, M., Teissedre, P. L., Rodrigues, A., Amado, O., Saraiva, J. A., & Coimbra, M. A. (2019). Comparison of high pressure treatment with conventional red wine aging processes: impact on phenolic composition. *Food Research International*, *116*, 223–231. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.08.018>
- Santos, M. C., Nunes, C., Rocha, M. A. M., Rodrigues, A., Rocha, S. M., Saraiva, J. A., & Coimbra, M. A. (2013). Impact of high pressure treatments on the physicochemical properties of a sulphur dioxide-free white wine during bottle storage: Evidence for Maillard reaction acceleration. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, *20*, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.07.001>
- Santos, M. C., Nunes, C., Rocha, M. A. M., Rodrigues, A., Rocha, S. M., Saraiva, J. A., & Coimbra, M. A. (2015). High pressure treatments accelerate changes in volatile composition of sulphur dioxide-free wine during bottle storage. *Food Chemistry*, *188*, 406–414. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.002>
- Sauvage, F. X., Bach, B., Moutounet, M., & Vernhet, A. (2010). Proteins in white wines: Thermo-sensitivity and differential adsorption by bentonite. *Food Chemistry*, *118*(1), 26–34. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2009.02.080>
- Schwarz, M., Rodríguez, M. C., Sánchez, M., Guillén, D. A., & Barroso, C. G. (2014). Development of an accelerated aging method for Brandy. *LWT*, *59*(1), 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.05.060>
- Sun, J., Luo, H., Li, X., Li, X., Lu, Y., & Bai, W. (2019). Effects of low power ultrasonic treatment on the transformation of cyanidin-3-O-glucoside to methylpyranocyanidin-3-O-glucoside and its stability evaluation. *Food Chemistry*, *276*, 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.10.038>
- Sun, S. Y., Che, C. Y., Sun, T. F., Lv, Z. Z., He, S. X., Gu, H. N., Shen, W. J., Chi, D. C., & Gao, Y. (2013). Evaluation of sequential inoculation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Oenococcus oeni* strains on the chemical and aromatic profiles of cherry wines. *Food Chemistry*, *138*(4), 2233–2241. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2012.12.032>
- Sun, X., Chen, X., Li, L., Ma, T., Zhao, F., Huang, W., & Zhan, J. (2015). Effect of Ultra-high Pressure Treatment on the Chemical Properties, Colour and Sensory Quality of Young Red Wine. In *Afr. J. Enol. Vitic* (Vol. 36, Issue 3).
- Sun, X., Li, L., Ma, T., Zhao, F., Yu, D., Huang, W., & Zhan, J. (2016). High hydrostatic pressure treatment: An artificial accelerating aging method which did not change the region and variety non-colored phenolic characteristic of red wine. *Innovative Food*

Science and Emerging Technologies, 33, 123–134.

<https://doi.org/10.1016/j.ifset.2015.10.017>

- Tabilo-Munizaga, G., Gordon, T. A., Villalobos-Carvajal, R., Moreno-Osorio, L., Salazar, F. N., Pérez-Won, M., & Acuña, S. (2014). Effects of high hydrostatic pressure (HHP) on the protein structure and thermal stability of Sauvignon blanc wine. *Food Chemistry*, 155, 214–220. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2014.01.051>
- Tao, Y., Zhang, Z., & Sun, D. W. (2014). Experimental and modeling studies of ultrasound-assisted release of phenolics from oak chips into model wine. *Ultrasonics Sonochemistry*, 21(5), 1839–1848. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.016>
- Toepfl, S., Heinz, V., & Knorr, D. (2007). High intensity pulsed electric fields applied for food preservation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 46(6), 537–546. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.07.011>
- Toulaki, A. K., Bozinou, E., Athanasiadis, V., Chatzimitakos, T., Mantanis, G. I., Dourtoglou, V. G., & Lalas, S. I. (2023). Accelerating Xinomavro Red Wine Flavor Aging Using a Pulsed Electric Field and Various Wood Chips. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/app132312844>
- Wang, L. (2022). Research trends in Jiang-flavor baijiu fermentation: From fermentation microecology to environmental ecology. In *Journal of Food Science* (Vol. 87, Issue 4, pp. 1362–1374). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.16092>
- Wang, L., Chen, S., & Xu, Y. (2023). Distilled beverage aging: A review on aroma characteristics, maturation mechanisms, and artificial aging techniques. In *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (Vol. 22, Issue 1, pp. 502–534). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13080>
- Wang, X. Q., Su, H. N., Zhang, Q. H., & Yang, P. P. (2015). The effects of pulsed electric fields applied to red and white wines during bottle ageing on organic acid contents. *Journal of Food Science and Technology*, 52(1), 171–180. <https://doi.org/10.1007/s13197-013-0984-0>
- Welke, J. E., Manfroi, V., Zanus, M., Lazarotto, M., & Alcaraz Zini, C. (2012). Characterization of the volatile profile of Brazilian Merlot wines through comprehensive two dimensional gas chromatography time-of-flight mass spectrometric detection. *Journal of Chromatography A*, 1226, 124–139. <https://doi.org/10.1016/J.CHROMA.2012.01.002>
- Yang, N., Huang, K., Lyu, C., & Wang, J. (2016). Pulsed electric field technology in the manufacturing processes of wine, beer, and rice wine: A review. In *Food Control* (Vol. 61, pp. 28–38). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.09.022>
- Yildirim, H., & Dündar, E. (2017). New techniques for wine aging. *BIO Web of Conferences*, 9, 02012. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20170902012>
- Yuan, J. F., Lai, Y. T., Chen, Z. Y., Song, H. X., Zhang, J., Wang, D. H., Gong, M. G., & Sun, J. R. (2022). Microwave Irradiation: Effects on the Change of Colour Characteristics and Main Phenolic Compounds of Cabernet Gernischt Dry Red Wine during Storage. *Foods*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/foods11121778>

- Zeng, X. A., Yu, S. J., Zhang, L., & Chen, X. D. (2008). The effects of AC electric field on wine maturation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 9(4), 463–468. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2008.03.002>
- Zhang, B., He, F., Zhou, P. P., Liu, Y., & Duan, C. Q. (2015). Copigmentation between malvidin-3-O-glucoside and hydroxycinnamic acids in red wine model solutions: Investigations with experimental and theoretical methods. *Food Research International*, 78, 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.026>
- Zhang, B., Yang, X. S., Li, N. N., Zhu, X., Sheng, W. J., He, F., Duan, C. Q., & Han, S. Y. (2017). Colorimetric study of malvidin-3-O-glucoside copigmented by phenolic compounds: The effect of molar ratio, temperature, pH, and ethanol content on color expression of red wine model solutions. *Food Research International*, 102, 468–477. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.034>
- Zhang, B., Zeng, X. A., Sun, D. W., Yu, S. J., Yang, M. F., & Ma, S. (2013). Effect of Electric Field Treatments on Brandy Aging in Oak Barrels. *Food and Bioprocess Technology*, 6(7), 1635–1643. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0788-7>
- Zhang, Q. A., Shen, Y., Fan, X. H., & García Martín, J. F. (2016). Preliminary study of the effect of ultrasound on physicochemical properties of red wine. *CYTA - Journal of Food*, 14(1), 55–64. <https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1045036>
- Zhang, Q. A., & Wang, T. T. (2017). Effect of ultrasound irradiation on the evolution of color properties and major phenolic compounds in wine during storage. *Food Chemistry*, 234, 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.022>
- Zhao, D., Zeng, X. A., Sun, D. W., & Liu, D. (2013). Effects of pulsed electric field treatment on (+)-catechin-acetaldehyde condensation. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 20, 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.07.007>
- Zheng, X., Liu, C., Huo, J., & Li, C. (2011). Effect of the microwave irradiated treatment on the wine sensory properties. *International Journal of Food Engineering*, 7(2). <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1762>
- Zhu, S. M., Xu, M. L., Ramaswamy, H. S., Yang, M. Y., & Yu, Y. (2016). Effect of high pressure treatment on the aging characteristics of Chinese liquor as evaluated by electronic nose and chemical analysis. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep30273>