



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΑΦΡΙΣΤΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΑΦΡΟΥ ΚΑΦΕ
ESPRESSO: Ο ΡΟΛΟΣ ΠΡΩΤΕΪΝΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΥΣΑΚΧΑΡΙΤΩΝ*



ΦΟΙΤΗΤΗΣ: ΚΟΡΦΙΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ (ΑΜ 16143)
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΛΟΥΓΚΟΒΟΗΣ ΒΛΑΔΙΜΗΡΟΣ

ΑΘΗΝΑ 2022

Επιτροπή εξέτασης

ΒΛΑΔΙΜΗΡΟΣ ΛΟΥΓΚΟΒΟΗΣ (Επιβλέπων)

ΔΗΜΗΤΡΑ ΧΟΥΧΟΥΛΑ

ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΣ

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κορφιάς Ιωάννης του Εμμανουήλ, με αριθμό μητρώου 16143, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, της Σχολής Επιστημών Τροφίμων, του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, 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».

Ο Δηλών

Ι. Κορφιάς

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	6
Abstract	8
Κεφάλαιο 1. Γενικά στοιχεία για τον καφέ	10
1.1. Εισαγωγή	10
1.2. Το καφεόδεντρο	11
1.3. Ποικιλίες καφέ	12
1.4. Μέθοδοι επεξεργασίας του καφέ	13
1.4.1. Μέθοδος υγρής επεξεργασίας	13
1.4.2. Μέθοδος ξηρής επεξεργασίας	13
1.4.3. Ημίξηρη μικτή μέθοδος	14
1.4.4. Επιπρόσθετη επεξεργασία	14
1.4.5. Διαδικασία Decaffeination	14
1.5. Διαδικασία της φρύξης του καφέ	15
1.6. Άλεση καβουρδισμένου καφέ	18
Κεφάλαιο 2: Ο αφρός των ροφημάτων καφέ	19
2.1. Εισαγωγή	19
2.2. Μορφή και ιδιότητες του αφρού καφέ espresso	20
2.3. Παράγοντες που επηρεάζουν τον αφρισμό του ροφήματος	23
2.3.1. Φρύξη και παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα	24
2.3.2. Άλεση του φρυγμένου καφέ	25
2.3.3. Δοσολογία και συμπίεση της σκόνης καφέ στη μηχανή espresso	25
2.3.4. Εκχύλιση συστατικών	26
Κεφάλαιο 3: Αφρισμός και σταθερότητα αφρού στα ροφήματα καφέ espresso	27
3.1. Εισαγωγή	27
3.2. Μηχανισμοί σχηματισμού του αφρού	27
3.3. Διεργασίες αποσταθεροποίησης του αφρού	29
3.3.1. «Αποστράγγιση» (drainage)	29
3.3.2. Ωρίμανση Ostwald (Ostwald ripening)	30
3.3.3. Συνένωση (coalescence)	31
Κεφάλαιο 4. Επιφανειοδραστικές (τασιενεργές) ενώσεις και σταθερότητα αφρού	32
4.1. Μακρομόρια εκχυλιζόμενα από τον φρυγμένο καφέ	32

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ (... συνέχεια)

4.2. Λειτουργίες τασιενεργών ουσιών και σταθερότητα αφρού	33
4.3. Μηχανισμοί αφρισμού και αποσταθεροποίησης αφρού	34
Συμπεράσματα	36
Βιβλιογραφία	37

Περίληψη

Ο αφρός που σχηματίζεται στην επιφάνεια ενός τυπικού παρασκευάσματος καφέ espresso ορίζεται ως μια χονδροειδής διφασική διασπορά που αποτελείται από την υγρή φάση του ροφήματος και από μικρές σφαιρικές φυσαλίδες αερίου, καθεμία από τις οποίες περιβάλλεται από υγρό φιλμ που φιλοξενεί βιοπολυμερή, φυσικές τασιενεργές ουσίες και μικροσκοπικά σταγονίδια ελαίου, σε ένα γαλάκτωμα τύπου «λάδι σε νερό» (o/w). Το ρόφημα παρασκευάζεται διοχετεύοντας μια μικρή ποσότητα ζεστού νερού, υπό πίεση, μέσω ενός στρώματος φρεσκοψημένου, αλεσμένου καφέ. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα συμπυκνωμένο παρασκεύασμα, το οποίο περιέχει διαλυτά στερεά, αλλά και λιπόφιλα συστατικά που απουσιάζουν από τον *στιγμαϊό* καφέ.

Η φυσικοχημική συμπεριφορά του αφρού στον καφέ espresso εκφράζεται ποσοτικά μέσω των παραμέτρων της «ικανότητας αφρισμού» (*foaming ability*) που αποτελεί μέτρο της ευκολίας σχηματισμού, αλλά και της έκτασης του φαινομένου, και της «σταθερότητας του αφρού» (*foam stability*) που δείχνει την ικανότητα της συνεχούς φάσης να δεσμεύει αέριο για συγκεκριμένο διάστημα. Συχνά, το σύστημα διασποράς αναφέρεται και ως «κρέμα» (*crema*), χάριν του γευστικού και αρωματικού του χαρακτήρα, καθώς και της χρυσαφί-καστανής έως και καφέ-κοκκινωπής χροιάς που προσδίδει στην επιφάνεια του ροφήματος. Οι επιφανειακές ιδιότητες του espresso συμβάλλουν στην αίσθηση της παρατεταμένης γεύσης που εξακολουθεί να γίνεται αντιληπτή έως και 15 min μετά την κατάποση του ροφήματος και το άδειασμα της στοματικής κοιλότητας. Η εξασφάλιση επιθυμητού χρώματος και όγκου, αλλά και η σταθερότητα του αφρού, αποτελούν βασικά κριτήρια αξιολόγησης του καφέ espresso από τους καταναλωτές.

Ο σχηματισμός και η σταθεροποίηση του αφρού επιτυγχάνονται με τη βοήθεια μιας προσροφημένης στιβάδας πρωτεϊνών και πολυσακχαριτών στην διεπιφάνεια νερού-αέρα. Οι πρωτεΐνες πρωταγωνιστούν στον αφρισμό και τη γαλακτωματοποίηση, λόγω της αυξημένης υδροφοβικότητας (*hydrophobicity*) των πλευρικών αλυσίδων ορισμένων αμινοξέων. Οι πολυσακχαρίτες, αν και δεν σχηματίζουν στιβάδες προσροφημένων μορίων στη διεπιφάνεια νερού-αέρα,

εντούτοις συμβάλλουν στη σταθερότητα του αφρού, λόγω της ικανότητάς τους να αυξάνουν το ιξώδες (*viscosity*) του μέσου, αλλά και μέσω της ανάπτυξης ομοιοπολικών δεσμών και της δημιουργίας συνδέσεων *in situ* με προσροφημένες πρωτεΐνες, σχηματίζοντας σύμπλοκες ενώσεις. Η ισορροπία μεταξύ όξινων ανθρακικών ιόντων (HCO_3^-) και ανθρακικού οξέος (H_2CO_3) στο ρόφημα, διαδραματίζει πολύ βασικό ρόλο κατά τη διάρκεια των σταδίων εκχύλισης των κόκκων του καφέ, σχηματισμού του αφρού και παραγωγής γαλακτώματος. Δεδομένου ότι η διάρκεια ζωής του αφρού δεν υπερβαίνει εν γένει τα 40 min, η μελέτη του συστήματος διασποράς, με σκοπό την ποσοτικοποίηση των ιδιοτήτων του, παρουσιάζει εξαιρετική δυσκολία.

Σκοπός της παρούσης εργασίας ανασκόπησης είναι να περιγράψει τις φυσικοχημικές διεργασίες που διέπουν το στάδιο διαβροχής των σωματιδίων του καφέ και τις διαδικασίες μεταφοράς μάζας μεταξύ σωματιδίων καφέ και καυτού νερού, το οποίο λειτουργεί ως μέσο εκχύλισης, και να ερμηνεύσει τα φαινόμενα επιφανειακής τάσης, τα οποία συμβάλλουν στο σχηματισμό και τη σταθεροποίηση των δυο συστημάτων διασποράς του espresso (αφρού και γαλακτώματος), προσδίδοντας ιδανικά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά στο ρόφημα. Το υλικό στο οποίο βασίστηκε η εργασία προέρχεται, ως επί το πλείστον, από έγκριτες ξενόγλωσσες βιβλιογραφικές πηγές, οι οποίες παρατίθενται στην ενότητα «Βιβλιογραφία».

Abstract

The foam formed on the surface of a typical espresso coffee preparation is defined as a coarse biphasic dispersion consisting of the liquid phase of the beverage and small spherical gas bubbles, each surrounded by a liquid film hosting biopolymers, natural surfactants and tiny oil droplets, in an oil-in-water (o/w) emulsion. The beverage is prepared by pouring a small amount of hot water, under pressure, through a layer of freshly roasted, ground coffee. The result of this process is a concentrated preparation, which contains soluble solids, as well as lipophilic ingredients that are absent from instant coffee.

The physicochemical behavior of the foam in espresso coffee is expressed quantitatively through the parameters of "foaming ability", which is a measure of the ease of formation, as well as the extent of the phenomenon, and the "foam stability", which shows the ability of the continuous phase to trap gas for a certain period of time. The dispersion system is often referred to as "crema", due to its tasty and aromatic character, as well as the golden-brown to brown-reddish hue it gives to the surface of the beverage. The surface properties of espresso contribute to the feeling of the prolonged taste that is still perceived up to 15 minutes after ingestion of the drink and the emptying of the oral cavity. Ensuring the desired color and volume, but also the stability of the foam, are key criteria for the evaluation of espresso coffee by the consumers.

The formation and stabilization of the foam is achieved by means of an adsorbed layer of proteins and polysaccharides at the water-air interface. Proteins play a leading role in foaming and emulsifying, due to the increased hydrophobicity of the side chains of certain amino acids. Polysaccharides, although they do not form layers of adsorbed molecules at the water-air interface, nevertheless contribute to the stability of the foam, due to their ability to increase the viscosity of the medium, but also through the development of covalent bonds and in situ bonding with adsorbed proteins, forming complex compounds. The balance between bicarbonate (HCO_3^-) and carbonic acid (H_2CO_3) in the beverage plays an important role during the extraction stages of coffee beans, foam formation and emulsion production. Since the shelf life

of the foam generally does not exceed 40 min, the study of the dispersion system aiming to quantify its properties, presents an exceptional difficulty.

The purpose of this review study is to describe the physicochemical processes governing the wetting stage of coffee particles and the mass transfer processes between coffee particles and hot water, which acts as an extraction medium, and to interpret the surface tension phenomena that contribute to the formation and stability of the two dispersion systems of espresso (foam and emulsion), giving ideal organoleptic characteristics to the beverage. The material on which the work was based comes, for the most part, from authoritative foreign language bibliographic sources, which are listed in the "Bibliography" section.

Κεφάλαιο 1. Γενικά στοιχεία για τον καφέ

1.1. Εισαγωγή

Η καλλιέργεια των καφεόδεντρων με σκοπό τη συλλογή και επεξεργασία των σπερμάτων τους (coffee beans) για την παραγωγή ροφήματος καφέ, αντιπροσωπεύει μια από τις σημαντικότερες γεωργικές εκμεταλλεύσεις στον κόσμο. Ο καφές, το πιο διαδεδομένο σήμερα τροπικό προϊόν, κέρδισε τη δημοτικότητά του ως ρόφημα μεταξύ 16^{ου} και 17^{ου} αιώνα στα καφενεία του Λονδίνου, τα οποία αποτέλεσαν κέντρα πολιτικής, κοινωνικής, φιλολογικής και, τελικά, εμπορικής επιρροής. Λίγο αργότερα, τα «coffeehouses» άνθησαν, τόσο στην ηπειρωτική Ευρώπη, όσο και στις Βρετανικές αποικίες στην Αμερική (Πάπυρος Larousse Britannica, 2007). Για δεκαετίες, το ρόφημα από τα σπέρματα του καφεόδεντρου καταναλώνεται περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο ποτό, σε παγκόσμια κλίμακα (δεύτερο σε κατανάλωση μετά το νερό), και κατέχει τη δεύτερη θέση στο διεθνές εμπόριο μετά το πετρέλαιο, συμβάλλοντας σημαντικά στο εθνικό εισόδημα πολλών από τις χώρες που βρίσκονται μεταξύ των τροπικών του Καρκίνου και του Αιγόκερω. Υπολογίζεται ότι ετησίως σερβίρονται πάνω από 600 δισεκατομμύρια φλιτζάνια ροφημάτων καφέ.



Εικόνα 1.1. Αγγλικό *coffeehouse* από πίνακα του 1668 (Image: © Lordprice Collection/Alamy)
(<https://cdn.britannica.com/78/216078-050-568FADC2/English-coffeehouse-during-The-Restoration-1668.jpg>)

Το 2018 η παραγωγή καφέ ξεπέρασε τους 10,3 εκατομμύρια τόνους. Η χώρα με τη μεγαλύτερη ετήσια παραγωγή πράσινων κόκκων καφέ (green coffee beans), σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι η Βραζιλία με 3,6 εκατομμύρια τόνους και ακολουθούν το

Βιετνάμ με 1,6 εκατομμύρια τόνους, η Ινδονησία με 0,7 εκατομμύρια τόνους και η Κολομβία με 0,7 εκατομμύρια τόνους (Sulewska et al., 2021).

Ο καφές είναι ένα εξαιρετικά περίπλοκο προϊόν, το οποίο περιέχει περισσότερες από 800 πτητικές ενώσεις και πολυάριθμα μη-πτητικά συστατικά, ζωτικής σημασίας για τη γεύση, το άρωμα, το σώμα και το χρώμα του. Ο καφές καταναλώνεται κυρίως σε δύο μορφές: αλεσμένος καβουρδισμένος καφές και διαλυτός ή στιγμιαίος καφές. Και οι δυο μορφές προσφέρονται σε εκδοχές με ή χωρίς καφεΐνη (ντεκαφεϊνέ). Πρώτη καταναλώτρια χώρα είναι οι ΗΠΑ που απορροφούν πάνω από το 36% των συνολικών εξαγωγών των παραγωγών χωρών. Ακολουθούν η Γερμανία, η Γαλλία και η Ιταλία.

1.2. Το καφεόδεντρο

Το καφεόδεντρο (γένος *Coffea*) είναι ένα φυτό με τη μορφή αειθαλών και ξυλωδών θάμνων, πολύ παρόμοιο με την κερασιά. Ανήκει στην οικογένεια Erythrodanoidae, η οποία περιλαμβάνει 66 αναγνωρισμένα είδη. Αναπτύσσεται κυρίως σε τροπικά κλίματα και η διάρκεια ζωής του είναι περίπου 25-30 χρόνια. Το άγριο φυτό μπορεί να φτάσει σε ύψος τα 10 m, αν και το ύψος των δέντρων της καλλιέργειας περιορίζεται δραστικά για τη διευκόλυνση της συγκομιδής. Υπάρχουν δύο κύρια είδη δέντρων καφέ: Το *Coffea arabica* (Καφέα η αραβική) που προέρχεται από την Αιθιοπία και δίνει καρπό με καλύτερη γεύση και άρωμα, και το *Coffea canephora* (Καφέα η εύρωστη ή robusta), οι καρποί του οποίου περιέχουν περισσότερη καφεΐνη και η φυσική προέλευσή του είναι από την Ουγκάντα. Οι καρποί του καφεόδεντρου αναπτύσσονται κατά μήκος των κλαδιών και μεγαλώνουν σε διάστημα ενός χρόνου, αποκτώντας κόκκινο χρώμα. Οι κόκκοι του καφέ (coffee beans) αποτελούν τα σπέρματα του καφεόδεντρου, τα οποία εντοπίζονται στους ερυθρούς ή ιώδεις καρπούς του φυτού και συχνά αναφέρονται ως «κεράσια» (cherries). Οι καρποί του καφεόδεντρου συνήθως περιλαμβάνουν δύο σπέρματα με εφαπτόμενες τις επίπεδες επιφάνειές τους, ενώ σε μικρό ποσοστό (10-15%) μπορεί να περιέχουν ένα μοναδικό σπέρμα, χαρακτηριζόμενοι ως «pea berries» (Wikipedia: <https://el.wikipedia.org/wiki/καφές>).

1.3. Ποικιλίες καφέ

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, τα κύρια είδη καφεόδεντρου, τα οποία παράγουν τις γνωστές ποικιλίες καφέ που στηρίζουν το παγκόσμιο εμπόριο είναι δύο: το *Coffea arabica* και το *Coffea canephora*.

- Το είδος *Coffea arabica* είναι το παλαιότερο από τα δύο. Προέρχεται από την Αιθιοπία αλλά, όπως υποδηλώνει και η ονομασία του, η καλλιέργειά του ξεκίνησε στην Αραβική χερσόνησο. Στην παγκόσμια παραγωγή καφέ, επικρατεί η ποικιλία *arabica* που προέρχεται από αυτό το είδος. Συγκριτικά με τα υπόλοιπα είδη καφεόδεντρων, το *Coffea arabica* αναπτύσσεται καλύτερα σε μεγάλα υψόμετρα και τα σπέρματά του δίνουν καφέ με πολύ λεπτή γεύση και περιεκτικότητα σε καφεΐνη περίπου 1%. Το *Coffea arabica* καλλιεργείται κυρίως στην Κεντρική και Νότια Αμερική και είναι γνωστό για το άρωμα του καφέ που παράγει. Οι περισσότεροι τύποι ροφημάτων καφέ που παρασκευάζονται διεθνώς, προέρχονται από το συγκεκριμένο είδος καφεόδεντρου και φέρουν την εμπορική ονομασία «καφές *arabica*».
- Το είδος *Coffea canephora* (*robusta*) αντέχει περισσότερο στις ασθένειες από το *Coffea arabica*, κυρίως λόγω της διπλάσιας ποσότητας καφεΐνης που περιέχει (η καφεΐνη παραλύει και θανατώνει ορισμένα από τα έντομα που απειλούν τα καφεόδεντρα). Είναι ένα «στιβαρό» είδος με υψηλή απόδοση καφέ ανά φυτό. Ευδοκίμει σε χαμηλότερα υψόμετρα και δίνει προϊόν με δριμύτερη, τραχιά γεύση. Το είδος *Coffea canephora* αποδίδει περίπου το 22% της παγκόσμιας παραγωγής καφέ και έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται στα ζεστά-υγρά κλίματα, στα οποία δεν μπορεί να αναπτυχθεί το *Coffea arabica*. Αν και ο καφές *robusta* έχει πιο ουδέτερη γεύση από τον καφέ *arabica*, εξακολουθεί να κερδίζει σε δημοτικότητα, ειδικά με τη μορφή ροφημάτων στιγμιαίου καφέ (Wikipedia: <https://el.wikipedia.org/wiki/καφές>).

1.4. Μέθοδοι επεξεργασίας του καφέ

Οι κόκκοι του καφέ, αφού αρχικά αφαιρεθούν από τον καρπό του καφέ, ξηραίνονται και ψύχονται. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με δυο τεχνικές, την ξηρή και την υγρή μέθοδο, αντίστοιχα. Με την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας, λαμβάνεται ο «άψητος καφές», ο οποίος συχνά καλείται «πράσινος καφές» (Μανουσίδης, 2009).

1.4.1. Μέθοδος υγρής επεξεργασίας

Η διαδικασία της υγρής επεξεργασίας του καφέ είναι η πιο δημοφιλής σε παγκόσμιο επίπεδο, ειδικά στις ποικιλίες καφέ υψηλής ποιότητας. Χρησιμοποιείται περισσότερο στην ποικιλία arabica. Αφού ολοκληρωθεί η συλλογή των καρπών του καφεόδεντρου, τα «κεράσια» υποβάλλονται σε ποιοτική διαλογή, μέσω βύθισής τους στο νερό. Οι ελαττωματικοί καρποί παραμένουν στην επιφάνεια, ενώ οι ώριμοι βυθίζονται στον πυθμένα. Αργότερα, και μέσα από τη διαδικασία της μηχανικής πίεσης, οι καρποί διέρχονται μέσα από ειδική διάταξη, η οποία απομακρύνει τον φλοιό και ένα τμήμα του πολτού. Στο τέλος της διαδικασίας ξήρανσης που ακολουθεί, οι πράσινοι κόκκοι καφέ δεν πρέπει να περιέχουν ποσοστό υγρασίας μεγαλύτερο από 10%, καθώς υπάρχει κίνδυνος αλλοίωσης.

1.4.2. Μέθοδος ξηρής επεξεργασίας

Μια άλλη μέθοδος επεξεργασίας του καφέ είναι η ξηρή μέθοδος, ευρέως γνωστή και ως φυσική μέθοδος. Η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί τον παραδοσιακό τρόπο επεξεργασίας των σπερμάτων καφέ. Αφού γίνει η συλλογή των καρπών από τα κλαδιά, απομακρύνονται φύλλα, πέτρες και άλλα ξένα σώματα, και οι ολόκληροι καρποί εκτίθενται στον ήλιο, με σκοπό να αποξηραθούν. Αυτό διαρκεί 10-14 ημέρες και όταν πλέον οι καρποί έχουν ξεραθεί ομοιόμορφα, στον επιθυμητό βαθμό, απομακρύνεται ο φλοιός, από κοινού με τον πολτό και το ενδοκάρπιο (Illy & Viani, 2005).

1.4.3. Ημίξηρη μικτή μέθοδος

Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται σπάνια, εφαρμοζόμενη κατά κύριο λόγο σε φυτείες της Βραζιλίας, της Σουμάτρα και του Σουλαγουέσι. Οι καρποί διέρχονται με πίεση μέσα από ένα ειδικό πλέγμα, για να απομακρυνθεί το εξωτερικό περίβλημα και μέρος του πολτού, και στη συνέχεια υποβάλλονται σε ξήρανση στον ήλιο.

1.4.4. Επιπρόσθετη επεξεργασία

Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της ξήρανσης, τα σπέρματα καθαρίζονται συνήθως μηχανικά, αλλά και με το χέρι, προκειμένου να απομακρυνθούν τα υπολείμματα της επεξεργασίας και οι ελαττωματικοί κόκκοι. Στη συνέχεια, οι κόκκοι διέρχονται από ειδικά κόσκινα και ταξινομούνται κατά μέγεθος. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι κόκκοι υποβάλλονται σε μηχανική επεξεργασία στιλβώματος, κατά την οποία αφαιρείται μηχανικά η επιδερμίδα (silver skin). Μέσω αυτής της διαδικασίας, οι κόκκοι αποκτούν ωραία εμφάνιση και περιορίζεται δραστικά η παρουσία φλοιών (schaff) κατά το στάδιο της φρύξης. Ωστόσο, υπάρχει η άποψη ότι το στίλβωμα μπορεί να υποβαθμίσει αισθητά την ποιότητα του καφέ, διότι η αύξηση της θερμοκρασίας των κόκκων, λόγω της τριβής, μεταβάλλει τη σύστασή τους (Illy & Viani, 2005). Ο πράσινος καφές μπορεί να παραμείνει φρέσκος για μεγάλο χρονικό διάστημα, εφόσον αποθηκευτεί σωστά. Για τον σκοπό αυτό τοποθετείται σε σακιά, τα οποία του επιτρέπουν να αναπνέει ελεύθερα και αποθηκεύεται σε καθαρό χώρο, ο οποίος προστατεύεται από το ηλιακό φως και την υγρασία.

1.4.5. Διαδικασία Decaffeination

Πρόκειται για μια προαιρετική διαδικασία απομάκρυνσης της καφεΐνης από τους κόκκους του καφέ, πριν το καβούρδισμα. Η πλέον συνηθισμένη μέθοδος που εφαρμόζεται στις ΗΠΑ είναι η υπερκρίσιμη εκχύλιση με διοξείδιο του άνθρακα (supercritical CO₂ – extraction). Οι πράσινοι κόκκοι καφέ υγραίνονται και έρχονται σε επαφή με μεγάλη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που διατηρείται σε υψηλή πίεση (28 MPa) και σε θερμοκρασία μεταξύ 90°C και 100°C. Με τη διαδικασία αυτή εξασφαλίζεται απομάκρυνση του 97% της καφεΐνης. Μια άλλη μέθοδος, εξίσου

αποτελεσματική, είναι η εκχύλιση με χρήση διαλύτη. Ο διαλύτης μπορεί να είναι έλαιο προερχόμενο από τον καβουρδισμένο καφέ ή οξικός αιθυλεστέρας. Σύμφωνα με τη μέθοδος αυτή, ο διαλύτης προστίθεται στους βρεγμένους κόκκους καφέ, δεσμεύοντας το μεγαλύτερο μέρος της περιεχόμενης καφεΐνης. Μετά την απομάκρυνσή τους από το διαλύτη, οι κόκκοι υποβάλλονται σε κατεργασία με ατμό για την αφαίρεση τυχόν υπολειμμάτων του διαλύτη. Η καφεΐνη ανακτάται από τον διαλύτη, ο οποίος μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί. Δημοφιλής θεωρείται και η τεχνική αφαίρεσης της καφεΐνης με ένα διάλυμα που περιέχει όλα τα υδατοδιαλυτά συστατικά του πράσινου καφέ, πλην της καφεΐνης, και η οποία είναι γνωστή ως «Swiss water process» (Vincent, 1987).

1.5. Διαδικασία της φρύξης του καφέ

Η φρύξη ή αλλιώς καβούρδισμα (roasting) αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια επεξεργασίας, στη διαδικασία παραγωγής του καφέ. Περιλαμβάνει πολύπλοκες φυσικές και χημικές διεργασίες, οι οποίες λαμβάνουν χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες και ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό, τόσο για τις μεταβολές που υφίστανται οι κόκκοι καφέ (coffee beans), όσο και για τις ιδιάζουσες οργανοληπτικές ιδιότητες (χροιά, γεύση, άρωμα, mouthfeel) που χαρακτηρίζουν το τελικό προϊόν (roasted coffee).

Οι κόκκοι του καφέ καβουρδίζονται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται συνήθως από 200°C έως 400°C και η διάρκεια της διαδικασίας ρυθμίζεται κατάλληλα, ανάλογα με τα επιδιωκόμενα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ομοιόμορφη χροιά σε όλους τους κόκκους και να διατηρηθεί το χαρακτηριστικό άρωμα. Οι περίπλοκες αντιδράσεις πυρόλυσης που λαμβάνουν χώρα κατά το καβούρδισμα ενισχύουν τη χημική πολυπλοκότητα, οδηγώντας στην καταστροφή ορισμένων ενώσεων που απαντούν φυσικά στους κόκκους του καφέ και στο σχηματισμό άλλων, πολλές εκ των οποίων είναι πτητικές και ενισχύουν το άρωμα του ροφήματος καφέ. Κατά το αρχικό, ενδόθερμο στάδιο ξήρανσης, το μέγεθος των σπόρων αυξάνει και διαπιστώνονται μεταβολές στο χρώμα (απώλεια πράσινης χροιάς) και στη δομή των καρπών. Καθώς η θερμοκρασία ανέρχεται σταδιακά στους 100°C, το ποσοστό υγρασίας των ωμών πράσινων κόκκων μειώνεται από 8-12% σε

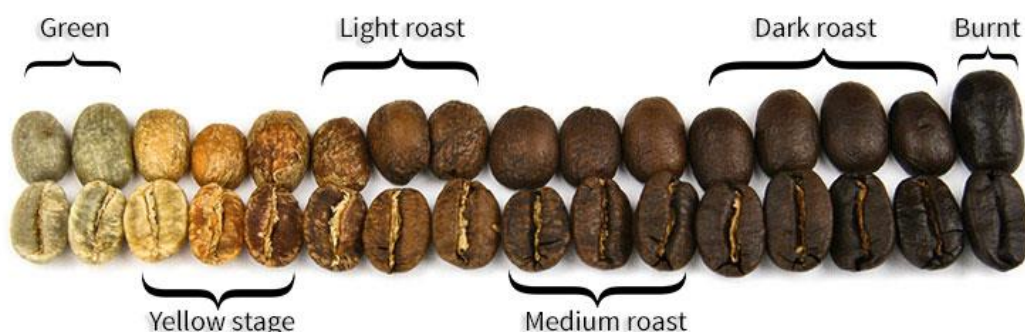
5%, περίπου, το χρώμα τους γίνεται κιτρινωπό και η δομή τους, από σκληρή, μετατρέπεται σε εύθραυστη και εύθρυπτη. Επιπλέον, η αρχική οσμή μεταβάλλεται σε ένα άρωμα παραπλήσιο με αυτό του «άρτου». Κατά την παραμονή στους 100°C, το χρώμα των κόκκων σκουραίνει ελαφρώς.

Όταν η θερμοκρασία ανέβει στους 160-170°C, οι αντιδράσεις πυρόλυσης εντείνονται και από κοινού με αντιδράσεις μη-ενζυμικής αμαύρωσης (Maillard) και καραμελοποίησης οδηγούν σε ενίσχυση της σκουρόχρωμης χροιάς των κόκκων και σε σημαντικές μεταβολές της χημικής τους σύστασης. Ο ρυθμός των αντιδράσεων πυρόλυσης καθίσταται ακόμα μεγαλύτερος (μέγιστος) στην περιοχή θερμοκρασιών 190-210°C. Οι ανωτέρω αντιδράσεις ευθύνονται για ορισμένες από τις πλέον σημαντικές μεταβολές που συνδέονται με την τελική ποιότητα του καφέ. Οι αντιδράσεις Maillard παρουσιάζουν πολλές ομοιότητες με τις αντιδράσεις καραμελοποίησης των σακχάρων. Η βασική διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι στις αντιδράσεις Maillard τα (ανάγοντα) σάκχαρα αντιδρούν με πρωτεΐνες, αμινοξέα και πεπτίδια του υποστρώματος, παράγοντας προϊόντα συμπύκνωσης. Ο σχηματισμός γευστικών και αρωματικών ενώσεων κατά τις αντιδράσεις Maillard εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από παράγοντες όπως το pH, η διάρκεια και η θερμοκρασία καβουρδίσματος, η περιεκτικότητα των κόκκων καφέ σε νερό και ο τύπος των σακχάρων και των πρωτεϊνών.

Καθώς ο καφές καβουρδίζεται και η χημική σύσταση των κόκκων μεταβάλλεται από την πληθώρα των διεργασιών που ευνοούνται στις υψηλές θερμοκρασίες (αποικοδόμηση και καραμελοποίηση υδατανθράκων, αντιδράσεις μη-ενζυμικής αμαύρωσης, αποικοδόμηση Strecker), απελευθερώνονται μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Επιπλέον, πολλά λιπαρά οξέα, όπως και το χλωρογενικό οξύ, αποσυντίθενται, ενώ σημαντικό μέρος της ελεύθερης καφεΐνης εξατμίζεται και ελευθερώνονται εκατοντάδες ενώσεις, οι οποίες είναι υπεύθυνες για το άρωμα και τη γεύση του καφέ. Παράλληλα, το χρώμα των κόκκων μεταβάλλεται σε σκούρο καφέ (Σχήμα 1.1). Η αυξημένη πίεση που δημιουργούν οι μεγάλες ποσότητες αερίων που εκλύονται κατά το καβούρδισμα, από κοινού με τους ατμούς του νερού, προκαλεί ρήξη του κυτταρικού τοιχώματος των κόκκων που είναι γνωστή ως «πρώτη ρωγμή». Καθώς συνεχίζουν να θερμαίνονται στους 160-170°C ή και

υψηλότερα, οι κόκκοι σκουραίνουν περαιτέρω και σύντομα εμφανίζουν τη λεγόμενη «δεύτερη ρωγμή», δεδομένου ότι η πίεση από τη συνεχιζόμενη παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα υπερβαίνει την αντοχή των κυτταρικών τοιχωμάτων.

Αφού ολοκληρωθεί ο επιθυμητός βαθμός καβουρδίσματος, οι κόκκοι ψύχονται γρήγορα, χρησιμοποιώντας αέρα ή νερό, προκειμένου να διακοπούν οι φυσικοχημικές και βιοχημικές διεργασίες. Η ποιότητα του τελικού προϊόντος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη διάρκεια της φρύξης και τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιήθηκε αυτή. Ο βαθμός καβουρδίσματος μπορεί να εκφραστεί είτε σε σχέση με τη συνολική απώλεια βάρους των φρυγμένων κόκκων, οπότε περιλαμβάνει το σύνολο των απωλειών οργανικών ενώσεων και υγρασίας, ή να περιοριστεί αποκλειστικά στην απώλεια οργανικών ενώσεων, εκφρασμένη ως ποσοστό επί του ξηρού βάρους των φρυγμένων κόκκων. Στην τελευταία περίπτωση, τιμές από 1 έως 5 αντιστοιχούν σε ελαφρύ βαθμό καβουρδίσματος (light roasting), τιμές 5-8 υποδηλώνουν μέτριο βαθμό καβουρδίσματος (medium roasting), ενώ τιμές στην κλίμακα 8-12 αφορούν έντονο βαθμό καβουρδίσματος (dark roasting) που προσδίδει έντονη καφετί χροιά στους κόκκους. Τιμές άνω του 12 είναι ενδεικτικές πολύ έντονου καβουρδίσματος (very dark roasting) που οδηγούν σε σκοτεινή καφέ έως μελανή χροιά κόκκων (Illy & Navariny, 2011). Το ελαφρύ καβούρδισμα δίνει ανομοιόμορφη χροιά κόκκων, με ατελώς ανεπτυγμένη υπόξινη γεύση και χλωώδες άρωμα. Το μέτριο καβούρδισμα των κόκκων δίνει περισσότερο ισορροπημένο flavour, χαρακτηριζόμενο κυρίως από άρωμα και γεύση εσπεριδοειδών. Τέλος, το έντονο καβούρδισμα παράγει καφέ χαμηλής οξύτητας (Μαργέλος κ.α., 2020)



Σχήμα 1.1. Χροιά κόκκων καφέ που υπέστησαν διαφορετικούς βαθμούς καβουρδίσματος. Αριστερό άκρο: «ωμοί κόκκοι». Δεξί άκρο: «υπερβολικά καβουρδισμένοι, καμένοι κόκκοι».
(<https://www.caffesociety.co.uk/assets/coffee-roasting/roastingspectrumwithannotations-curly.jpg>)

1.6. Άλεση καβουρδισμένου καφέ

Για να είναι έτοιμοι προς κατανάλωση, οι καβουρδισμένοι κόκκοι καφέ αλέθονται ή κοκκοποιούνται σε ειδικούς τύπους μύλων άλεσης, ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής του καφέ. Κατά τη διάρκεια της άλεσης ελευθερώνονται αέρια, μεταξύ των οποίων και πολλές πτητικές αρωματικές ενώσεις. Για τον λόγο αυτό, οι συσκευές άλεσης σχεδιάζονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να ελέγχουν την απελευθέρωση του αερίου μέσω φίλτρου (Illy & Viani, 2005). Ανάλογα με τον βαθμό άλεσης, το προϊόν διακρίνεται σε μέτρια αλεσμένο, λεπτόκοκκο ή χονδρόκοκκο. Το σύνηθες μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται από 450 μm (Ευρώπη) μέχρι 800 μm (Η.Π.Α). Για την παρασκευή espresso, το μέγεθος του αλεσμένου κόκκου δεν πρέπει να ξεπερνά τα 30 μm (Clarke, 2003).

Κεφάλαιο 2: Ο αφρός των ροφημάτων καφέ

2.1. Εισαγωγή

Ο αφρός του καφέ είναι μια χονδροειδής διασπορά δυο φάσεων, αποτελούμενη από την υγρή φάση του ροφήματος καφέ και από μικροσκοπικές σφαιρικές φυσαλίδες αερίου, καθεμία από τις οποίες περιβάλλεται από ένα υγρό φιλμ (lamellae) που περιέχει βιοπολυμερή και φυσικές τασιενεργές ουσίες (Piazza et al., 2008). Είναι το στρώμα του αφρού που σχηματίζεται στην επιφάνεια ροφημάτων καφέ, όπως ο στιγμιαίος καφές και ο καφές espresso. Τα δυο αυτά ροφήματα, αν και σχεδόν ίδια ως προς τη σύνθεσή τους, διακρίνονται από την πίεση που εφαρμόζεται κατά την παρασκευή του ροφήματος. Ο καφές espresso παρασκευάζεται διοχετεύοντας μια μικρή ποσότητα ζεστού νερού, υπό πίεση, μέσω ενός στρώματος φρεσκοψημένου και φρεσκοαλεσμένου καφέ. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα συμπυκνωμένο παρασκεύασμα που περιέχει διαλυτά στερεά αλλά και λιπόφιλα συστατικά, τα οποία απουσιάζουν από τον στιγμιαίο καφέ. Ο αφρός που προκύπτει πάνω από την επιφάνεια του αδιαφανούς παρασκευάσματος είναι τυπικός του καφέ espresso, ο οποίος χαρακτηρίζεται από την παρουσία μιας διεσπαρμένης φάσης που σχηματίζεται από μικροσκοπικά σταγονίδια ελαίου σε ένα γαλάκτωμα τύπου «λάδι σε νερό» (o/w) (Ishwarya & Nisha, 2020).

Σε αντίθεση με τον espresso, ο στιγμιαίος καφές αποτελείται είτε από διαλυτή σκόνη ή από κόκκους καφέ που ξηραίνονται με κατάψυξη – εξάχνωση (freeze drying) ή λυοφιλίωση (spray-drying). Το συγκεκριμένο ρόφημα παρασκευάζεται απλά με προσθήκη ζεστού νερού στους διαλυτούς κόκκους καφέ, διευκολύνοντας έτσι τους καταναλωτές να προετοιμάζουν το καφέ τους γρήγορα και εύκολα. Όπως και στον καφέ espresso, τα στάδια επεξεργασίας του στιγμιαίου καφέ, μέχρι το άλεσμα και το καβούρντισμα, είναι ακριβώς τα ίδια, αν και το στάδιο της εκχύλισης απαιτεί μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Η διαδικασία της εκχύλισης πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 140-180°C και πιέσεις ανώτερες της ατμοσφαιρικής, συνοδευόμενη από ελαφρώς ηπιότερα στάδια εκχύλισης στους 100°C, προκειμένου να παραχθεί εκχύλισμα καφέ με περιεκτικότητα σε διαλυτά στερεά 20-30%. Το εκχύλισμα καφέ που προκύπτει ψύχεται και υποβάλλεται σε επεξεργασίες διήθησης και

συμπύκνωσης (φυγοκέντρωση, εξάτμιση), με σκοπό τη μείωση της περιεκτικότητας σε νερό και την αύξηση των περιεχομένων διαλυτών στερεών. Στη συνέχεια, το εκχύλισμα του καφέ που έχει συμπυκνωθεί στον απαιτούμενο βαθμό ξηραίνεται με λυοφιλίωση ή κατάψυξη – εξάχνωση για την παραγωγή σκόνης ή κόκκων καφέ που μπορούν ακολούθως να αναμιχθούν με ζεστό νερό, αποδίδοντας το υπέροχο ρόφημα (Nilsson, 2015).

Στον στιγμιαίο καφέ, το στρώμα αφρού στην επιφάνεια του ροφήματος είναι το κυριότερο ίσως χαρακτηριστικό για τη διαμόρφωση της ιδανικής ποιότητας. Συμβάλλει στα αισθητηριακά (γευστικά και αρωματικά) χαρακτηριστικά, ανάλογα με τις προτιμήσεις των καταναλωτών, χάριν της ικανότητάς του να εγκλωβίζει τα πτητικά οσμογόνα μόρια και να ρυθμίζει την απελευθέρωσή τους, περιορίζοντας την απώλεια αρώματος στην ατμόσφαιρα. Ένας άλλος παράγοντας που διαφοροποιεί τον espresso από τον στιγμιαίο καφέ είναι η ύπαρξη σωματιδίων που προέρχονται από τη συσσωμάτωση συστατικών του καφέ κατά την εξάτμιση του νερού. Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι η σταθερότητα του αφρού στον στιγμιαίο καφέ αποδίδεται πρωτίστως στην παρουσία σωματιδίων (τόσο στο κυρίως σώμα του αφρού, όσο και στις διεπιφάνειες νερού/αέρα), τα οποία είναι παρόμοια με αυτά που παρατηρούνται σε αφρούς σταθεροποιημένους με τη βοήθεια πρωτεϊνών. Συνεπώς, φαίνεται ότι ο αφρός του καφέ αποτελεί το σημαντικότερο δείκτη ποιότητας του ροφήματος, αν και οι διαθέσιμες ερευνητικές μελέτες που σχετίζονται με τα φυσικοχημικά του χαρακτηριστικά είναι ελάχιστες (Illy & Navariny, 2011).

2.2. Μορφή και ιδιότητες του αφρού καφέ espresso

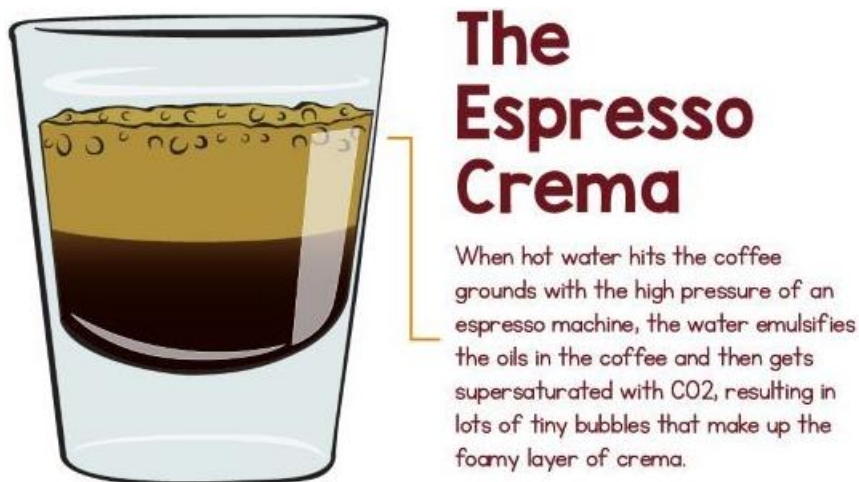
Ο αφρός του καφέ espresso είναι πιο γνωστός ως «κρέμα», λόγω του γευστικού και αρωματικού του χαρακτήρα, αλλά και της χρυσαφί-καστανής έως και καφέ-κοκκινωπής χροιάς την οποία σχηματίζει πάνω από την επιφάνεια της υγρής φάσης του ροφήματος (Ishwarya & Nisha, 2020). Μέχρι πρόσφατα, η δημιουργία του αφρού espresso και η σταθερότητά του θεωρούνταν περισσότερο τέχνη, παρά επιστήμη, και συχνά σχετιζόνταν με τις δεξιότητες του έμπειρου barista. Εντούτοις, θα ήταν προτιμότερο, η κατανόηση των μηχανισμών αφρισμού του καφέ να βασιστεί στα φαινόμενα που διέπονται από τις αρχές της χημικής μηχανικής, της φυσικής και

της χημείας των κolloειδών (Ishwarya & Nisha, 2020). Η διάρκεια ζωής του αφρού espresso μπορεί να φτάσει τα 40 min. Στη χρονική αυτή διάρκεια ο αφρός εξαφανίζεται από την επιφάνεια του καφέ, εκθέτοντας την υποκείμενη σκοτεινή επιφάνεια του ροφήματος. Όπως είναι φυσικό, αυτή η παροδική, μεταβατική φύση του αφρού περιορίζει σημαντικά τη δυνατότητα ποσοτικοποίησης των ιδιοτήτων του. Για τον λόγο αυτό, οι ερευνητικές προσπάθειες μελέτης των χαρακτηριστικών του αφρού ροφημάτων καφέ είναι πολύ περιορισμένες. Ωστόσο, από τα τέλη του 20^{ου} αιώνα έχουν πραγματοποιηθεί ορισμένες σημαντικές μελέτες, οι οποίες συνέβαλλαν καθοριστικά στην κατανόηση των ιδιοτήτων του αφρού ροφημάτων καφέ (Ishwarya & Nisha, 2020).

Ο espresso είναι ένα πολυφασικό ρόφημα καφέ που παρασκευάζεται αποκλειστικά από αλεσμένο καφέ και νερό. Τα τρία σημαντικότερα βήματα για την προετοιμασία του ροφήματος είναι 1) η άλεση του καβουρδισμένου καφέ, 2) ο καθορισμός της δοσολογίας και η συμπίεση της σκόνης καφέ, και 3) η διαβροχή και εκχύλιση της σκόνης, προκειμένου να ληφθεί το τελικό ρόφημα. Οι διαδικασίες αυτές ευνοούν την εκδήλωση φαινομένων επιφανειακής τάσης και συμβάλλουν στο σχηματισμό και τη σταθεροποίηση των δυο συστημάτων διασποράς του espresso (αφρού και γαλακτώματος), τα οποία προσδίδουν ιδανικά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά στον καφέ. Οι επιφανειακές ιδιότητες του espresso συμβάλλουν στην αίσθηση της παρατεταμένης γεύσης που εξακολουθεί να γίνεται αντιληπτή έως και 15 min μετά την κατάποση του ροφήματος και το άδειασμα της στοματικής κοιλότητας (Petracco, 2001).

Σύμφωνα με τον Dickinson (1992), ο αφρός του καφέ espresso μπορεί να θεωρηθεί ως μεταβατικός, με ορισμένη διάρκεια ζωής, πέραν της οποίας εξαφανίζεται και αρχίζει να γίνεται ορατή η μαύρη επιφάνεια του ροφήματος. Κατά τη βραχύβια ύπαρξη της κρέμας στην επιφάνεια του καφέ, η δομή και οι ιδιότητες του ροφήματος μεταβάλλονται, καθώς ο αρχικός αφρός του φρεσκοαλεσμένου espresso, με τις υγρές φυσαλίδες, μετατρέπεται σε έναν ξηρό, πολυεδρικό αφρό. Ωστόσο, η μεταβολή αυτή δεν έχει πρακτικό ενδιαφέρον, από την πλευρά του καταναλωτή, αφού ο καφές espresso καταναλώνεται μέσα σε λίγα λεπτά από τη στιγμή της παρασκευής του (Illy & Navariny, 2011). Η εξασφάλιση επιθυμητού

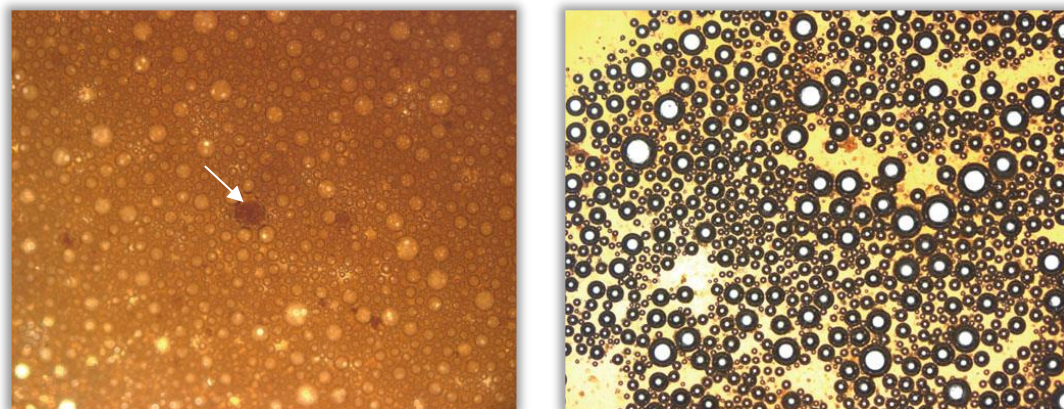
χρώματος και όγκου, αλλά και η σταθερότητα του αφρού καφέ espresso, αποτελούν βασικά κριτήρια αξιολόγησης του ροφήματος από τους καταναλωτές. Με βάση τα χαρακτηριστικά της υφής του espresso, όσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του αφρού, τόσο μεγαλύτερη είναι η αίσθηση απαλότητας του ροφήματος στο στόμα (Labbe et al., 2016). Εν συντομία, ο αφρός διατηρεί την εξαιρετική γεύση και τα αρωματικά χαρακτηριστικά του καφέ espresso. Επιπλέον, λειτουργεί ως μονωτικό στρώμα που διατηρεί τη ζεστασιά του ροφήματος για ελαφρώς μεγαλύτερο διάστημα (Nilsson, 2015).



Σχήμα 2.1. Ερμηνεία της διαδικασίας αφρισμού κατά την παρασκευή καφέ espresso (<https://coffeorbust.com/what-is-espresso-crema/>)

Από ποσοτική άποψη, η κρέμα πρέπει να αντιπροσωπεύει τουλάχιστον 10% του όγκου ενός καφέ espresso. Η πυκνότητα της κρέμας κυμαίνεται συνήθως από 0,4 έως 0,6 g/ml και παρέχει μια χονδρική ένδειξη της περιεκτικότητας του αφρού σε αέρια φάση. Οι φυσαλίδες του αερίου έχουν διάμετρο περίπου 100 μm και καλύπτονται από λεπτές μεμβράνες τασιενεργών ενώσεων που περιλαμβάνουν ενώσεις που προσομοιάζουν με πρωτεΐνες, καθώς και λιπίδια (Illy & Navarini, 2011). Μέχρι σήμερα δεν έχουν δημοσιευθεί λεπτομερείς μελέτες για τη χημική σύσταση και την κατανομή μεγέθους των φυσαλίδων της κρέμας. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι το μέγεθος των φυσαλίδων μπορεί να αποτελέσει κριτήριο για τη διάκριση της κρέμας του espresso που παρασκευάζεται από διαφορετικές ποικιλίες καφέ. Η κρέμα που προκύπτει όταν χρησιμοποιούνται αποκλειστικά κόκκοι του είδους Robusta (*Coffea canephora*) περιλαμβάνει φυσαλίδες μεγαλύτερου μεγέθους από αυτές του αμιγούς

Arabica (*Coffea arabica*). Στον τελευταίο, το μέγεθος των φυσαλίδων κυμαίνεται από 10 έως 150 μm .



Εικόνα 2.2. Μορφή φυσαλίδων αφρού σε φρέσκο-παρασκευασμένο καφέ espresso, όπως φαίνονται στο κοινό μικροσκόπιο. Αριστερά καφές arabica, δεξιά καφές robusta. Το βέλος δείχνει στερεό σωματίδιο διαμέτρου 120 μm (cited in Illy & Navarini, 2011).

Η υγρή φάση του αφρού είναι ένα γαλάκτωμα μικροσκοπικών σταγονιδίων ελαίου (90% <math><10 \mu\text{m}</math>) που περιέχουν τις κυριότερες αρωματικές ενώσεις, σε ένα υδατικό διάλυμα συστατικών του καφέ (σάκχαρα, οξέα, ύλες που προσομοιάζουν με πρωτεΐνες, καφεΐνη), το οποίο περιέχει επίσης διάσπαρτες φυσαλίδες αερίου και στερεά θραύσματα προερχόμενα από το κυτταρικό τοίχωμα των κόκκων, μεγέθους 2-5 μm (Dold et al., 2011. Illy, 2002). Σε έναν τυπικό, αμιγή καφέ espresso *Coffea arabica* (όγκος φλιτζανιού 30 mL, διαβίβαση ατμού/εκχύλιση για 30 sec) η υγρή φάση του αφρού είναι ένα γαλάκτωμα λαδιού σε νερό (O/W), το οποίο συνιστά 0,2-0,3% του συνολικού όγκου του αφρού. Στο σύστημα αυτό, η διασπαρμένη φάση αντιπροσωπεύεται από περίπου 150 mg στερεών σωματιδίων καφέ (αντίστοιχη συγκέντρωση $\approx 5 \text{ g/L}$), ενώ η συνολική συγκέντρωση διαλυτών στερεών στο διάλυμα ανέρχεται σε 52,5 g/L, περίπου (Illy & Viani, 2005).

2.3. Παράγοντες που επηρεάζουν τον αφρισμό του ροφήματος

Ο σχηματισμός της κρέμας του καφέ espresso είναι μια σύνθετη διαδικασία, η οποία επηρεάζεται από τις φυσικοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα, τόσο κατά τη διαδικασία της φρύξης (roasting) των σπερμάτων καφέ, όσο και κατά τη διάρκεια των μετέπειτα σταδίων παρασκευής του ροφήματος, ήτοι της άλεσης (grinding) του φρυγμένου (καβουρδισμένου) καφέ, της δοσολογίας της σκόνης καφέ

(dosing) και της πίεσης (temping) που δέχεται αυτή στη μηχανή του espresso, και τέλος της διαβίβασης καυτού νερού υπό πίεση (*brewing* ή *percolation*), για την εκχύλιση γευστικών και αρωματικών συστατικών.

2.3.1. Φρύξη και παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα

Η προέλευση της αέριας φάσης στον αφρό του καφέ espresso ανάγεται στη διαδικασία του καβουρδίσματος. Οι κόκκοι του καφέ ψήνονται με τη βοήθεια θερμών αερίων καύσης ή ατμοσφαιρικού αέρα σε θερμοκρασίες άνω των 200°C, για να αναπτύξουν την ιδιάζουσα γεύση, τη χαρακτηριστική χροιά και το ιδιαίτερο άρωμα. Το διοξείδιο του άνθρακα συνιστά το κύριο αέριο που παράγεται κατά το καβούρδισμα. Αντιπροσωπεύει περίπου το 87% των αερίων που απελευθερώνονται από τον καβουρδισμένο καφέ, μαζί με ένα ποσοστό 7,3% που αφορά μονοξείδιο του άνθρακα, CO (Illy & Navarini, 2011). Το CO₂ σχηματίζεται ως αποτέλεσμα των αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα κατά τη φρύξη. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνεται και η αποδόμηση Strecker που αντιπροσωπεύει ένα δευτερογενές βήμα στη σειρά των αντιδράσεων μη-ενζυμικής αμαύρωσης Maillard και της πυρόλυσης υδατανθράκων. Η αρχική περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα, μετρημένη αμέσως μετά την άλεση του καφέ, κυμαίνεται συνήθως από 4,0 έως 8,6 mg/g καφέ, με συνολικό μέσο όρο 5,7 mg/g (2,9 mL/g σε κανονικές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, STP). Η περιεκτικότητα σε CO₂ των δειγμάτων αμιγούς καφέ arabica (κατά μέσο όρο 4,6 mg/g καφέ) είναι χαμηλότερη από εκείνη του τύπου robusta (6,9 mg/g καφέ). Τα έντονα καβουρδισμένα δείγματα, τόσο του καφέ arabica, όσο και του robusta, περιέχουν πολύ περισσότερο διοξείδιο του άνθρακα, σε σχέση με εκείνα που υπέστησαν μέτριου βαθμού καβούρδισμα (Anderson et al., 2003). Δυο ακόμη διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την παρασκευή espresso, αποτελούν επίσης σημαντική πηγή διοξειδίου του άνθρακα. Και στις δυο αυτές περιπτώσεις, το CO₂ παράγεται από διττανθρακικά ιόντα που υπάρχουν στο νερό (το δεύτερο κατά σειρά σημαντικότερο συστατικό για την παρασκευή καφέ), αφενός μέσω αντιδράσεων θερμικής αποσύνθεσης, αφετέρου δε λόγω της εξουδετέρωσής τους από οξέα του καφέ.

2.3.2. Άλεση του φρυγμένου καφέ

Κατά τη διάρκεια της άλεσης των κόκκων του καβουρδισμένου καφέ η δομή των κυττάρων καταστρέφεται, με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται μεγάλη ποσότητα αερίων (Illy & Navarini, 2011). Τα αέρια αυτά παράγονται όταν οι κόκκοι υποβάλλονται σε φρύξη, ως αποτέλεσμα θερμοχημικών αντιδράσεων, όπως οι αντιδράσεις Maillard και η καραμελοποίηση σακχάρων, καθώς και άλλων αντιδράσεων πυρολυτικής αποικοδόμησης. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) αντιπροσωπεύει σημαντικό κλάσμα των αερίων που ελευθερώνονται κατά το καβούρδισμα. Μολονότι ένα μέρος αυτών των αερίων διαφεύγει κατά τη φρύξη, το υπόλοιπο διατηρείται εντός της πορώδους δομής των καβουρδισμένων σπερμάτων και απελευθερώνεται πιο απότομα κατά τις διαδικασίες της άλεσης και εκχύλισης (Smrke et al. 2018). Η μεγαλύτερη ποσότητα CO₂ (ποσοστό άνω του 70%) ελευθερώνεται στη διάρκεια του σταδίου της άλεσης των καβουρδισμένων κόκκων καφέ και της μετατροπής τους σε σωματίδια μεγέθους 500 μm. Το μέγεθος των αλεσμένων κόκκων αποτελεί σημαντικό χαρακτηριστικό, το οποίο προάγει τη σωστή ροή υγρού μέσω του κέικ και οδηγεί σε μεγάλο αριθμό σωματιδίων μεγέθους 0,2-650 μm. Τα σωματίδια αυτά παρουσιάζουν πολύ μεγάλη ειδική επιφάνεια, γεγονός που διευκολύνει την εκχύλιση μεγαλύτερης ποσότητας διαλυτών και γαλακτωματοποιήσιμων συστατικών (Ishwarya & Nisha, 2020).

2.3.3. Δοσολογία και συμπίεση της σκόνης καφέ στη μηχανή espresso

Η ποσότητα καβουρδισμένου/αλεσμένου καφέ που απαιτείται για την προετοιμασία μιας κούπας ροφήματος κυμαίνεται συνήθως από 6,0 έως 8,0 g, ενίοτε όμως μπορεί να φτάσει τα 9,0 g. Τόσο η ποσότητα της σκόνης καφέ, όσο και η συμπίεση που δέχεται αυτή στη μηχανή espresso, αποτελούν δυο παράγοντες που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το πορώδες της στρώσης του καφέ (Ishwarya & Nisha, 2020). Η τελευταία αυτή ιδιότητα επηρεάζει το χρόνο επαφής νερού/σκόνης καφέ και, κατ' επέκταση, τόσο την απόδοση εκχύλισης, όσο και την ποιότητα του αφρού. Η δύναμη συμπίεσης μπορεί να κυμαίνεται από μερικά χιλιόγραμμα, όταν δίδεται κατακόρυφη ώθηση προς τα πάνω, έως 20 kgf, στην περίπτωση συμπίεσης προς τα κάτω, με εργαλείο χειρός (illy & Navariny, 2011). Η υψηλή πίεση που προκαλείται από

τη μηχανή espresso γαλακτωματοποιεί ένα μέρος των λιπαρών υλών που είναι υπεύθυνες για την αίσθηση της κρεμώδους υφής του αφρού που επικαλύπτει τον καφέ (Piazza et al., 2008).

2.3.4. Εκχύλιση συστατικών

Κατά την διαδικασία εκχύλισης της συμπιεσμένης σκόνης καφέ στη μηχανή για την προετοιμασία παραδοσιακού καφέ espresso, ζεστό νερό θερμοκρασίας 92–94°C και πίεσης 9 ± 2 bar διοχετεύεται μέσα από τους αλεσμένους κόκκους καφέ για $25 \pm 2,5$ sec (Odello & Odello, 2006). Μέσω αυτής της διαδικασίας, το CO₂ που έχει παραμένει εντός της πορώδους δομής των αλεσμένων κόκκων απελευθερώνεται με τη μορφή φυσαλίδων, οδηγώντας στο σχηματισμό της κρέμας του espresso (Ishwarya & Nisha, 2020). Για να αποφευχθεί η απώλεια CO₂ από την κρέμα, η παρασκευή του ροφήματος πρέπει να έχει ολοκληρωθεί το αργότερο εντός 30 min από την άλεση (Severini et al., 1999).

Ιδανικά, η ροή του ροφήματος από τη μηχανή espresso στην κούπα του καφέ πρέπει να είναι περίπου 1 mL/s. Σε μια πρόσφατη έρευνα σχετικά με τις συνήθειες των barista στις ιταλικές καφετέριες, διαπιστώθηκε ότι η ροή κυμαίνεται συνήθως από 0,40 έως 2,73 mL/s. Η διαδικασία διαβροχής του καφέ στη μηχανή διαρκεί μέχρις ότου ο όγκος του ροφήματος στο φλιτζάνι να ικανοποιεί τις προτιμήσεις του καταναλωτή ή και τις τοπικές παραδόσεις. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τις συνήθειες των Ιταλών καταναλωτών, ο όγκος του ροφήματος κυμαίνεται από 10 έως 15 mL, με το βέλτιστο αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται στα 25-30 mL για τον κανονικό espresso (Illy & Navariny, 2011).

Κεφάλαιο 3: Αφρισμός και σταθερότητα αφρού στα ροφήματα καφέ espresso

3.1. Εισαγωγή

Η φυσικοχημική συμπεριφορά του αφρού καφέ espresso μπορεί να εκφραστεί ποσοτικά με τη βοήθεια δυο δεικτών: της ικανότητας αφρισμού (foamability) και της σταθερότητας του αφρού (foam stability). Η «ικανότητα αφρισμού» αποτελεί μέτρο της ευκολίας σχηματισμού του αφρού, αλλά και της έκτασης του φαινομένου του αφρισμού, ενώ η «σταθερότητα του αφρού» υποδηλώνει την ικανότητα της συνεχούς φάσης να δεσμεύει το αέριο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η σταθερότητα του αφρού ορίζεται επίσης ως δείκτης του ρυθμού απώλειας της δομής του αφρού μετά το σχηματισμό της. Γενικά, όσο αυξάνει η συνολική συγκέντρωση πρωτεΐνης, τόσο ισχυρότερος είναι ο αφρισμός στην επιφάνεια του καφέ, μέχρις ότου επιτευχθεί η μέγιστη τιμή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο σχηματισμός αφρού περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, τη διάχυση διαλυτών πρωτεϊνών στη διεπιφάνεια αέρα-νερού, όπου μετουσιώνονται, συμπυκνώνονται και απορροφώνται γρήγορα, για να μειωθεί η επιφανειακή τάση. Αντίθετα, η σταθερότητα του αφρού εξαρτάται από την ποσότητα των πολυσακχαριτών που εκχυλίζονται από τον καβουρδισμένο, αλεσμένο καφέ κατά τη διαδικασία της παρασκευής του αφεψήματος. Οι πολυσακχαρίτες είναι υπεύθυνοι κυρίως για την αύξηση του ιξώδους υγρών διαλυμάτων (Nunes et al., 1997).

3.2. Μηχανισμοί σχηματισμού του αφρού

Στον καφέ espresso, η κρέμα που σχηματίζεται στην επιφάνεια του ροφήματος είναι αποτέλεσμα της εκχύλισης τασιενεργών συστατικών του καφέ, τα οποία επικαλύπτουν και σταθεροποιούν τις φυσαλίδες αερίου που παράγονται από την εκτόνωση αερίων, καθώς το ζεστό νερό διέρχεται υπό πίεση μέσα από το στρώμα των καβουρδισμένων, αλεσμένων κόκκων καφέ (Leloup et al., 2014). Το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια της φρύξης συνιστά επιπλέον πηγή αερίου για το σχηματισμό της κρέμας. Η αλλαγή της πίεσης που διαπιστώνεται κατά

την προετοιμασία του εσπρέσο υποκινεί τη δημιουργία φυσαλίδων CO₂, οι οποίες εμφανίζονται τελικά στην επιφάνεια του ροφήματος.

Η ισορροπία μεταξύ όξινων ανθρακικών ιόντων (HCO₃⁻) και ανθρακικού οξέος (H₂CO₃) στο ρόφημα, διαδραματίζει πολύ βασικό ρόλο κατά τη διάρκεια των σταδίων εκχύλισης των κόκκων του καφέ, σχηματισμού του αφρού και παραγωγής γαλακτώματος. Αυτή η λειτουργία βασίζεται στη σχέση που συνδέει τη χημεία του CO₂ με τον αφρισμό. Η αρχική διαδικασία διαβροχής συνιστά την πιο δυναμική φάση κατά την παρασκευή καφέ espresso. Στη διάρκεια αυτής της φάσης λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθες δυο διαδικασίες (Ishwarya & Nisha, 2020):

1. Το θερμό νερό γεμίζει τα εσωτερικά κενά των σωματιδίων, ωθώντας προς τα έξω το ενδοσωματιδιακό αέριο της στρώσης του καφέ. Η σκόνη του αλεσμένου καφέ συμπιέζεται, λόγω της πίεσης του νερού, της διόγκωσης των κόκκων και της έκλυσης CO₂. Στις συνθήκες αυτές λαμβάνουν χώρα αφρισμός και γαλακτωματοποίηση που τελικά οδηγούν στο σχηματισμό κρέμας. Η αύξηση του ρυθμού ροής και της πίεσης κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου διέπονται από το νόμο του Darcy. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από το γεγονός ότι η παρασκευή καφέ espresso βασίζεται στη διέλευση ενός διαλύτη (εν προκειμένω του ζεστού νερού) μέσω μιας στερεάς φάσης (σκόνη αλεσμένου καφέ) υπό πίεση, διαδικασία η οποία είναι πολύ παρόμοια με την υγρή χρωματογραφία υψηλής πίεσης/απόδοσης (Roth, 2010).
2. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της αντλίας, η πίεση αυξάνει καθώς μειώνεται η ροή, υπακούοντας στην αρχή της κλασσικής υδραυλικής. Αυτή η άτυπη συμπεριφορά αποδίδεται στη σχέση μεταξύ της πίεσης που δέχεται η κλίνη (το στρώμα) του καφέ και της παρουσίας διττανθρακικών ιόντων στο υγρό εκχύλισης (νερό). Η αλλαγή του pH από 7,0-7,5 σε 5,5-5,0 που παρατηρείται κατά τη διάρκεια της εκχύλισης των κόκκων του καφέ, προκαλεί μετατόπιση της ισορροπίας των όξινων ανθρακικών ιόντων στο υγρό εκχύλισης. Ως αποτέλεσμα αυτής της μεταβολής, τα διττανθρακικά ιόντα προκαλούν χημικές αντιδράσεις στη στρώση του καφέ, σε υψηλές

θερμοκρασίες. Αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί στη συμπίεση των αλεσμένων κόκκων, μέσω της έκλυσης CO₂ (Illy & Navarini, 2011).

Η προαναφερθείσα παροδική (ασταθής) φάση ολοκληρώνεται όταν αποκατασταθεί ισορροπία μεταξύ διττανθρακικών ιόντων και ανθρακικού οξέος και το σύστημα εισέλθει στη φάση σταθεροποίησης. Από το σημείο αυτό και μέχρι την ολοκλήρωση της διήθησης του καφέ στη μηχανή espresso, οι παράμετροι της πίεσης και του ρυθμός ροής παραμένουν σταθερές. Επισημαίνεται ότι ο μηχανισμός αυτός δεν λαμβάνει υπόψη τη σημασία του CO₂ που υπάρχει ήδη στον καβουρδισμένο καφέ (Ishwarya & Nisha, 2020).

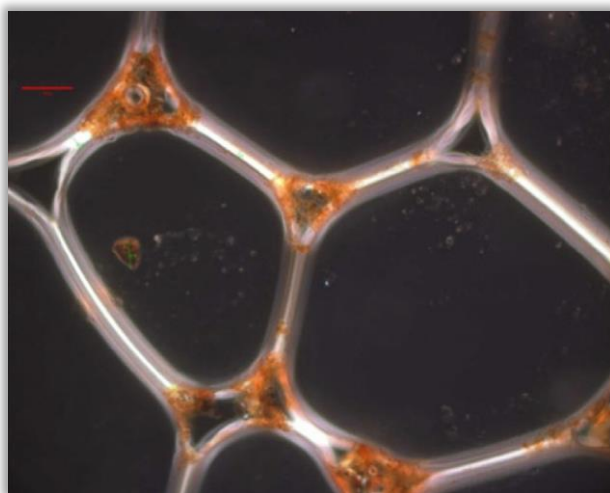
3.3. Διεργασίες αποσταθεροποίησης του αφρού

Η κρέμα που σχηματίζεται κατά την προετοιμασία του espresso έχει χαρακτηριστεί ως μεταβατική, με συγκεκριμένη διάρκεια ζωής που περιορίζεται σε 40 λεπτά, περίπου (Dickinson, 1992). Στη διάρκεια αυτή, οι ιδιότητες της κρέμας μεταβάλλονται δραματικά: ο λεπτός, υγρός αφρός του φρέσκου-παρασκευασμένου espresso αποκτά ξηρή, πολυεδρική μορφή κατά τη γήρανση (Folmer et al., 2017). Ανεξάρτητα από τις ιδιαιτερότητες του συστήματος αφρισμού, μετά το σχηματισμό του ο αφρός τείνει να αποσταθεροποιηθεί μέσω τριών φαινομένων, τα οποία είναι γνωστά με τους όρους «αποστράγγιση» (*drainage*), «ωρίμανση Ostwald» (*Ostwald ripening*) και «συνένωση» (*coalescence*). Ο αφρός του espresso αναμένεται να αποσταθεροποιηθεί με παρόμοιο τρόπο. Λόγω της δυναμικής φύσης του αφρού των ροφημάτων καφέ, η μελέτη των φαινομένων αποσταθεροποίησης παρουσιάζει δυσκολίες και απαιτεί επαρκείς χρονικές κλίμακες (Piazza et al., 2008).

3.3.1. «Αποστράγγιση» (*drainage*)

Η αποστράγγιση του αφρού οφείλεται αποκλειστικά στη βαρύτητα που αναγκάζει το υγρό να διαχωριστεί από τις φυσαλίδες του αέρα. Ακολούθως, το υγρό ρέει μεταξύ των διασκορπισμένων κυψελίδων αέρα του αφρού και αποστραγγίζεται στην υγρή φάση του ροφήματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου και της σταθερότητας του αφρού, ενώ παράλληλα αναγκάζει τις φυσαλίδες να προσεγγίσουν η μια την άλλη, σχηματίζοντας μια λεπτή μεμβράνη (Krzan, 2013). Στη

συνέχεια αυτό το στρώμα γίνεται σταδιακά ακόμα πιο λεπτό, μέχρι να σπάσει και οι δυο παρακείμενες φυσαλίδες να ενωθούν σε μια μεγαλύτερη (Green et al., 2013). Οι περαιτέρω επιπτώσεις της αποστράγγισης του αφρού περιλαμβάνουν κατάρρευση της δομής του αφρού, απώλεια του παγιδευμένου αερίου και μείωση του όγκου του αφρού (Damodaran, 2006. Petracco, 2005).



Εικόνα 3.1. Δομή αφρού τυπικού καφέ espresso *C. arabica* κατά την αποστράγγιση, όπως γίνεται ορατή με τη βοήθεια κοινού μικροσκοπίου. Στα όρια των φυσαλίδων του ξηρού αφρού παρατηρείται συσσώρευση σωματιδίων καφέ. Η ράβδος της κλίμακας αντιπροσωπεύει 50 μm (Illy & Navarini, 2011. Silizio, 2008).

3.3.2. Ωρίμανση Ostwald (Ostwald ripening)

Η ωρίμανση Ostwald είναι μια καταστρεπτική διαδικασία, η οποία λαμβάνει χώρα μέσα στον αφρό και οφείλεται στη διαφορά της τριχοειδικής πίεσης που παρατηρείται μεταξύ μικρότερων και μεγαλύτερων φυσαλίδων (Krzan, 2013. Lee et al., 2013). Οι μικρότερες φυσαλίδες εμφανίζουν μεγαλύτερη εσωτερική πίεση από τις μεγαλύτερες. Ως εκ τούτου, η παρουσία φυσαλίδων με ευρεία κατανομή μεγέθους στον αφρό, αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εμφάνιση του φαινομένου της ωρίμανσης Ostwald. Το αέριο που είναι εγκλωβισμένο στις μικρότερες φυσαλίδες διαλύεται στις λεπτές μεμβράνες που τις περιβάλλουν και διαχέεται προς τις μεγαλύτερες φυσαλίδες. Κατά συνέπεια, οι μεγάλες φυσαλίδες γίνονται ακόμα μεγαλύτερες, εις βάρος των μικρών φυσαλίδων. Έτσι, κατά την ωρίμανση Ostwald, οι μικρότερες φυσαλίδες συρρικνώνονται, οδηγώντας σε αύξηση του μέσου μεγέθους των φυσαλίδων και σε περιορισμό της κατανομής του μεγέθους τους (Krzan, 2013).

3.3.3. Συνένωση (coalescence)

Η διαδικασία της συνένωσης συμβαίνει λόγω της ρήξης, την οποία υφίσταται η λεπτή υγρή μεμβράνη που χωρίζει δυο παρακείμενες φυσαλίδες (Colin, 2012). Η τάση για συνένωση οφείλεται στην πολυδιάσπαρτη κατανομή μεγέθους του πληθυσμού των φυσαλίδων. Η περαιτέρω ανάπτυξη των μεγαλύτερων σε μέγεθος φυσαλίδων ευνοείται θερμοδυναμικά από την επιφανειακή τους ενέργεια. Η συνένωση διαφέρει από την ωρίμανση Ostwald στο ότι οι φυσαλίδες του αερίου έρχονται σε άμεση επαφή κατά τη συνένωση, ενώ η εξωτερική (υγρή) φάση χρησιμεύει ως μέσο μεταφοράς στην περίπτωση της ωρίμανσης Ostwald (Weiss et al., 2000).

Κεφάλαιο 4. Επιφανειοδραστικές (τασιενεργές) ενώσεις και σταθερότητα αφρού

4.1. Μακρομόρια εκχυλιζόμενα από τον φρυγμένο καφέ

Ο σχηματισμός και η σταθεροποίηση των αφρών τροφίμων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μιας προσροφημένης στιβάδας μακρομορίων στην διεπιφάνεια νερού-αέρα. Τα εμπλεκόμενα μακρομόρια περιλαμβάνουν πρωτεΐνες και πολυσακχαρίτες, εκ των οποίων, οι πρωτεΐνες πρωταγωνιστούν στον αφρισμό, λόγω της μεγαλύτερης υδροφοβικότητάς τους που προκαλείται από την χημική φύση των πλευρικών αλυσίδων των αμινοξέων. Αν και οι πολυσακχαρίτες δεν είναι πιθανό να σχηματίσουν στιβάδες προσροφημένων μορίων στην επαφή νερού-αέρα, εντούτοις συμβάλλουν στη σταθερότητα του αφρού μέσω της ικανότητάς τους να αυξάνουν το ιξώδες του μέσου και να το καθιστούν πιο παχύρρευστο, αλλά και μέσω της ανάπτυξης ομοιοπολικών δεσμών και σχηματισμού συνδέσεων *in situ* με προσροφημένες πρωτεΐνες, σχηματίζοντας σύμπλοκες ενώσεις πρωτεϊνών-πολυσακχαριτών (Dickinson, 1989). Στα τρόφιμα, ο σχηματισμός δεσμών *in situ* συμβαίνει με αντιδράσεις Maillard μεταξύ s-αμινομάδων και αναγωγικών ομάδων των πολυσακχαριτών. Αντίθετα, η παρουσία λιπαρών σωματιδίων, από τα οποία μπορεί να διαχυθούν επιφανειοδραστικές ενώσεις στην διεπιφάνεια αέρα-νερού, έχει αποσταθεροποιητική επίδραση στους υδατικούς αφρούς.

Στον καφέ, η ακριβής χημική φύση των επιφανειοδραστικών ενώσεων δεν έχει ακόμη διευκρινιστεί πλήρως. Ωστόσο, οι πρώτες έρευνες έδειξαν ότι η επιφανειακή τάση του αφρού καφέ espresso (46 mN/m στους 20°C για αμιγή espresso arabica με συνολική περιεκτικότητα στερεών 52,5 g/L) ήταν χαμηλότερη από αυτήν της διεπιφάνειας νερού-αέρα (73 mN/m στους 20°C). Στην ουσία, το εύρημα αυτό απέδειξε την παρουσία επιφανειοδραστικών παραγόντων στην κρέμα του espresso. Αργότερα, οι Petracco et al. (1999) διαπίστωσαν την παρουσία επιφανειοδραστικών ενώσεων υψηλού μοριακού βάρους (7000-50.000 Da) σε εκχυλίσματα ζεστού νερού, τα οποία προήλθαν από καβουρδισμένο καφέ που είχε προηγουμένως απολιπανθεί. Στα ροφήματα καφέ espresso έχουν ταυτοποιηθεί δυο κατηγορίες πολυμερών επιφανειοδραστικών διαλυτών ενώσεων: πολυσακχαρίτες,

συμπεριλαμβανομένης της γαλακτομαννάνης και της αραβινογαλακτάνης, και μελανοϊδίνες που αποτελούν τελικά προϊόντα των αντιδράσεων Maillard, κατά τη διαδικασία της φρύξης του καφέ. Αυτά τα συστατικά συμβάλουν σημαντικά στην αφριστική συμπεριφορά του καφέ espresso. Άλλες έρευνες έδειξαν ότι αρκετές κατηγορίες σύνθετων μορίων, όπως τα γλυκολιπίδια και οι γλυκοπρωτεΐνες, συμμετέχουν ενεργά στο σχηματισμό αφρού και γαλακτώματος, αλλά και στη σταθεροποίηση του αφρού στον καφέ espresso (Illy & Viani, 2005).

4.2. Λειτουργίες τασιενεργών ουσιών και σταθερότητα αφρού

Οι διαδικασίες παρασκευής, οι ιδιότητες και η μακροχρόνια σταθερότητα αφρών και γαλακτωμάτων καθορίζονται από την προσρόφηση και τις μετέπειτα αλληλεπιδράσεις μεταξύ μοριακών ειδών στις διεπιφάνειες αέρα-νερού και ελαίου-νερού. Στα συστήματα τροφίμων, οι διεπιφάνειες πληρούνται από μεγάλο αριθμό μοριακών ειδών, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν διάφορες πρωτεΐνες, τασιενεργές ουσίες, λιπίδια και πολυσακχαρίτες. Ορισμένες κατηγορίες τασιενεργών ουσιών, όπως οι πρωτεΐνες και ορισμένα λιπίδια, έχουν προσδιοριστεί ποσοτικά, παρά το γεγονός ότι την εποχή που έγινε αυτό δεν είχαν αναγνωριστεί οι επιφανειοδραστικές λειτουργίες τους. Ειδικότερα, από την ανάλυση του κλάσματος των λιπιδίων που περιέλαβε τα τριακυλογλυκερίδια, τα διακυλογλυκερίδια και τα λιπαρά οξέα, προέκυψε ότι τα πρώτα πέντε κλάσματα (5 mL το καθένα) που αντιστοιχούν αθροιστικά σε έναν κανονικό όγκο φλυτζανιού espresso, περιέχουν περίπου 2,1 mg/ml τριακυλογλυκερίδια, 0,4 mg/ml διακυλογλυκερίδια και 0,09 mg/ml ελεύθερα λιπαρά οξέα (Illy & Navarini, 2011). Η ίδια έρευνα έδειξε ότι ολόκληρο το ρόφημα καφέ espresso που παρασκευάστηκε αμιγώς από ποικιλία *C. arabica* ή *C. canephora* (robusta) περιείχε συνολική συγκέντρωση λιπιδίων 1,80 mg/mL και 0,55 mg/mL, αντίστοιχα. Επίσης, έχει προταθεί ότι και άλλες κατηγορίες σύνθετων μορίων, όπως οι γλυκοπρωτεΐνες και τα γλυκολιπίδια, ενδέχεται να συμμετέχουν στο σχηματισμό ή και τη σταθεροποίηση του αφρού (Illy & Navarini, 2005).

Οι Nunes et al. (1997) προσδιόρισαν τη δυνατότητα αφρισμού και τη σταθερότητα του αφρού καφέ espresso, συναρτήσει του βαθμού καβουρδίσματος

και άλλων εξαρτώμενων μεταβλητών, όπως το pH και η περιεκτικότητα σε λίπος, ολικά στερεά, πρωτεΐνες και υδατάνθρακες. Παρατήρησαν υψηλό βαθμό συσχέτισης ανάμεσα στην αφριστική ικανότητα και την περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες, καθώς και μεταξύ σταθερότητας αφρού και των κλασμάτων που περιείχαν πολυσακχαρίτες υψηλού μοριακού βάρους. Τα συγκεκριμένα κλάσματα είναι ένα μίγμα γαλακτομαννάνης και αραβινογαλακτάνης ή ορθότερα, σύμπλοκα πολυσακχαριτών, πρωτεϊνών και φαινολικών ενώσεων που παράγονται κατά τη διαδικασία του καβουρδίσματος, πιθανώς προϊόντα αντιδράσεων Maillard. Η ίδια έρευνα έδειξε ότι υπάρχει ισχυρός αρνητικός συσχετισμός μεταξύ λίπους και ικανότητας αφρισμού (Illy & Navarini, 2011).

4.3. Μηχανισμοί αφρισμού και αποσταθεροποίησης αφρού

Οι φυσικοχημικές διεργασίες που διέπουν τη μεταβατική φάση εκχύλισης του καφέ espresso παρουσιάζουν εξαιρετική πολυπλοκότητα. Για την ερμηνεία της δυναμικής αυτής κατάστασης είναι απαραίτητο να γίνει αναφορά στον ρόλο που διαδραματίζει η ισορροπία μεταξύ όξινων ανθρακικών ιόντων και ανθρακικού οξέος (Illy & Navarini, 2011). Αυτή η μεταβατική κατάσταση αποτελεί το αρχικό στάδιο διαβροχής του καφέ για την παρασκευή του espresso, κατά το οποίο, το ζεστό νερό διεισδύει και γεμίζει τα κενά των σωματιδίων του καφέ, ενώ ταυτόχρονα το ενδοσωματιδιακό αέριο αποβάλλεται από το στρώμα του καφέ. Ταυτόχρονα, λαμβάνουν χώρα φαινόμενα μεταφοράς μάζας μεταξύ των σωματιδίων του καφέ και του καυτού νερού που λειτουργεί ως μέσο εκχύλισης. Η μεταβατική φάση ολοκληρώνεται όταν επιτευχθεί ισορροπία και επέλθει μια φάση σταθερής κατάστασης, κατά την οποία, η πίεση και η ταχύτητα ροής του νερού παραμένουν σταθερές, μέχρις ότου ολοκληρωθεί η εκχύλιση.

Αναφορικά με τη σταθερότητα του αφρού, πιστεύεται ότι η σχετικά υψηλή θερμοκρασία του ροφήματος μπορεί να προκαλέσει μείωση του πάχους των μεμβρανών που καλύπτουν τις φυσαλίδες αέρα, μέσω της εξάτμισης μέρους του νερού. Ο μηχανισμός αυτός φαίνεται να ευθύνεται σε μεγάλο βαθμό για την κατάρρευση της δομής του αφρού, περισσότερο από τυχόν δυσαναλογίες. Επίσης, η εξάτμιση του νερού προκαλεί αύξηση της συγκέντρωσης επιφανειοδραστικών

ουσιών στις μεμβράνες και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της επιφανειακής τάσης. Εν προκειμένω, το αποτέλεσμα αυτής της επίδρασης διαφέρει μεταξύ λεπτού και παχέος τμήματος της μεμβράνης, γεγονός που οδηγεί στην ανάπτυξη δυνάμεων τάνυσης και στην αποσταθεροποίηση της μεμβράνης.

Ο ανταγωνισμός που δημιουργείται στη διεπιφάνεια αέρα-ροφήματος μεταξύ αφενός των πρωτεϊνών που είναι ικανές να σταθεροποιούν τον αφρό σχηματίζοντας μια ιξωδοελαστική «επιδερμίδα» γύρω από τις φυσαλίδες, και αφετέρου των ελεύθερων λιπαρών οξέων, προκαλεί αποσταθεροποίηση του αφρού. Η μεταβολή αυτή προκαλείται λόγω της μείωσης που υφίσταται η μηχανική ισχύς του προσροφημένου στρώματος πρωτεΐνης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η πιθανότητα ρήξης και συνένωσης των φυσαλίδων. Σε έναν τυπικό καφέ espresso (25 mL) τα συνολικά λιπίδια κυμαίνονται από 45 έως 145,6 mg για τον arabica και από 13,65 έως 119,25 mg για τον robusta. Κατά μέσο όρο, ο espresso τύπου arabica περιέχει υψηλότερη συγκέντρωση λιπιδίων, σε σχέση με τον espresso τύπου robusta και, ως εκ τούτου, η πιθανότητα αποσταθεροποίησης του αφρού λόγω αυξημένης περιεκτικότητας λιπιδίων είναι υψηλότερη στην περίπτωση του arabica.

Ο καφές espresso περιέχει γαλακτωματοποιημένα λιπίδια, η παρουσία των οποίων μπορεί επίσης να οδηγήσει σε αποσταθεροποίηση του αφρού, μέσω της εξάπλωσης της λιπαρής φάσης στην διεπιφάνεια αέρα-ροφήματος. Η διαδικασία αυτή συνάδει με τη χαμηλότερη επιφανειακή τάση που παρατηρείται στον espresso τύπου arabica, σε σύγκριση με τον espresso που παρασκευάζεται αμιγώς από τον τύπο robusta. Αν και σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές που μελέτησαν τη σύνθεση του λιπιδικού κλάσματος των δυο τύπων espresso, η περιεκτικότητά τους σε ολικά λιπίδια ήταν παρόμοια (58 mg για τον robusta και 57 mg για τον arabica), εντούτοις διαπιστώθηκαν σημαντικές ποιοτικές διαφορές που έδειξαν ότι τα επίπεδα των κλασμάτων των φωσφολιπιδίων και ελεύθερων διτερπενικών αλκοολών ήταν τρεις φορές υψηλότερα στη ποικιλία robusta, συγκριτικά με την ποικιλία arabica (Illy & Navarini, 2011).

Συμπεράσματα

Μέχρι πρόσφατα, ο ρόλος των φυσαλίδων του *espresso* και η ερμηνεία της σημασίας τους για την ποιότητα του καφέ είχαν παραμεληθεί από επιστημονική άποψη. Σήμερα έχει γίνει αντιληπτό ότι ο αφρός του *espresso* αποτελεί πρόκληση για τους ερευνητές, αφενός λόγω της εγγενούς πολυπλοκότητάς του και αφετέρου λόγω της έλλειψης σχετικής βιβλιογραφίας. Εκτός από τον αφρό της μπύρας και ορισμένα άλλα γνωστά συστήματα αφρών τροφίμων, η «κρέμα» του *espresso* αντιπροσωπεύει ένα μοντέλο που αξίζει ιδιαίτερης προσοχής, αφού η κατανόηση του θα αποτελέσει σημαντική προσθήκη στις τρέχουσες γνώσεις της επιστήμης των αφρών.

Η παρασκευή του *espresso* περιγράφεται ως ένας γρήγορος τρόπος για τη μεταφορά CO₂ από τον καβουρδισμένο–αλεσμένο καφέ σε ένα φλιτζάνι, με ζεστό νερό υπό πίεση. Βασικό στοιχείο για την ερμηνεία των παραγόντων που επηρεάζουν τη φυσικοχημεία του αφρού είναι η περιεκτικότητα του καβουρδισμένου καφέ σε CO₂, πέραν αυτού που υπάρχει στο νερό ως διττανθρακικά ανιόντα (HCO₃⁻). Ο όγκος του αφρού, η ανθεκτικότητα και η συνοχή του, εξαρτώνται από την ποσότητα CO₂ που υπήρχε αρχικά στον καφέ. Παρά τη μετασταθερή, βραχύβια φύση του αφρού, οι δυναμικές μεταβάσεις της μικροδομής του μπορούν πλέον να απεικονιστούν και να αποδοθούν ποσοτικά, με σύγχρονες τεχνικές απεικόνισης και επεξεργασίας εικόνας. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η αποσαφήνιση της επίδρασης λιπιδίων και λιπαρών σωματιδίων του καφέ στον αφρισμό και τη σταθερότητα του αφρού, αφού η «κρέμα» του *espresso* περιλαμβάνει στη δομή της και γαλάκτωμα τύπου Λ/Ν.

Ο αφρός του καφέ *espresso* θα μπορούσε να αποτελέσει ένα πρότυπο για τη μελέτη και ερμηνεία πολλών φαινομένων αφρισμού σε προϊόντα τροφίμων και ποτών. Η επιστήμη που κρύβεται πίσω από τις φυσαλίδες του αφρού είναι εξίσου ενδιαφέρουσα και ευχάριστη, όπως ένα απολαυστικό ρόφημα *espresso*.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Anderson, B.A., Shimoni, E., Liardon, R. & Labuza, T.P. (2003). “The diffusion kinetics of carbon dioxide in fresh roasted and ground coffee”. *Journal of Food Engineering*, **59**, 71–78.

Clarke, R.J. (2003). Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition. Pp. 1485-1492. Donnington, Chichester, West Sussex, UK: Elsevier Ltd.

Colin, A. (2012). Coalescence in foams. In: *Foam engineering - Fundamentals and applications*, ed. P. Stevenson. Pp. 75–90. Chichester, UK: John Wiley and Sons, Inc.

Damodaran, S. (2006). Protein stabilization of emulsions and foams. *Journal of Food Science*, **70** (3): R54–66.

Dickinson, E. (1989). Protein adsorption at liquid interfaces and the relationship to foam stability. In: *Foams - Physics, chemistry and structure*, ed. A.J. Wilson, 39–54. Berlin, Germany: Springer-Verlag.

Dickinson, E. (1992). *An introduction to food colloids*. Oxford, UK: Oxford University Press.

Dold, S., Lindinger, C., Kolodziejczyk, E., Pollien, P., Ali, S., Germain, J.C., Perin, S.G., Pineau, N., Folmer, B., Engel, K.-H., et al. (2011). Influence of foam structure on the release kinetics of volatiles from espresso coffee prior to consumption. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **59** (20):11196–203. doi: 10.1021/jf201758h.

Folmer, B., Blank I. and Hofmann, T. (2017). Crema – Formation, stabilization, and sensation. In: *The craft and science of coffee*, ed. B. Folmer. Pp. 400–17. London, UK: Academic Press.

Green, A.J., Littlejohn, K.A., Hooley, P. & Cox, P.W. (2013). Formation and stability of food foams and aerated emulsions: Hydrophobins as novel functional ingredients. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, **18** (4):292–301.

Illy, A. & Viani, R. (2005). *Espresso coffee: the science of quality*, 2nd edition. London: Elsevier Academic Press.

- Illy, E. & Navarini, L. (2011). Neglected Food Bubbles: The Espresso Coffee Foam. *Food Biophysics*, **6**, 335–348
- Illy, E. (2002). The complexity of coffee. *Scientific American*, 286 (6): 86–98.
- Krzan, M. (2013). Rheology of the wet surfactant foams and biofoams – A review. *Technical Transactions*, 9–27.
- Ishwarya P.S. & Nisha, P. (2020). Unraveling the science of coffee foam – a comprehensive review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, DOI: 10.1080/10408398.2020.1765136
- Labbe, D., Sudre, J., Dugas, V. & Folmer B. (2016). Impact of crema on expected and actual espresso coffee experience. *Food Research International*, 82:53–8.
- Lee, J.S., Weon, B.M. & Je, J.H. (2013). X-ray phase-contrast imaging of dynamics of complex fluids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46(49):494006. doi:10.1088/0022-3727/46/49/ 494006.
- Le Loup, V.M.J., Mora, F. & Montavon, P. (2014). Method of improving coffee crema. Patent number WO2014102232A1, filed December 3, 2013, and issued July 3, 2014.
- Nilsson, G. (2015). *Microstructure of instant coffee foam: Confocal microscopy method development and production related parameters affecting foam kinetics*. MSc thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Nunes, F.M., Coimbra, M.A., Duarte, A.C. & Delgadillo, I. (1997). Foamability, foam stability, and chemical composition of espresso coffee as affected by the degree of roast. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45 (8):3238–43.
- Odello, L. & Odello, C. (2006). *Espresso Italiano Tasting*. Centro Studi Assaggiatori. Brescia, Italy: Artigianelli Spa.
- Πάπυρος Larousse Britannica (2007). Σειρά εγκυκλοπαίδειας Πάπυρος Larousse Britannica (σειρά pocket), Τόμος 28. Αθήνα: Εκδοτικός Οργανισμός Πάπυρος.
- Petracco, M. (2001). Beverage preparation: Brewing trends for the new millennium. In: *Coffee recent developments*, eds. R. J. Clarke and O. G. Vitzthum. Pp. 140–64. London, UK: Blackwell Science.

- Petracco, M. (2005). The cup. In: *Espresso coffee - The science of quality*, eds. A. Illy and R. Viani. 2nd ed., Pp. 290–315. Amsterdam, The Netherlands: Academic Press.
- Petracco, M., Navarini, L., Abatangelo, A., Gombac, V., D’Agnolo, E. & Zanetti, F. (1999). Isolation and characterization of a foaming fraction from hot water extracts of roasted coffee. In: *Proceedings of the 18th International Scientific Colloquium on Coffee*, Pp. 95–105. Helsinki, Finland, Paris: ASIC.
- Piazza, L., Gigli, J., Bulbarello, A. (2008). Interfacial rheology study of espresso coffee foam structure and properties. *J. Food Eng.*, 84, 420–429.
- Roth, K. (2010). *Espresso – A Feast for the Senses*. Chemie in unserer Zeit/Wiley-VCH. Accessed January 25, 2019.
- Severini, C., De Pilli, T., Romani, S. & Pinnavaia, G.G. (1999). Quality characteristics of “espresso” coffee. A study performed through coffee shops (in Italian). *Industrie Alimentari*, 38:1279–84.
- Silizio, F. (2008). *Coffee foam*, IC Biolab, Internal Report No. 003/2008.
- Smrke, S., Wellinger, M., Suzuki, T., Balsiger, F., Opitz, S.E.W. & Yeretian, C. (2018). Time-resolved gravimetric method to assess degassing of roasted coffee. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66 (21):5293–300.
- Sulewska, A.M., Larsen, F.H., Sørensen, J.K. & Pedersen, A.H. (2021). Advanced instrumental characterization of the coffee extracts produced by pilot scale instant coffee process. *European Food Research and Technology*, 247:1379–1387.
- Vincent, J.C. (1987). International standardization. In R.J. Clarke and R. Macrae (eds), *Coffee: Volume 1 - Technology*. London: Elsevier Applied Science, pp. 28–30.
- Weiss, J., Cancelliere, C. & McClements, D.J. (2000). Mass transport phenomena in oil-in-water emulsions containing surfactant micelles: Ostwald ripening. *Langmuir*, 16 (17): 6833–8, doi: 10.1021/la991477v.

Ελληνική βιβλιογραφία

- Μανουσίδης, Χ. (2009). *Το εγχειρίδιο του καφέ*. Σελίδες 15-21, 65-68. Αθήνα: Εκδόσεις Ψύχαλου.

Μαργέλος, Π., Σαμαριτάκης, Ι. & Τριανταφυλλόπουλος, Ν. (2020). *Τύποι καφέ, μέθοδοι επεξεργασίας και επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία* (Πτυχιακή Εργασία). Σητεία: Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Τμήμα Επιστημών Διατροφής & Διαιτολογίας.

Διαδικτυακές πηγές

Wikipedia: Καφές. <https://el.wikipedia.org/wiki/καφές> (accessed 08-11-2021).