



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ



ΕΘΝΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΕΡΕΥΝΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΧΗΜΙΚΗΣ ΒΙΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΒΙΟΕΠΙΧΕΙΡΕΙΝ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Παράγοντες που επηρεάζουν τη δημιουργία ρωγμών κατά την
ξήρανση ζυμαρικών**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
Σωτήριος Μαρράς , Μέλος ΕΔΙΠ, Παν.Θεσσαλίας
Τεχνικός σύμβουλος
Φώτης Λατίνης, Melissa

ΝΙΚΟΛΑΟΣ-ΡΑΦΑΗΛ ΓΡΥΛΛΑΚΗΣ

00138

ΛΑΡΙΣΑ, 2025



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF HEALTH SCIENCES
DEPARTMENT OF BIOCHEMISTRY AND
BIOTECHNOLOGY



NATIONAL HELLENIC RESEARCH FOUNDATION
INSTITUTE OF CHEMICAL BIOLOGY

**INTERSTITUTIONAL PROGRAM OF POSTGRADUATE STUDIES
IN**



MASTER THESIS

Factors affecting the formation of cracks during drying of pasta

SUPERVISOR:

Marras Sotirios, Special Teaching Staff Member, Uni. Of Thessaly

TECHNICAL ADVISOR:

Latinis Fotis, Melissa

Nikolaos-Rafail Gryllakis

00138

Larissa, 2025

Ευχαριστίες

Αρχικά νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου , κύριο Σωτήρη Μαρρά για την ουσιαστική καθοδήγηση που μου παρείχε καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε για να ολοκληρωθεί η μεταπτυχιακή μου διατριβή. Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα μέλη της Τριμελούς Επιτροπής τον κύριο Λεωνίδα Δημήτρη και την κυρία Περσεφόνη Γιαννούλη. Επίσης, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον ειδικό σύμβουλο που είχα, προϊστάμενο παραγωγής της Melissa κύριο Φώτη Λατίνη ο οποίος με ξενάγησε στους χώρους της εταιρείας και μου έδωσε αρκετό υλικό το οποίο με βοήθησε στη συγγραφή της διπλωματικής εργασίας. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη κατανόηση και συμπαράσταση που μου έδειξαν σε όλη τη διάρκεια αυτού του μεταπτυχιακού.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	8
Abstract.....	9
Σκοπός.....	10
1.1 Ιστορικά στοιχεία	11
1.2 Η εξέλιξη των ζυμαρικών	13
2.1 Χημική σύσταση και στάδια παραγωγής ζυμαρικών	17
2.1.1 Χημική σύνθεση του σκληρού σιταριού.....	17
2.1.1.1 Άμυλο	17
2.1.1.2 Πρωτεΐνες	18
2.1.1.3 Λιπίδια.....	20
2.1.1.4 Πεντοζάνες.....	21
2.1.1.5 Ένζυμα.....	21
2.2 Στάδια παραγωγής ζυμαρικών	22
2.2.1 Από τη Δοσομέτρηση στην Ανάμειξη	25
2.2.2 Ο ρόλος της ενυδάτωσης στη διαμόρφωση της δομής και της τελικής ποιότητας των ζυμαρικών	27
2.2.3 Η Διαδικασία της ενυδάτωσης σε ζυμαρικά με εμπλουτισμένες ή εναλλακτικές συνθέσεις.....	28
2.2.4 Καινοτόμες Τεχνολογίες Ενυδάτωσης στη Βιομηχανία Ζυμαρικών	29
2.2.5 Τεχνολογίες Μορφοποίησης στη Βιομηχανική Παραγωγή Ζυμαρικών	35
2.2.6 Επίδραση των παραμέτρων εξώθησης στη δομή και ποιότητα των ζυμαρικών	37
2.2.7 Συγκριτικές Τεχνολογίες Επεξεργασίας Ζύμης: Εξώθηση έναντι Έλασης.....	38
2.2.8 Ξήρανση και σταθερότητα των ζυμαρικών: επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής και ποιότητας.....	40
Στάδια Ξήρανσης	41
β. Τελική Ξήρανση	43
γ. Στάδιο Ψύξης και Σταθεροποίησης	44
2.3 Ανίχνευση ρωγμών	46
2.4 Ποιοτικός έλεγχος ζυμαρικών: παραλαβή, ξήρανση και ανίχνευση ρωγμών	49

2.4.1 Κριτήρια Ελέγχου κατά την Παραλαβή Ζυμαρικών	49
2.4.2 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά και Έλεγχος Ζυμαρικών κατά το στάδιο της ξήρανσης	63
2.5 Επίδραση της ξήρανσης στη μαζική μεταφορά υγρασίας και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των ζυμαρικών	66
2.6 Ρωγμές μετά το στάδιο της ξήρανσης.....	68
2.7 Η γλουτένη και ο ρόλος της στην ποιότητα των ζυμαρικών.....	71
2.7.1 Η γλουτένη και το ασκορβικό οξύ	71
2.7.2 Εξώθηση και η επίδρασή της στην ποιότητα των ζυμαρικών χωρίς γλουτένη.....	76
2.7.3 Μέθοδοι ξήρανσης και οι επιπτώσεις τους στην υφή των ζυμαρικών χωρίς γλουτένη	77
2.8 Ζύμωση υπό κενό και η συμβολή της στη δομή και ποιότητα των ζυμαρικών	78
2.8.1 Άλλοι παράγοντες ρωγμών-Σύνοψη	80
2.8.2 Τεχνολογικά προβλήματα και πρόληψη.....	81
2.8.3 Πρόσφατες Εξελίξεις στην Παρασκευή Ζυμαρικών	84
2.8.4 Μελλοντικές Προοπτικές στην Παρασκευή Ζυμαρικών	85
3. Συμπεράσματα	87
4. Βιβλιογραφία.....	87-101

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Η εξέλιξη της σύστασης των ζυμαρικών: Σύγχρονες πρώτες ύλες και διατροφικά οφέλη.....	16
Εικόνα 2: Λειτουργική συνεργασία γλουτενίνης και γλιαδίνης στη ζύμη.....	20
Εικόνα 3: Μέγεθος σωματιδίων και κατανομή υγρασίας στο μείγμα.....	26
Εικόνα 4: Πρωτεϊνική δομή συσσωματωμάτων ζύμης μετά από 10΄ ανάμιξης.....	27
Εικόνα 5: Πρέσα Polymatic.....	31
Εικόνα 6: Σύστημα Premix.....	32
Εικόνα 7: Σύστημα Bakmix.....	32
Εικόνα 8: Βιομηχανικός εξωθητήρας ζυμαρικών Storci.....	34
Εικόνα 9: Ιμάντας σταθεροποίησης ζύμης Beltmix.....	34
Εικόνα 10: Εξώθηση υπό πίεση.....	35
Εικόνες 11,12: Μηχανήματα μορφοποίησης της ζύμης με έλαση.....	36
Εικόνα 13: Διαδικασία παραγωγής ζυμαρικών.....	40
Εικόνα 14: Τελικός έλεγχος σε διαφορετικά είδη ζυμαρικών.....	42
Εικόνες 15, 16: Τα ριγκατόνι εμφανίζουν μηχανικές βλάβες.....	44
Εικόνα 17: Η βασική καμπύλη της υγρασίας του προϊόντος.....	45
Εικόνα 18: Διαδικασία αξιολόγησης της ποιότητας των ζυμαρικών (σπαγγέτι).....	46
Εικόνα 19: Μια απλή τεχνική ανάλυσης εικόνας με ψηφιακή κάμερα διευκολύνει την ανίχνευση ρωγμών σε αποξηραμένα σπαγγέτι.....	48
Εικόνα 20: Πρωτότυπες εικόνες διέλευσης φωτός και αντίστοιχες επεξεργασμένες εικόνες.....	49
Εικόνα 21: Δύναμη θραύσης και Ευκαμψία δειγμάτων ξηρών ζυμαρικών.....	59
Εικόνα 22: Τιμές σκληρότητας και συνοχής μαγειρεμένων δειγμάτων ζυμαρικών ως συνάρτηση του χρόνου μετά το μαγείρεμα.....	60
Εικόνα 23: Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης της επιφάνειας ξηρών ζυμαρικών	61
Εικόνα 24: Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης της τομής των ξηρών ζυμαρικών.....	61
Εικόνα 25: Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης της τομής των μαγειρεμένων ζυμαρικών	62

Εικόνα 26: Αισθητηριακή αξιολόγηση δειγμάτων σπαγγέτι.....	63
Εικόνα 27. Εικόνες της επιφάνειας ζυμαρικών με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης.....	74
Εικόνα 28: Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης της επιφάνειας της διατομής των ζυμαρικών.....	75

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων δειγμάτων σιμιγδαλιού σκληρού σίτου.....	55
---	----

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Κύρια συστατικά του σκληρού σιταριού και ο ρόλος τους στην ποιότητα ζυμαρικών.....	22
Πίνακας 2: Παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα της ζύμης/ζυμαρικών.....	24
Πίνακας 3: Αξιολόγηση των οργανοληπτικών, απτικών και γευστικών ιδιοτήτων των ζυμαρικών.....	53
Πίνακας 4: Χημικά χαρακτηριστικά δειγμάτων σιμιγδαλιού σκληρού σίτου.....	54
Πίνακας 5: Θερμικές ιδιότητες των αναλυθέντων δειγμάτων σιμιγδαλιού και σπαγγέτι.....	56
Πίνακας 6: Ιξωδομετρικά χαρακτηριστικά (pasting characteristics) δειγμάτων σπαγγέτι και σιμιγδαλιού.....	57
Πίνακας 7: Ποιότητα μαγειρέματος των τριών τύπων σπαγγέτι (Α, Β και Γ).....	58
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά των δειγμάτων σκληρού σιμιγδαλιού που χρησιμοποιήθηκαν.....	69
Πίνακας 9: Διαστάσεις των διαφορετικών τύπων ζυμαρικών.....	69
Πίνακας 10: Τα ριγκατόνι εμφανίζουν αυξημένες ρωγμές μετά την ξήρανση.....	70
Πίνακας 11: Ρωγμές και σπασίματα των ριγκατόνι πριν και μετά την τροποποίηση της γραμμής συσκευασίας.....	71
Πίνακας 12 : Αίτια ρωγμών στα ζυμαρικά.....	81
Πίνακας 13: Τεχνικές πρόληψης ρωγμών στα ζυμαρικά.....	83

Περίληψη

Τα ζυμαρικά αποτελούν τρόφιμα ευρείας κατανάλωσης με ιδιαίτερη διατροφική και πολιτισμική σημασία, ενώ η παραγωγή τους βασίζεται κυρίως στο σιμιγδάλι σκληρού σίτου (*Triticum durum*), το οποίο εξασφαλίζει τις απαραίτητες τεχνολογικές ιδιότητες για την επίτευξη προϊόντων υψηλής ποιότητας. Η αυξημένη κατανάλωσή τους αποδίδεται στον περιορισμένο χρόνο προετοιμασίας, στη δυνατότητα μακροχρόνιας αποθήκευσης χωρίς σημαντική απώλεια ποιότητας, καθώς και στο χαμηλό κόστος τους. Στην Ελλάδα η κατανάλωση ζυμαρικών παρουσιάζει διαρκή ανάπτυξη, κατατάσσοντας τη χώρα στις υψηλότερες θέσεις σε διεθνές επίπεδο.

Κατά τη διαδικασία παραγωγής, και ιδίως στο στάδιο της ξήρανσης, είναι δυνατόν να προκύψουν ποιοτικά ελαττώματα που επηρεάζουν την εμπορική αξία και τη λειτουργικότητα του προϊόντος. Οι ρωγμές και τα σπασίματα συγκαταλέγονται στα σημαντικότερα προβλήματα, καθώς αλλοιώνουν την οργανοληπτική εικόνα, αυξάνουν τις απώλειες κατά το μαγείρεμα και μειώνουν την αποδοχή από τον καταναλωτή.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των παραμέτρων που οδηγούν στην εμφάνιση ρωγμών στο τελικό προϊόν. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον τρόπο που επιδρά η ποσότητα και ποιότητα της γλουτένης που περιέχει το σιμιγδάλι καθώς και η ζύμωση υπό κενό στην δομή των ζυμαρικών.

Μέσα από τη μελέτη αυτών των παραμέτρων, η εργασία αποσκοπεί τόσο στην καλύτερη κατανόηση όσο και στην ανάδειξη των κρίσιμων τεχνολογικών και φυσικοχημικών παραγόντων που καθορίζουν την ποιότητα και τη σταθερότητα των ζυμαρικών, προσφέροντας επιστημονικά τεκμηριωμένες γνώσεις που μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο από τη βιομηχανία όσο και από την ακαδημαϊκή κοινότητα, με τελικό στόχο τη βελτίωση της ποιότητας και της σταθερότητας του τελικού προϊόντος.

Λέξεις κλειδιά

ζυμαρικά, σκληρό σιτάρι, πρωτεΐνη, γλουτένη, ρωγμή, σπασίματα

Abstract

Pasta constitutes one of the most widely consumed foods worldwide, with significant nutritional and cultural importance. Its production relies primarily on durum wheat semolina (*Triticum durum*), which provides the technological properties required for high-quality products. The increased demand for pasta is attributed to its short preparation time, extended shelf-life without major quality losses, and affordability. In Greece, pasta consumption has shown continuous growth, placing the country among the top consumers on an international scale.

During pasta production, particularly in the drying stage, several quality defects may occur, negatively affecting both commercial value and product functionality. Cracks and fractures are considered among the most critical defects, as they impair the visual appearance, increase cooking losses, and reduce consumer acceptance.

The purpose of this thesis is to investigate the parameters that lead to the appearance of cracks in the final product. Particular emphasis is given to the way in which the quantity and quality of gluten contained in semolina as well as vacuum fermentation affect the structure of pasta.

By investigating these parameters, this work aims to highlight the critical technological and physicochemical factors that influence pasta quality and stability, providing valuable insights for both industrial production and further research in the field.

Keywords

pasta, durum wheat, protein, gluten, crack, breaks, dried, vacuum, mixing

Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση των παραγόντων που συμβάλλουν στην εμφάνιση ρωγμών στο τελικό προϊόν ζυμαρικών κατά το στάδιο της ξήρανσης, με ιδιαίτερη έμφαση στον ρόλο της γλουτένης (ως προς την ποιότητα και την ποσότητά της) καθώς και στην επίδραση της ζύμωσης υπό κενό στη δομή και τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των ζυμαρικών. Μέσα από τη μελέτη αυτών των παραμέτρων επιδιώκεται η κατανόηση των αιτιών που οδηγούν σε ατέλειες, με απώτερο σκοπό τη βελτίωση της ποιότητας και της ομοιομορφίας του παραγόμενου προϊόντος.

1. Εισαγωγή

1.1 Ιστορικά στοιχεία

Τα ζυμαρικά αποτελούν σημαντικό στοιχείο της ιταλικής γαστρονομικής παράδοσης, ωστόσο δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί πότε ακριβώς εμφανίστηκαν για πρώτη φορά στην Ιταλία. Η εμφάνισή τους φαίνεται να τοποθετείται χρονικά μετά την αρχική καλλιέργεια σιταριού στη Μεσόγειο, αλλά και πριν από τα ταξίδια του Μάρκο Πόλο στην Κίνα, όπου συχνά –αν και λανθασμένα– του αποδίδεται η «ανακάλυψη» των ζυμαρικών. Παρά ταύτα, οι ιστορικοί αδυνατούν να εντοπίσουν με ακρίβεια την ακριβή περίοδο (Lierheimer, 2022).

Μια πρώιμη αναφορά εντοπίζεται στον Ταλμούδ της Ιερουσαλήμ, σε ένα κείμενο του 5ου αιώνα, όπου γίνεται λόγος για μια συζήτηση σχετικά με το κατά πόσο τα ζυμαρικά συμβαδίζουν με τους εβραϊκούς διατροφικούς κανόνες. Στο κείμενο αυτό χρησιμοποιείται ο όρος *itriyah*, που στη συνέχεια καθιερώνεται στην αραβική ως η λέξη για τα αποξηραμένα ζυμαρικά – σε αντιδιαστολή με τα φρέσκα, τα οποία αναφέρονταν ως *lakhsha* (Shelke, 2016).

Μια ακόμη ιστορική αναφορά στην ύπαρξη ζυμαρικών προέρχεται από τον 11ο αιώνα, όταν Εβραίοι εγκαταστάθηκαν στη Γαλλία και παρασκεύαζαν ένα είδος ζυμαρικού που αποκαλούνταν *vermishelsh*. Το φαγητό αυτό μοιάζει με τα σημερινά *vermicelli* και η αναφορά αυτή επιβεβαιώνει ότι παραλλαγές των ζυμαρικών υπήρχαν σε διαφορετικές περιοχές της Ευρώπης ήδη από τον Μεσαίωνα. Για να κατανοήσει, ωστόσο, κανείς την πραγματική καταγωγή των ζυμαρικών στην Ιταλία, είναι απαραίτητο να στραφεί και σε άλλες περιοχές του κόσμου. Όπως επισημαίνει η Jen Lin-Liu στο έργο της *On the Noodle Road*, η εξέλιξη των ζυμαρικών στην Ιταλία φαίνεται πως αποτέλεσε αποτέλεσμα πολιτισμικής αλληλεπίδρασης και επιρροών, σε αντίθεση με την περίπτωση της Κίνας, όπου τα νουντλς φαίνεται να αναπτύχθηκαν ανεξάρτητα και εγχώρια (Lin-Liu, 2013).

Η εξέλιξη των ζυμαρικών στην Ιταλία υπήρξε σταδιακή και αργή. Για μεγάλο χρονικό διάστημα, κυρίαρχη θέση στην κατανάλωση σίτου είχαν τα προϊόντα αρτοποιίας,

με τοψωμί να αποτελεί τη βασική τροφή. Τα ζυμαρικά, αντίθετα, θεωρούνταν περισσότερο ως μια μορφή χυλού και καταναλώνονταν σπάνια. Οι πρώτες μορφές ζυμαρικών που εμφανίζονται στην ιταλική γαστρονομική παράδοση και φέρουν ομοιότητες με τα σύγχρονα προϊόντα είναι τα λαζάνια και το vermicelli. Αυτές οι δύο μορφές κατατάσσονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες, που εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται και σήμερα: μακριά ζυμαρικά, κοντά ζυμαρικά, ζυμαρικά με βάση το αυγό και ειδικά προϊόντα (Lierheimer, 2022).

Παράλληλα, διαμορφώθηκε και ο διαχωρισμός μεταξύ φρέσκων και αποξηραμένων ζυμαρικών. Τα vermicelli ανήκαν κυρίως στην κατηγορία των αποξηραμένων, ενώ τα λαζάνια καταναλώνονταν νωπά, λίγο μετά την παρασκευή τους (Sabbatini & Silvano, 2000). Κατά τη μεσαιωνική περίοδο, τα ζυμαρικά απέκτησαν σταδιακά μεγαλύτερη δημοφιλή τόσο στην Ιταλία όσο και στις γειτονικές περιοχές. Σε πολλές πόλεις λειτουργούσαν εργαστήρια φρέσκων ζυμαρικών, ενώ τα αποξηραμένα ζυμαρικά διακινούνταν σε ολόκληρη τη Μεσόγειο. Η Σικελία αναδείχθηκε σε σημαντικό κέντρο παραγωγής ζυμαρικών, κυρίως λόγω της ευνοϊκής γεωργικής παραγωγής σκληρού σίτου. Οι παραγωγοί της περιοχής διαχειρίζονταν ολόκληρη την αλυσίδα παραγωγής – από την καλλιέργεια έως τη διάθεση του τελικού προϊόντος στην αγορά (Lierheimer, 2022). Παράλληλα, νησιά όπως η Σαρδηνία και πόλεις όπως η Πίζα, η Νάπολη και η Γένοβα απέκτησαν εξέχουσα θέση στο εμπόριο ζυμαρικών, αξιοποιώντας τη γεωγραφική τους θέση και τις γεωργικές τους δυνατότητες. Το εμπόριο επεκτάθηκε πέρα από την Ιταλική χερσόνησο, συνδέοντας τη Μεσόγειο με περιοχές της Βόρειας Αφρικής και της Ευρώπης.

Παρατηρούνταν, επίσης, διαφοροποίηση στη ζήτηση για φρέσκα ή αποξηραμένα ζυμαρικά ανάλογα με την κοινωνική τάξη και την περιοχή. Τα αποξηραμένα προϊόντα θεωρούνταν λιγότερο εκλεκτά, ιδίως από τις ανώτερες τάξεις, παρότι προσέφεραν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και ευκολία μεταφοράς. Ωστόσο, οι πληροφορίες σχετικά με τις τεχνικές παραγωγής εκείνης της περιόδου είναι περιορισμένες. Παρόλο που είναι γνωστή η χρήση ζυμώματος, πλάστη και εργαλείων για το σχήμα των ζυμαρικών, ελάχιστες λεπτομέρειες έχουν διασωθεί για τις μεθόδους των πρώτων τεχνιτών ζυμαρικών (Lierheimer, 2022).

Κατά την περίοδο αυτή, τα ζυμαρικά γνώρισαν σημαντική εξέλιξη, οδηγώντας στη συνύπαρξη φρέσκων και αποξηραμένων μορφών τους και καθιερώνοντας την Ιταλία ως

τον βασικό εκπρόσωπο της παραγωγής ζυμαρικών στη Μεσόγειο. Πολλές ευρωπαϊκές περιοχές άρχισαν να υιοθετούν ιταλικούς όρους για τα ζυμαρικά, φαινόμενο που επεκτάθηκε έως και τη βόρεια Γαλλία και την Αγγλία. Αν και η παραγωγή τους συνέχιζαν να είναι κυρίως χειροποίητη, με περιορισμένα εργαλεία, σημαντικές αλλαγές συντελέστηκαν τον 16ο και 17ο αιώνα. Κατά την περίοδο αυτή, οργανώθηκαν συντεχνίες παραγωγών ζυμαρικών που αναζήτησαν νέες οικονομικές κατευθύνσεις, διευκολύνοντας την ταχύτερη και πιο οικονομική παραγωγή τους, με την αξιοποίηση νέων εργαλείων όπως οι πρέσες και οι μηχανισμοί εξώθησης (Sabban & Silvano, 2000). Αυτές οι τεχνολογικές καινοτομίες αύξησαν τη ζήτηση, ενίσχυσαν τη διάδοση των ζυμαρικών και οδήγησαν σε μεγαλύτερη εξειδίκευση στην παραγωγή σιμιγδαλιού από σκληρό σιτάρι.

Η έλευση της Βιομηχανικής Επανάστασης αποτέλεσε καταλύτη για τη μετάβαση από την παραδοσιακή χειροποίητη παρασκευή στη μαζική, μηχανοποιημένη παραγωγή, καθιστώντας τα ζυμαρικά προσβάσιμα σε παγκόσμιο επίπεδο, παρόμοια με ό,τι συνέβαινε στην Κίνα με τα noodles. Οι μηχανές αντικατέστησαν τη χειρωνακτική εργασία σε κάθε στάδιο της διαδικασίας, προσφέροντας σημαντική αύξηση της παραγωγής και συμβάλλοντας στην παγκόσμια φήμη της Ιταλίας στον τομέα αυτό (Lierheimer, 2022). Παρά τη βιομηχανική πρόοδο, στις μέρες μας παρατηρείται αναβίωση του ενδιαφέροντος για τα χειροποίητα ζυμαρικά, ως μέσο διατήρησης της παράδοσης και σύνδεσης με τις ιστορικές τεχνικές και συνταγές. Οι γαστρονομικές παραδόσεις των ζυμαρικών μεταδίδονται διαγενεακά και, με την εξάπλωση των Ιταλών μεταναστών στην Αμερική, επηρέασαν τη γαστρονομία πολλών περιοχών του κόσμου. Η πολυμορφία των σύγχρονων τοπικών παραδόσεων δεν θα είχε αναπτυχθεί χωρίς τη συμβολή της Ιταλίας, η οποία με τη σειρά της επηρεάστηκε βαθιά από τις προγενέστερες κοινωνίες της Μεσογείου (Lierheimer, 2022).

1.2 Η εξέλιξη των ζυμαρικών

Τα ζυμαρικά κατέχουν κυρίαρχη θέση στην πυραμίδα της Μεσογειακής Διατροφής, αφού μαζί με τα δημητριακά, το ρύζι και το ψωμί κατατάσσονται στο πρώτο και σημαντικότερο σκαλοπάτι της. Αποτελούν ένα από τα πλέον διαδεδομένα και αγαπημένα βασικά τρόφιμα, κυρίως λόγω της θρεπτικής τους αξίας, της ευκολίας παρασκευής και της ευελιξίας στη

χρήση τους (Giacco et.al.,2016).Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι η κατανάλωση ζυμαρικών παγκοσμίως αυξάνεται συνεχώς ενώ σύμφωνα με τα τελευταία δημοσιοποιημένα στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Ζυμαρικών, η παγκόσμια παραγωγή τους το 2022 ανήλθε στα 16,9 εκατ. Τόνους(International Pasta Organization [IPO], 2022),με την Ιταλία να κατέχει την πρώτη θέση στην παραγωγή, ακολουθούμενη από τις Ηνωμένες Πολιτείες, τη Βραζιλία, την Τουρκία και τη Ρωσία. Συγκεκριμένα, οι Ιταλοί διατηρούν την κορυφαία θέση στην κατανάλωση ζυμαρικών, με μέση ετήσια κατανάλωση 23,1 κιλών ανά άτομο, ενώ ακολουθούν οι Τυνήσιοι με 17 κιλά, οι Βενεζουελανοί με 13,6 κιλά και οι Έλληνες με 12,2 κιλά ανά άτομο (International Pasta Organization [IPO], 2022).

Η παγκόσμια αγορά ζυμαρικών βρίσκεται σε διαρκή ανάπτυξη, με προβλέψεις από τον οργανισμό MordorIntelligence να κάνουν λόγο για ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξης του 4,11% τα επόμενα πέντε χρόνια (Mordor Intelligence, 2023). Η οικονομικά προσιτή τιμή των ζυμαρικών τα καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικά για τον μέσο Έλληνα καταναλωτή. Σύμφωνα με στοιχεία της ΕΛΣΤΑΤ για το πρώτο τρίμηνο του 2023, η μέση μηνιαία κατανάλωση ζυμαρικών ανά νοικοκυριό ανέρχεται στα 2,5 κιλά (Ελληνική Στατιστική Αρχή, 2023).

Η Παγκόσμια Ημέρα Ζυμαρικών, που τιμάται κάθε χρόνο στις 25 Οκτωβρίου, καθιερώθηκε το 1998 στη Νάπολη, με πρωτοβουλία της Ένωσης Ευρωπαίων Βιομηχάνων Ζυμαρικών (UnionofOrganizationsofmanufacturersofPastaProducts-UNAFPA). Σκοπός της ήταν η ανάδειξη των διατροφικών πλεονεκτημάτων των ζυμαρικών ως μέρος μιας ισορροπημένης διατροφής, καθώς και η ενίσχυση της κατανάλωσής τους σε διεθνές επίπεδο. Έκτοτε, η εκδήλωση πραγματοποιείται κάθε χρόνο, τόσο σε διάφορες ιταλικές πόλεις (όπως η Γένοβα, η Ρώμη, η Νάπολη και το Μιλάνο), όσο και διεθνώς (σε πόλεις όπως η Βαρκελώνη, το Μπουένος Άιρες, η Πόλη του Μεξικού, η Κωνσταντινούπολη, η Νέα Υόρκη, η Μόσχα, το Ρίο ντε Τζανέιρο, το Σάο Πάολο και το Ντουμπάι). Κατά τη διάρκεια αυτών των 25 ετών, τα ζυμαρικά έχουν εξελιχθεί σημαντικά τόσο ως προς τα συστατικά όσο και ως προς τη μορφή τους, υιοθετώντας ποικίλες εκδοχές – από ζυμαρικά ολικής άλεσης και ειδικές παρασκευές μέχρι επιλογές χωρίς γλουτένη – προσαρμοσμένες στις σύγχρονες διατροφικές ανάγκες και συνήθειες (InternationalPastaOrganization [IPO], 2022).

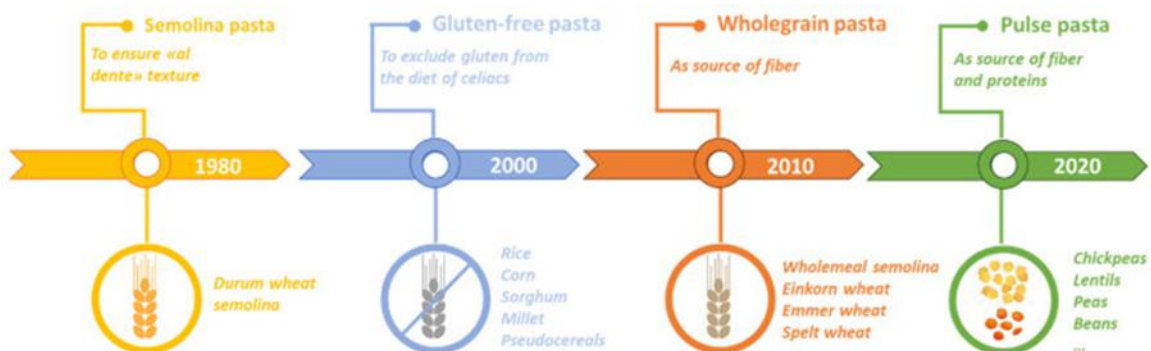
Επιπλέον, ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (the World Health Organization-WHO) και ο Οργανισμός Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (the Food and Agriculture Organization of the United Nations-FAO) έχουν αναγνωρίσει τα ζυμαρικά ως μέρος ενός υγιεινού, βιώσιμου και υψηλής ποιότητας διατροφικού μοντέλου ενώ το 2010, η UNESCO τα ενέταξε στην Άυλη Πολιτιστική Κληρονομιά της Ανθρωπότητας (Giannetti et al, 2021). Η επιτυχία των ζυμαρικών οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο ευνοϊκό διατροφικό τους προφίλ. Στο μεγαλύτερο βαθμό τους, αποτελούνται από υδατάνθρακες (74- 77%) και πιο συγκεκριμένα άμυλο. Έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες (13%) και λιπίδια (1,7%) και επίσης περιέχουν βιταμίνες όπως εκείνες του συμπλέγματος Β και ορισμένα μεταλλικά στοιχεία (κυρίως σιδήρου Fe, μαγνησίου Mg, μαγγανίου Mn, φωσφόρου P και ψευδαργύρου Zn) (Arribas et al., 2020). Παράλληλα, τα ζυμαρικά μπορούν να ενισχυθούν με ευεργετικά συστατικά, όπως διαιτητικές ίνες και πρεβιοτικά, ενισχύοντας περαιτέρω την υγιεινή τους αξία (Angelino et al, 2019).

Η προσιτή τιμή και η μεγάλη διάρκεια ζωής τους τα καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικά σε ευρύ φάσμα καταναλωτών (Oliviero&Fogliano, 2016). Ιδιαίτερως, τα αποξηραμένα ζυμαρικά διατηρούνται για μεγάλα χρονικά διαστήματα — έως και τρία έτη — χάρη στη χαμηλή περιεκτικότητά τους σε υγρασία (συνήθως κάτω από 12,5%) και είναι ευέλικτα ώστε να προσαρμόζονται σε διαφορετικές γευστικές και πολιτισμικές παραδόσεις (Bresciani et. al, 2022). Όταν συνοδεύονται από σάλτσες βασισμένες σε λαχανικά, κρέας ή ψάρι, τα ζυμαρικά μετατρέπονται σε ένα πλήρες και ισορροπημένο διατροφικά πιάτο, με σχετικά χαμηλό γλυκαιμικό δείκτη (Chiavaroliet. al., 2018). Αυτό το χαρακτηριστικό σχετίζεται με τη βιομηχανική επεξεργασία τους, η οποία δημιουργεί μια συμπαγή δομή στο τελικό προϊόν, καθιστώντας τους υδατάνθρακες πιο αργά διαθέσιμους στην πέψη (Granfeldt&Björck, 1991,Petitot et al., 2009).

Σύμφωνα με την ιταλική νομοθεσία, τα αποξηραμένα ζυμαρικά πρέπει να παράγονται αποκλειστικά από νερό και σκληρό σιτάρι (*Triticum durum* Desf.), δηλαδή σιμιγδάλι ή σιμιγδάλι ολικής άλεσης . Αντίθετα, σε άλλες χώρες, εκτός της Γαλλίας και της Ελλάδας, χρησιμοποιείται και μαλακό σιτάρι (*Triticum aestivum* L.) για την παραγωγή ζυμαρικών, διότι έχει χαμηλότερο κόστος κατά περίπου 20-25% σε σχέση με το σκληρό, καθιστώντας το μια ελκυστική επιλογή για την παγκόσμια παραγωγή (Hongetal, 2017). Παρόλα αυτά, το σκληρό σιτάρι θεωρείται ανώτερο ως πρώτη ύλη, καθώς διασφαλίζει καλύτερες ρεολογικές ιδιότητες στη ζύμη, βελτιωμένη ποιότητα μαγειρέματος και υψηλότερη

αποδοχή από τους καταναλωτές (Sissons, 2008). Το σιμιγδάλι, εντούτοις, θα πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές του Ελληνικού Κώδικα Τροφίμων και Ποτών, και των κανονισμών και οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τα βαρέα μέταλλα (κάδμιο, μόλυβδος), υπολείμματα φυτοφαρμάκων και μυκοτοξίνες. Περιέχει αλλεργιόγονο συστατικό, τη γλουτένη ενώ δεν επιτρέπεται η χρήση σιμιγδαλιού που προέρχεται από Γενετικά Τροποποιημένα (Μεταλλαγμένα) Σιτάρια (Pagani, 2017).

Οι περισσότερες έρευνες εστιάζουν στη διαφοροποίηση της σύστασης των ζυμαρικών, με την ενσωμάτωση αλεύρων από άλλα δημητριακά πέραν του σκληρού σιταριού (ή των κλασμάτων του), καθώς και άλλων συστατικών, όπως τα λαχανικά, με στόχο την ενίσχυση της διατροφικής τους αξίας (Oliviero & Fogliano, 2016, Melini et al., 2020). Η αυξανόμενη προτίμηση των καταναλωτών προς ζυμαρικά διαφορετικών τύπων αντικατοπτρίζει τη μεταβαλλόμενη κατεύθυνση της αγοράς (Εικόνα 1), καθώς αναζητούν προϊόντα που προσφέρουν συγκεκριμένα διατροφικά οφέλη, τα οποία συνδέονται με τις εναλλακτικές πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή.



Εικόνα 1: Η Εξέλιξη της Σύστασης των Ζυμαρικών: Σύγχρονες Πρώτες Ύλες και Διατροφικά Οφέλη: Η παραπάνω εικόνα αναδεικνύει την εξέλιξη των ζυμαρικών τις τελευταίες δεκαετίες: από το παραδοσιακό σιμιγδάλι σκληρού σίτου (1980), στα ζυμαρικά χωρίς γλουτένη (2000), στα ζυμαρικά ολικής άλεσης ως πηγή φυτικών ινών (2010) και τέλος στα ζυμαρικά από όσπρια (2020) με στόχο τον εμπλουτισμό σε φυτικές πρωτεΐνες. Η πορεία αυτή αντανακλά την προσαρμογή της τεχνολογίας τροφίμων στις μεταβαλλόμενες διατροφικές ανάγκες και τάσεις (Bresciani et al., 2022).

Οι καταναλωτές εκτιμούν ιδιαίτερα τη γεύση και την απόδοση στο μαγείρεμα των ζυμαρικών από σιμιγδάλι (Prabhasankar et al., 2009), αλλά και τα οφέλη για την υγεία που προσφέρουν τα προϊόντα εμπλουτισμένα με φυτικές ίνες (Laureati et al., 2016). Ωστόσο, σπάνια γνωρίζουν τις τεχνολογικές προκλήσεις που σχετίζονται με την παραγωγή αυτών

των ειδών, καθώς και την απαιτούμενη εξειδίκευση και καινοτομία στον τομέα της επεξεργασίας. Αρκεί μία αλλαγή σε έναν μόνο παράγοντα –όπως ο τύπος της πρώτης ύλης (π.χ. καθαρισμένο σιτάρι έναντι ολικής άλεσης)– για να επηρεαστεί σημαντικά η παραγωγική διαδικασία και η ποιότητα του τελικού προϊόντος (Bresciani et.al, 2022). Υπό αυτό το πρίσμα, κρίνεται απαραίτητη η κατανόηση των κρίσιμων παραμέτρων της παραγωγής που επηρεάζονται από την εισαγωγή νέων πρώτων υλών, προκειμένου να διασφαλιστεί η παραγωγή ζυμαρικών υψηλής ποιότητας.

2.1 Χημική σύσταση και στάδια παραγωγής ζυμαρικών

2.1.1 Χημική σύνθεση του σκληρού σιταριού

Η ποιοτική και ποσοτική σύσταση του σιμιγδαλιού που προέρχεται από σκληρό σιτάρι παίζει καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό των τεχνολογικών και οργανοληπτικών ιδιοτήτων των ζυμαρικών, τόσο στην αποξηραμένη όσο και στη μαγειρεμένη τους μορφή. Τα κυριότερα συστατικά που συμβάλλουν στη διαμόρφωση της ποιότητας είναι το άμυλο, οι πρωτεΐνες, τα λιπίδια, οι πεντοζάνες και η δράση ενζύμων.

2.1.1.1 Άμυλο

Το άμυλο αποτελεί το κύριο συστατικό του σκληρού σιταριού, με περιεκτικότητα που κυμαίνεται από 74 έως 90 γραμμάρια ανά 100 γραμμάρια ξηρής ουσίας. Σε αντίθεση με τα περισσότερα φυτικά άμυλα, τα οποία εμφανίζουν κόκκους ομοιόμορφου μεγέθους, το άμυλο του σιταριού χαρακτηρίζεται από διτροπική κατανομή κόκκων. Οι μεγαλύτεροι κόκκοι (τύπου Α) είναι φακοειδούς μορφής, με διάμετρο 25–40 μm , ενώ οι μικρότεροι (τύπου Β) είναι σφαιρικοί, με διάμετρο 5–10 μm (Seidemann, 1966).

Αν και οι κόκκοι τύπου Β καταλαμβάνουν μόνο περίπου 25–30% του συνολικού όγκου του αμύλου, αποτελούν περίπου το 90% του συνολικού αριθμού των κόκκων (D'Appolonia & Gilles, 1971). Το άμυλο αποτελείται από δύο κύριες πολυσακχαριδικές συνιστώσες: την

αμυλόζη (~25%) και την αμυλοπηκτίνη (~75%). Η αμυλόζη είναι γραμμικό πολυμερές, αποτελούμενο κυρίως από μονάδες α-1,4-D-γλυκοπυρανόζης, ενώ η αμυλοπηκτίνη είναι διακλαδισμένη και περιλαμβάνει επιπλέον δεσμούς α-1,6, συμβάλλοντας στην ιδιαίτερη φυσικοχημική συμπεριφορά του αμύλου κατά την επεξεργασία και τη θερμική μεταχείριση.

2.1.1.2 Πρωτεΐνες

Οι πρωτεΐνες αποτελούν περίπου το 10–15% του ξηρού βάρους του σκληρού σιταριού και είναι καθοριστικές για την ποιότητα της ζύμης και των ζυμαρικών. Οι βασικές πρωτεϊνικές ομάδες είναι η γλοιαδίνη και η γλουτενίνη, οι οποίες κατά την ανάμειξη με νερό σχηματίζουν τη γλουτένη (Osborne, 1907). Η γλουτένη είναι υπεύθυνη για την ελαστικότητα, τη συνεκτικότητα και την ικανότητα συγκράτησης του σχήματος στα προϊόντα ζύμης. Η ποσοτική και ποιοτική σύνθεση των πρωτεϊνών (ιδίως η σχέση γλοιαδίνης/γλουτενίνης) επηρεάζει τη ρεολογική συμπεριφορά της ζύμης, τη μηχανική αντοχή των ζυμαρικών και την ανθεκτικότητά τους στο μαγείρεμα (DelNobile et. al, 2005).

Οι ρεολογικές ιδιότητες της γλουτένης καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη γλουτενίνη, η οποία αποτελεί πολυμερική πρωτεΐνη και αντιστοιχεί περίπου στο 50% της συνολικής μάζας της γλουτένης. Τα πολυμερή της γλουτενίνης εμφανίζουν ευρεία κατανομή μοριακών μεγεθών, φτάνοντας μέχρι και 10^7 Da, χαρακτηριστικό που την καθιστά ένα από τα μεγαλύτερα φυσικά πρωτεϊνικά συστήματα (Shewry et al., 1992).

Η δομή της γλουτενίνης δεν βασίζεται σε μεμονωμένες πεπτιδικές αλυσίδες, αλλά σε συγκροτήματα που αποτελούνται από 2 έως 20 μικρότερες υπομονάδες, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους μέσω διαμοριακών δισουλφιδικών (S–S) δεσμών. Οι δεσμοί αυτοί διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη σταθεροποίηση της τριτοταγούς δομής της πρωτεΐνης. Ο κεντρικός τομέας των πολυπεπτιδικών αλυσίδων της γλουτενίνης περιλαμβάνει επαναλαμβανόμενες αλληλουχίες, πλούσιες σε αμινοξέα όπως η γλουταμίνη, η προλίνη και η γλυκίνη, τα οποία συμβάλλουν στη μοναδική ελαστικότητα του γλουτενικού πλέγματος (Del Nobile et. al, 2005).

Επιπλέον, η ελικοειδής δομή που έχει προταθεί για τη γλουτενίνη ενισχύεται μέσω εκτεταμένων δεσμών υδρογόνου, οι οποίοι σχηματίζονται μεταξύ των πλευρικών ομάδων των μορίων γλουταμίνης. Η υψηλή περιεκτικότητα της γλουτενίνης σε γλουταμίνη αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα που διαφοροποιεί τις αποθηκευτικές πρωτεΐνες του σιταριού

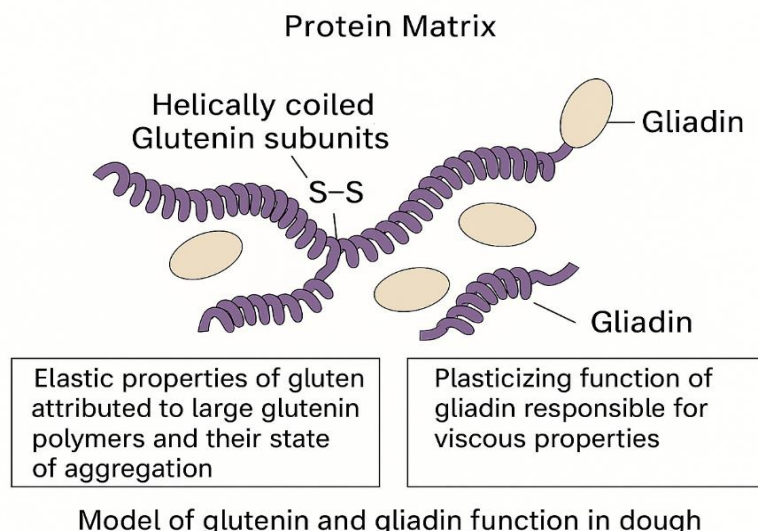
από αντίστοιχες πρωτεΐνες άλλων δημητριακών (Kasarda et al., 1994, Kim & Bushuk, 1995, Stevenson & Preston, 1996).

Σε αντίθεση με τη γλουτενίνη, η γλιαδίνη αποτελεί ένα πολύπλοκο μίγμα μονοαλυσιδικών, υδρόφοβων πολυπεπτιδίων μεσαίου μοριακού βάρους (περίπου 30.000–50.000 Da). Τα πολυπεπτίδια αυτά σταθεροποιούνται μέσω ενδομοριακών δισουλφιδικών (S–S) δεσμών, οι οποίοι συμβάλλουν στη διατήρηση της τριτοταγούς δομής τους (Wrigley & Békés, 1999).

Η γλιαδίνη δεν σχηματίζει πολυμερή μέσω διαμοριακών δεσμών, όπως η γλουτενίνη, αλλά προσδίδει στο σύστημα της γλουτένης χαρακτηριστικά ιξώδους και πλαστικότητας. Η συνεισφορά της στο τελικό ρεολογικό προφίλ της ζύμης είναι κρίσιμη, καθώς καθορίζει την πιο γρήγορη «ανάπτυξη» της ζύμης κατά την διάρκεια του ζυμώματος και την ευκαμψία της, λειτουργώντας συμπληρωματικά προς την ελαστικότητα που παρέχεται από τη γλουτενίνη.

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2, η γλουτενίνη και η γλιαδίνη συνεργάζονται δομικά και λειτουργικά για να διαμορφώσουν τη χαρακτηριστική ιξωδοελαστική συμπεριφορά της ζύμης σίτου. Η γλουτενίνη δημιουργεί ένα πρωτεϊνικό «πλέγμα» στη ζύμη, αποτελούμενο από αλυσίδες που ενώνονται μεταξύ τους με ισχυρούς δεσμούς (δισουλφιδικούς). Αυτό το πλέγμα δίνει στη ζύμη την ελαστικότητα και τη σταθερότητά της. Αντίθετα, η γλιαδίνη, ως μονομερές συστατικό, δρα ως πλαστικοποιητής, συνεισφέροντας στις ιξώδεις ιδιότητες της ζύμης και βελτιώνοντας την «ανάπτυξη» της (Wrigley, 1996).

Η συνέργεια αυτών των δύο κατηγοριών πρωτεϊνών αποτελεί τη βάση για τη ρεολογική συμπεριφορά της γλουτένης, καθιστώντας την απαραίτητη για την παραγωγή ζυμαρικών, ψωμιού και άλλων προϊόντων με βάση το σιτάρι. Επιπλέον, στη δομή της γλουτένης συνδέονται και άλλα συστατικά, όπως λιπίδια (~8%) και υδατάνθρακες (~2%), τα οποία επηρεάζουν περαιτέρω τη λειτουργικότητά της (Belitz & Grosch, 1992).



Εικόνα 2: Λειτουργική Συνεργασία Γλουτενίνης και Γλιαδίνης στη Ζύμη: Οι γλουτενίνες συμβάλλουν στην ελαστικότητα μέσω δισουλφιδικών δεσμών, ενώ οι γλιαδίνες προσδίδουν ιξώδεις ιδιότητες, καθορίζοντας από κοινού τη ρεολογία της ζύμης (Wrigley, 1996).

2.1.1.3 Λιπίδια

Τα λιπίδια αποτελούν μικρό ποσοστό του σκληρού σιταριού (1,5–2,5%), αλλά διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργικότητα και τη σταθερότητα του αλεύρου. Η ενδογενής περιεκτικότητα σε λιπίδια του σιμιγδαλιού και των ζυμαρικών κυμαίνεται μεταξύ 1 και 2 g ανά 100 g ξηρής βάσης, σύμφωνα με τον Laignelet (1983). Τα λιπίδια του σίτου περιλαμβάνουν φωσfolιπίδια, λιπαρά οξέα και τριγλυκερίδια. Συμβάλλουν στη διατήρηση της δομής της γλουτένης, στη βελτίωση της ελαστικότητας της ζύμης και επηρεάζουν τις οργανοληπτικές ιδιότητες των ζυμαρικών. Επιπλέον, τα λιπίδια μπορούν να δράσουν ως φυσικοί γαλακτωματοποιητές, ενισχύοντας τη σταθερότητα του δικτύου πρωτεΐνης–αμύλου και επηρεάζοντας τη συνολική υφή του τελικού προϊόντος.

2.1.1.4 Πεντοζάνες

Οι πεντοζάνες, επίσης γνωστές ως αραβινοξυλάνες, είναι μη αμυλούχοι πολυσακχαρίτες που περιέχουν πεντόζες όπως η ξυλόζη και η αραβινόζη. Αν και αποτελούν μικρό ποσοστό (~2–3%), επηρεάζουν σημαντικά την απορρόφηση νερού, το ιξώδες της ζύμης και την συνεκτικότητα του μείγματος (D'Appolonia & Kim 1976). Υπάρχουν διαλυτές και αδιάλυτες μορφές πεντοζανών. Οι διαλυτές μορφές αυξάνουν το ιξώδες του συστήματος, ενώ οι αδιάλυτες μπορούν να περιορίσουν την ανάπτυξη της γλουτένης, επηρεάζοντας την ελαστικότητα και τη σταθερότητα της ζύμης. Επίσης, παίζουν ρόλο στον γλυκαιμικό δείκτη και στις διατροφικές ιδιότητες των ζυμαρικών.

2.1.1.5 Ένζυμα

Τα ένζυμα στο σιτάρι περιλαμβάνουν αμυλάσες, πρωτεάσες, λιπάσες και οξειδοαναγωγικά ένζυμα. Αν και υπάρχουν σε μικρές ποσότητες, η δράση τους είναι κρίσιμη κατά την αποθήκευση, την ανάμειξη και την επεξεργασία της ζύμης. Οι αμυλάσες διασπούν το άμυλο σε σάκχαρα, τα οποία επηρεάζουν τη γεύση και το χρώμα του προϊόντος κατά την ξήρανση ή το μαγείρεμα. Οι πρωτεάσες, όταν είναι υπερδραστικές (π.χ. λόγω προσβολής από έντομα), μπορούν να αποδομήσουν τη γλουτένη και να μειώσουν τη σταθερότητα της ζύμης (Coultrate, 2009). Τα οξειδωτικά ένζυμα (όπως οι υπεροξειδάσες) επηρεάζουν τη δομή των πρωτεϊνών μέσω σχηματισμού δισουλφιδικών δεσμών.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα βασικά συστατικά του σκληρού σιταριού, τις ποσοτικές ενδείξεις και τον ρόλο τους στην τεχνολογία ζυμαρικών.

Πίνακας 1: Κύρια συστατικά του σκληρού σιταριού και ο ρόλος τους στην ποιότητα ζυμαρικών (Coultrate, 2009).

Συστατικό	Περιεκτικότητα (% κ.β.)	Μορφολογικά/Χημικά Χαρακτηριστικά	Τεχνολογικός Ρόλος
Άμυλο	74–90%	Τύπος Α (25–40 μm), Τύπος Β (5–10 μm); αμυλόζη (~25%), αμυλοπηκτίνη (~75%)	Καθορίζει την υφή, τη δομή και τη συμπεριφορά στο μαγείρεμα
Πρωτεΐνες	10–15%	Γλοιαδίνη (ιξώδες), γλουτενίνη (ελαστικότητα), σχηματισμός γλουτένης	Υπεύθυνες για την ελαστικότητα, συνοχή και ποιότητα ζύμης
Λιπίδια	1,5–2,5%	Φωσφολιπίδια, τριγλυκερίδια, λιπαρά οξέα	Σταθεροποιούν το δίκτυο γλουτένης, επηρεάζουν την υφή
Πεντοζάνες	~2–3%	Διαλυτές/αδιάλυτες αραβινοξυλάνες	Ρυθμίζουν απορρόφηση νερού και ιξώδες
Ένζυμα	Ιχνοποσότητες	Αμυλάσες, πρωτεάσες, λιπάσες, οξειδοαναγωγικά ένζυμα	Επηρεάζουν ρεολογία, αποικοδόμηση γλουτένης, γήρανση

2.2 Στάδια παραγωγής ζυμαρικών

Η παρασκευή ζυμαρικών ξεκίνησε με την άλεση διαφόρων δημητριακών και σιτηρών, τα οποία αναμειγνύονταν με νερό και στη συνέχεια μαγειρεύονταν (Owens, 2001). Στη σύγχρονη βιομηχανική παραγωγή, ως βασική πρώτη ύλη χρησιμοποιείται το σκληρό σιτάρι (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*), το οποίο καλλιεργείται αποκλειστικά για τη δημιουργία ζυμαρικών. Σε σύγκριση με το κοινό σιτάρι (*Triticum aestivum* L.), που χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή αρτοσκευασμάτων και ασιατικών ζυμαρικών τύπου noodles, το σκληρό σιτάρι εμφανίζει αυξημένη σκληρότητα και κατά την άλεση αποδίδει σιμιγδάλι – έναν χονδρόκοκκο και χρυσοκίτρινο τύπο αλευριού, κατάλληλο για

την παραγωγή ζυμαρικών. Το σιμιγδάλι είναι επίσης το βασικό συστατικό στην παραγωγή κους κους, όταν αναμειγνύεται και μαγειρεύεται με νερό. Η υψηλή περιεκτικότητα του σκληρού σιταριού σε πρωτεΐνες και η συμπαγής δομή του σιμιγδαλιού εξασφαλίζουν την επιθυμητή υφή, τη γευστική σταθερότητα και την ανθεκτικότητα των ζυμαρικών κατά τη θερμική επεξεργασία (Webb, 2019).

Πριν την άλεση σκληρού σιταριού επιλεγμένης ποιότητας, ορισμένοι κόκκοι απομακρύνονται λόγω διαφορετικού χρώματος, ώστε το ζυμαρικό να έχει ομοιόμορφο χρώμα. Κατά την είσοδο στο μύλο, το πύτουρο και το φύτρο αφαιρούνται, ενώ το ενδοσπέρμιο διασπάται σε μεγαλύτερα σωματίδια. Μέσω κοσκινίσματος, αυτά τα σωματίδια διαχωρίζονται από τα υπολείμματα πύτουρου και αλέθονται ώστε να παραχθεί σιμιγδάλι με συγκεκριμένο μέγεθος και ομοιογενή ποιότητα. Το σιμιγδάλι αναμειγνύεται με νερό για να σχηματίσει ζύμη, η οποία ζυμώνεται έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή συνεκτικότητα. Η ζύμη που προκύπτει εξωθείται είτε μέσω πλαστικοποιητή για επίπεδα σχήματα (π.χ. λαζάνια), είτε μέσω καλουπιών για την απόκτηση άλλων σχημάτων. Η εξώθηση διαμορφώνει μία σφιχτή πρωτεϊνική δομή γύρω από τα μόρια αμύλου, προσδίδοντας στο τελικό προϊόν την επιθυμητή υφή και ελαστικότητα (Webb, 2019).

Το σιμιγδάλι από σκληρό σιτάρι θεωρείται η καταλληλότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή ζυμαρικών υψηλής ποιότητας, καθώς όπως προειπώθηκε διαθέτει υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες και ισχυρή γλουτένη. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν στο τελικό προϊόν να αντέχει τις μηχανικές καταπονήσεις που προκύπτουν κατά την εξώθηση, την αποξήρανση και το μαγείρεμα (Sissons, 2008). Τα σκληρά σιτάρια έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε γλουτένη από τα μαλακά. Αυτή πρέπει να είναι υποκίτρινη, σκληρή και συνεκτική για αυτό αποφεύγεται το παρατεταμένο ζύμωμα το οποίο την μαλακώνει. Η ποσότητα σε υγρή γλουτένη, κυμαίνεται από 25-30% κ.β. και αντιστοιχεί από 9-11% κ.β. σε ξηρή γλουτένη (Miskelly, 2017).

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει συνοπτικά τον σκοπό κάθε σταδίου της παραγωγής ζυμαρικών, καθώς και τις ενδογενείς και εξωγενείς παραμέτρους που επηρεάζουν τη ζύμη και/ή το τελικό προϊόν.

Πίνακας 2 : Παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα της ζύμης/ζυμαρικών (Bresciani et.al, 2022).

Operation	Aim	Intrinsic Parameters Affecting the Dough/Pasta	Extrinsic Parameters Affecting the Dough/Pasta
Dosing, mixing and kneading	- To dose in the right proportions both semolina and water (25–27 parts of water/100 parts of semolina) - To hydrate starch and proteins	- Semolina particle size - Semolina protein, ash, fiber, damaged starch content - Enzyme activities - Water temperature and residue	- Presence of a pre-mixer - Vacuum degree
Kneading and shaping by extrusion	- To (partially) form gluten networks - To knead and give a shape to the dough	- Gluten tenacity - Dough humidity - Dough temperature - Dough viscosity	- Mixture feeding into the extruder - Geometrical characteristics of the screw (length, design, etc.) - Extrusion conditions (specific mechanical energy, screw speed, heat regulation system, etc.) - Shape of the extruded product - Die material - Open surface of the die (number and position of the inserts)
Drying	- To remove water - To assure shape integrity - To maintain nutritional quality	- Gluten tenacity - Starch pasting properties	- Air temperature - Air relative humidity - Drying time

Παρ' όλα αυτά, η χρήση ποιοτικού σιμιγδαλιού δεν επαρκεί για την εξασφάλιση καλής ποιότητας ζυμαρικών, εάν κάθε στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας δεν εκτελείται σωστά. Μέχρι σήμερα, η συμβολή κάθε επιμέρους σταδίου της διαδικασίας παραγωγής

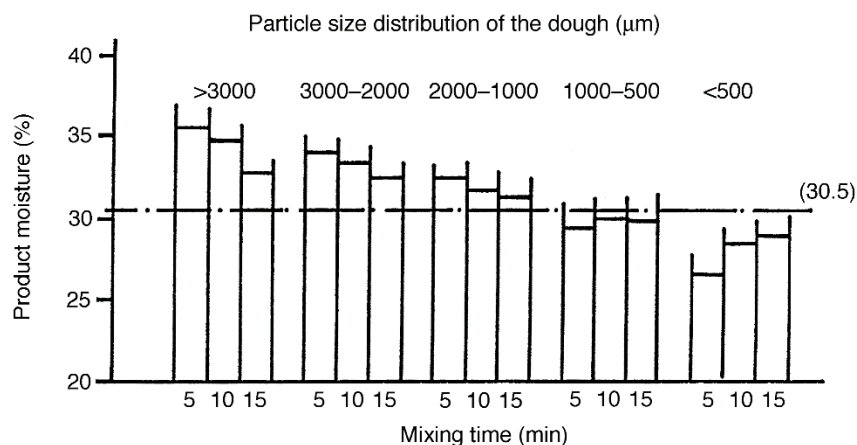
ζυμαρικών έχει μελετηθεί κυρίως σε σχέση με την επίδρασή του στη δομή και τη συνολική ποιότητα του τελικού προϊόντος (Petitot et.al, 2009, DeNoni & Pagani, 2010, Sicignano et al., 2015, Murray et.al, 2017). Αντιθέτως, οι επιπτώσεις που έχουν συγκεκριμένες μεταβλητές της διεργασίας —όπως το επίπεδο ενυδάτωσης, οι συνθήκες πίεσης, θερμοκρασίας και η μηχανική ενέργεια κατά την εξώθηση— δεν έχουν διερευνηθεί σε βάθος. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, οι επόμενες υποενότητες θα εστιάσουν στην ανάλυση του ρόλου των βασικών μεταβλητών που περιλαμβάνονται σε κάθε στάδιο και της επίδρασής τους στην ποιότητα των παραγόμενων ζυμαρικών.

2.2.1 Από τη Δοσομέτρηση στην Ανάμειξη

Κατά το αρχικό στάδιο της παραγωγής ζυμαρικών, το σιμιγδάλι και το νερό αναμειγνύονται με ακρίβεια ώστε να επιτευχθεί ένα μείγμα με περιεκτικότητα σε υγρασία περίπου 30–32%. Η προσθήκη νερού σε ποσοστό 27–29% διαφέρει σημαντικά από εκείνη της αρτοποιαστικής (45–50%), καθώς η ενυδάτωση εδώ αποσκοπεί κυρίως στη σωστή διάλυση των πρωτεϊνών, χωρίς πλήρη ανάπτυξη της γλουτένης. Η μερική ενυδάτωση των πρωτεϊνών είναι κρίσιμη, καθώς οδηγεί σε σχηματισμό συνεκτικού δικτύου γλουτένης στα επόμενα στάδια, το οποίο συμβάλλει στον έλεγχο της διόγκωσης του αμύλου κατά το μαγείρεμα (Bresciani et.al, 2022).

Πέρα από την ποσότητα του νερού, αρκετοί παράγοντες επηρεάζουν την ενυδάτωση του σιμιγδαλιού και, κατ' επέκταση, τα φυσικά χαρακτηριστικά και την ποιότητα των ζυμαρικών. Ανάμεσα σε αυτούς περιλαμβάνονται, εκτός από την περιεκτικότητα του σιμιγδαλιού σε πρωτεΐνη, την περιεκτικότητα σε τέφρα, φυτικές ίνες, κατεστραμμένο άμυλο και το μέγεθος των σωματιδίων (Πίνακας 2). Σιμιγδάλι με χαμηλά επίπεδα τέφρας και κατεστραμμένου αμύλου οδηγεί στην παραγωγή ζυμαρικών με κεχριμπαρένιο-κίτρινο χρώμα, μειωμένα στίγματα από πίτουρο και μικρότερη θερμική καταπόνηση (DeNoni&Pagani, 2010). Αυτά τα χαρακτηριστικά προκύπτουν από ήπια άλεση με χαμηλό ποσοστό απόδοσης (60–65%) και μεγάλη διάμετρο σωματιδίων (>400 μm), αν και τέτοιες επιλογές μπορεί να μειώσουν την παραγωγικότητα και την ταχύτητα ενυδάτωσης. Η ομοιόμορφη πρωτεϊνική δομή είναι ουσιώδης για ζυμαρικά υψηλής ποιότητας, τα οποία ξεχωρίζουν για τη σταθερότητα κατά το μαγείρεμα, την υψηλή σκληρότητα και την απουσία κολλώδους ή πλαδαρής υφής (Marti et.al, 2015).

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται ο χρόνος ανάμειξης σε συνάρτηση με την κατανομή της υγρασίας σε μια χαλαρή ζύμη, όπου τα συστατικά – σιμιγδάλι, πίδα και νερό – προστέθηκαν απευθείας στον κάδο ανάμειξης (Johnston, 2001).

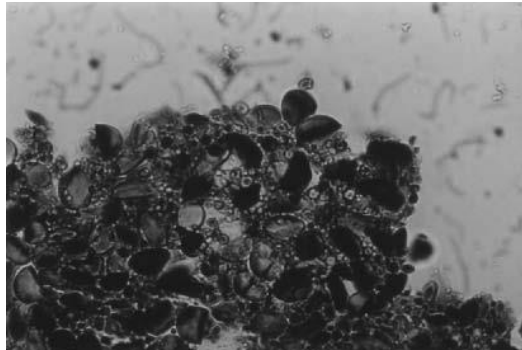


Εικόνα 3: Μέγεθος σωματιδίων και κατανομή υγρασίας στο μείγμα. Ο ρυθμιστής υγρασίας ζύμης είναι 30,5% H₂O. Η υγρασία της πρώτης ύλης είναι 13,5% H₂O. Η θερμοκρασία της πρώτης ύλης είναι 20°C. Η θερμοκρασία του νερού τροφοδοσίας είναι 40°C (Johnston, 2001).

Στην περίπτωση του σιμιγδαλιού ολικής άλεσης, έχει διαπιστωθεί ότι το μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων σχετίζεται με καλύτερη συμπεριφορά στο μαγείρεμα (δηλαδή αυξημένη σκληρότητα και μειωμένες απώλειες κατά το βράσιμο). Ωστόσο, όταν υπάρχει ευρεία κατανομή στο μέγεθος των σωματιδίων, παρατηρείται επιδείνωση της ποιότητας μαγειρέματος. Όσον αφορά μίγματα σιμιγδαλιού με πίδα, προτιμάται η χρήση πίδα με λεπτή κοκκομετρία, καθώς προσφέρει στα ζυμαρικά μεγαλύτερη μηχανική αντοχή σε σχέση με αντίστοιχα μίγματα που περιέχουν χονδρόκοκκο πίδα (Deng & Manthey, 2017).

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η πρωτεϊνική δομή των συσσωματωμάτων ζύμης που σχηματίζονται στον αναμικτήρα υψηλής ταχύτητας μετά από 10 δευτερόλεπτα. Η δημιουργία του πλαισίου γλουτένης είναι εμφανής, ενώ η λεπτότητα του υλικού παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο. Όσο περισσότερες πρωτεΐνες γλουτένης είναι διαθέσιμες για διαβροχή, τόσο ταχύτερη είναι η διόγκωση λόγω απορρόφησης νερού, γεγονός που ενισχύει την ανάπτυξη και την αντοχή της ζύμης. Επομένως, πρώτες ύλες με υψηλή

περιεκτικότητα σε γλουτένη προσφέρουν σημαντικό πλεονέκτημα στη διαδικασία προετοιμασίας, επιπλέον του μικρού μεγέθους σωματιδίων(Johnston, 2001).



Εικόνα 4:Πρωτεϊνική δομή συσσωματωμάτων ζύμης μετά από 10΄ ανάμιξης· σαφής ανάπτυξη πλαισίου γλουτένης, με τη διαβροχή και τη διόγκωση να ενισχύουν την αντοχή της ζύμης (Johnston, 2001).

2.2.2Ο ρόλος της ενυδάτωσης στη διαμόρφωση της δομής και της τελικής ποιότητας των ζυμαρικών

Η σωστή ποσότητα νερού και η ομοιογενής κατανομή του στο σιμιγδάλι αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την επιτυχία της εξώθησης και την τελική ποιότητα των ζυμαρικών. Τυχόν σφάλματα στο αρχικό αυτό στάδιο είναι δύσκολο να διορθωθούν μεταγενέστερα. Ανεπαρκής ή ανομοιόμορφη ενυδάτωση, συχνά λόγω μικρής ποσότητας νερού, μπορεί να οδηγήσει σε εμφάνιση λευκών κηλίδων στο τελικό προϊόν, οι οποίες υποδηλώνουν αδύναμη δομή και χαμηλή αισθητική και γευστική ποιότητα. Αντίθετα, υπερβολική ενυδάτωση προκαλεί κολλώδη υφή, μειωμένη μηχανική σταθερότητα και υποβαθμισμένη συμπεριφορά κατά το μαγείρεμα (Debbouz & Doetkott, 1996).

Οι DelaPeña και Manthey(2017) μελέτησαν την επίδραση διαφορετικών επιπέδων ενυδάτωσης (30–34%) στις ιδιότητες εξώθησης καθαρού και ολικής άλεσης σιμιγδαλιού, είτε μόνο του είτε σε συνδυασμό με αλεύρι λιναρόσπορου, καθώς και στη συμπεριφορά μαγειρέματος των αντίστοιχων ζυμαρικών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας, παρατηρήθηκε ότι τόσο η Ειδική Μηχανική Ενέργεια (Specific Mechanic Energy-SME) όσο και η πίεση εξώθησης μειώνονται με την αύξηση της ενυδάτωσης. Αναφορικά με την πίεση εξώθησης, η σύσταση της ζύμης φαίνεται να παίζει καθοριστικό ρόλο: η ζύμη με καθαρισμένο σιμιγδάλι παρουσίασε μικρότερη μείωση της πίεσης συγκριτικά με τη ζύμη

ολικής άλεσης. Η αυξημένη περιεκτικότητα σε νερό δρα πλαστικοποιητικά, διευκολύνοντας τη ροή του μείγματος στον εξωθητήρα και μειώνοντας τις απαιτήσεις σε ενέργεια και πίεση. Εντοπίστηκε επίσης συσχέτιση μεταξύ του ιξώδους της ζύμης (όπως μετρήθηκε με τριχοειδές ρεόμετρο) και των μεταβλητών της εξώθησης (De la Peña et. al, 2014). Η αυξημένη ενυδάτωση μείωσε το φαινομενικό ιξώδες χωρίς να επηρεάσει τον ρυθμό εξώθησης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε πως υψηλά επίπεδα ενυδάτωσης (32–34%) σχετίζονται με μειωμένη φωτεινότητα και αύξηση της κόκκινης χροιάς (a^*), ενώ ο δείκτης κίτρινου (b^*) παρέμεινε ανεπηρέαστος (De la Peña et.al, 2014).

Η αύξηση του επιπέδου ενυδάτωσης κατά την προετοιμασία της ζύμης οδηγεί σε μείωση τόσο της πίεσης εξώθησης όσο και της απαιτούμενης μηχανικής ενέργειας, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τα φυσικά χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων ζυμαρικών. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μείωση της διαμέτρου και της πυκνότητας των σπαγγέτι όσο αυξάνεται η ενυδάτωση (De la Peña et.al, 2014). Η ζύμη με 30% ενυδάτωση εμφανίζει αυξημένη συνοχή και υψηλή αντίσταση στη ροή, γεγονός που ενδέχεται να προκαλεί αυξημένη πίεση στις επενδύσεις Teflon των μήτρων εξώθησης. Αυτή η υψηλή πίεση πιθανόν οδηγεί σε διεύρυνση της διαμέτρου των παραγόμενων σπαγγέτι. Αντίθετα, οι ζύμες με υψηλότερη περιεκτικότητα σε νερό (34%) είναι λιγότερο συνεκτικές και ασκούν μειωμένη πίεση κατά την εξώθηση, παράγοντας λεπτότερα σπαγγέτι. Επιπλέον, το μεγαλύτερο βάρος των προϊόντων υψηλής ενυδάτωσης μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα μικρό τέντωμα κατά την ξήρανση, επιτείνοντας τη μείωση της διαμέτρου. Η μικρότερη διάμετρος σχετίζεται με χαμηλότερη σκληρότητα μετά το μαγείρεμα και αυξημένες απώλειες μαγειρέματος, ενδεχομένως λόγω της ταχύτερης διείσδυσης του νερού στον πυρήνα των ζυμαρικών. Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση της υφής του προϊόντος — πιο πορώδης ή συμπαγής — ως συνέπεια των διαφοροποιήσεων στην πίεση εξώθησης (De la Peña et.al, 2014).

2.2.3 Η Διαδικασία της ενυδάτωσης σε ζυμαρικά με εμπλουτισμένες ή εναλλακτικές συνθέσεις

Η διαδικασία της ενυδάτωσης καθίσταται ακόμη πιο κρίσιμη όταν η σύνθεση των ζυμαρικών περιλαμβάνει, πέραν του σκληρού σίτου, και άλλα δημητριακά ή πρόσθετα

συστατικά. Σε τέτοιες περιπτώσεις ανασύνθεσης της συνταγής, η προσεκτική μελέτη και προσαρμογή του επιπέδου ενυδάτωσης είναι απαραίτητη, καθώς επηρεάζει τόσο τα ρεολογικά χαρακτηριστικά της ζύμης κατά την εξώθηση όσο και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η προσθήκη ινών, λόγω της έντονης υδροφιλικής τους φύσης, δημιουργεί ανταγωνισμό με τις πρωτεΐνες για την πρόσληψη νερού, περιορίζοντας τη διαθεσιμότητά του για τη διαλυτοποίηση και την ανάπτυξη ενός ενιαίου και λειτουργικού δικτύου γλουτένης. Η υποβάθμιση της ποιότητας των ζυμαρικών παρουσία διαιτητικών ινών αποδίδεται τόσο στο φαινόμενο αραίωσης του πρωτεϊνικού πλέγματος — ως συνέπεια της μειωμένης περιεκτικότητας σε σιμιγδάλι — όσο και στη διατάραξη της συνοχής του δικτύου γλουτένης από μη αμυλούχους πολυσακχαρίτες (Manthey & Schorno, 2002).

Λαμβάνοντας υπόψη τη σύνθεση της ζύμης, παρατηρήθηκε ότι οι ζύμες από σιμιγδάλι ολικής αλέσεως παρουσιάζουν υψηλότερο ιξώδες συγκριτικά με εκείνες από σιμιγδάλι το οποίο δεν περιέχει πίτουρα, ακόμα και σε υψηλά επίπεδα ενυδάτωσης (34%). Αυτό αποδίδεται στα σωματίδια πίτουρου που περιέχει το αλεύρι ολικής άλεσης, τα οποία απαιτούν μεγαλύτερη ποσότητα νερού για να επιτευχθούν αντίστοιχες ρεολογικές ιδιότητες με αυτές του δείγματος αναφοράς (De la Peña et.al, 2014). Παρόμοια ευρήματα έχουν αναφερθεί και με την προσθήκη άλλων εμπλουτιστικών συστατικών, όπως αλεύρι λιναρόσπορου, πίτουρο φαγόπυρου και πίτουρο σκληρού σίτου (Yalla & Manthey, 2006). Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με τη μελέτη των De la Peña et al. (2014), τα επίπεδα ενυδάτωσης δεν θα πρέπει να υπερβαίνουν το 32% όταν χρησιμοποιείται σιμιγδάλι, σιμιγδάλι ολικής αλέσεως ή οι συνδυασμοί τους. Στις συνθέσεις που είναι πλούσιες σε λιπίδια, όπως το αλεύρι λιναρόσπορου, συνιστάται ακόμη χαμηλότερο επίπεδο, περίπου στο 30%. Τα λιπίδια φαίνεται να δρουν ως πλαστικοποιητές της ζύμης, μειώνοντας την τριβή μέσα στον εξωθητήρα, γεγονός που συνεπάγεται μείωση της πίεσης εξώθησης, της απαιτούμενης μηχανικής ενέργειας, αλλά και της ανάπτυξης μικροδομικών χημικών μεταβολών (De la Peña et al., 2014).

2.2.4 Καινοτόμες Τεχνολογίες Ενυδάτωσης στη Βιομηχανία Ζυμαρικών

Εφόσον η ενυδάτωση επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης, η επιλογή της κατάλληλης πρώτης ύλης είναι καθοριστικής σημασίας

για τη σωστή ενυδάτωση των πρωτεϊνών. Ιδανικά, προτιμώνται υλικά με χαμηλό ποσοστό απόδοσης, όπως το σιμιγδάλι που προέρχεται από το κεντρικό τμήμα του ενδοσπερμίου, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητάς του σε τέφρα και φυτικές ίνες. Εξίσου σημαντική είναι η ελαχιστοποίηση της δομικής αλλοίωσης του αμύλου, γεγονός που επιτυγχάνεται με τη χρήση σιμιγδαλιού μεσαίου έως μεγάλου μεγέθους σωματιδίων (Bresciani et.al, 2022). Στην πράξη, πολλοί παραγωγοί θεωρούν ότι κόκκοι σιμιγδαλιού με διάμετρο 250–450 μm εξασφαλίζουν πιο ομοιόμορφη ενυδάτωση. Παρ' όλα αυτά, πολύ μεγάλα σωματίδια (άνω των 450 μm), αν και μειώνουν τη βλάβη του αμύλου και είναι ιδιαίτερα δημοφιλή μεταξύ Ιταλών παραγωγών, δυσχεραίνουν την ενυδάτωση, αυξάνοντας τον κίνδυνο σχηματισμού λευκών κηλίδων στο τελικό προϊόν (Dexter, 2004).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, πέρα από την ακρίβεια στη δοσομέτρηση του νερού, έχουν αναπτυχθεί προηγμένα συστήματα ενυδάτωσης με σκοπό τη βελτίωση της ομοιομορφίας. Στις συμβατικές πρέσες εξώθησης, η ζύμη που προκύπτει από το στάδιο της ανάμειξης εμφανίζεται με τη μορφή σβόλων διαφορετικών μεγεθών. Αντίθετα, οι νεότερες τεχνολογίες ενοποιούν τα στάδια της προανάμειξης και της ανάμειξης σε μία λειτουργική μονάδα, διασφαλίζοντας πιο συνεκτικό αποτέλεσμα. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η πρέσα Polymatic (Bühler, Uzwil, Ελβετία) (Εικόνα 3), η οποία σχηματίζει και αναπτύσσει τη ζύμη μέσα σε μόλις 20 δευτερόλεπτα, χρησιμοποιώντας εξωθητήρα διπλού κοχλία. Η ζύμη μεταφέρεται άμεσα στον εξωθητήρα, με το σύστημα να λειτουργεί υπό κενό – στοιχείο που συμβάλλει καθοριστικά στην υψηλή χρωματική ποιότητα του προϊόντος. Επιπλέον, η δυνατότητα ταχείας εναλλαγής μήτρων διευκολύνει την παραγωγή διαφόρων σχημάτων κοντών ζυμαρικών, ενώ το ενσωματωμένο σύστημα καθαρισμού επιτρέπει την τήρηση υψηλών προτύπων υγιεινής (Dexter, 2004).



Εικόνα 5: Πρέσα Polymatic: Ο σύντομος χρόνος ανάμειξης (~20 δευτ.) περιορίζει την οξείδωση των κιτρίνων χρωστικών, δίνοντας ζυμαρικά με έντονο χρυσαφένιο χρώμα και άριστα μαγειρικά χαρακτηριστικά (Dexter, 2004).

Επιπροσθέτως, στο πλαίσιο της βελτίωσης των αρχικών σταδίων της παραγωγής ζυμαρικών, έχει μελετηθεί η απόδοση καινοτόμων συστημάτων ανάμειξης όπως τα Premix® (Εικόνα 6) και Bakmix® (Εικόνα 7) (StorciS.p.A., Collecchio, Ιταλία), σε σύγκριση με ένα συμβατικό σύστημα ανάμειξης (V50, StorciS.p.A.) (Carini et.al, 2010). Στο σύστημα Premix®, η χρήση φυγόκεντρης δύναμης διευκολύνει την άμεση και ομοιόμορφη ενυδάτωση της επιφάνειας κάθε σωματιδίου σιμιγδαλιού σε χρονικό διάστημα μόλις 1–2 δευτερολέπτων, ενώ ακολουθεί φάση ανάπαυσης διάρκειας 10 λεπτών πριν την εξώθηση. Το σύστημα Bakmix® περιλαμβάνει δύο στάδια ενυδάτωσης: αρχικά 2 δευτερόλεπτα στο Premix®, και στη συνέχεια 18 δευτερόλεπτα σε έναν εξωθητήρα χαμηλής πίεσης (περίπου 106 Pa). Και οι τρεις τεχνολογίες οδήγησαν σε προϊόντα (φρέσκα ζυμαρικά μέσω εξώθησης ή πλαστικοποίησης) με ικανοποιητική τεχνολογική συμπεριφορά και μαγειρική ποιότητα, παρουσιάζοντας απώλειες μαγειρέματος κάτω από 3 g ανά 100 g ζυμαρικών.



Εικόνα 6: Σύστημα Premix: Μονάδα προανάμειξης για την εγγύηση της τέλει ενυδάτωσης των συστατικών (Storci, n.d.).



Εικόνα 7: Σύστημα Bakmix: Πετυχαίνει σωστή ενυδάτωση ανεξάρτητα από το μέγεθος των σωματιδίων μαζί με ακριβή και επαναλαμβανόμενη δοσολογία (Storci, n.d.).

Παρόλα αυτά, αναδύονται ορισμένες προκλήσεις των καινοτόμων συστημάτων ενυδάτωσης στη μορφοποίηση της ζύμης. Όπως έχει αναφερθεί, τα σύγχρονα συστήματα ανάμειξης επιτρέπουν την ταχύτερη και πιο ομοιογενή κατανομή του νερού στο αλεύρι σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους. Ωστόσο, εξαιτίας του περιορισμένου χρόνου επεξεργασίας, ενδέχεται να μην αναπτυχθεί πλήρως το πρωτεϊνικό δίκτυο της ζύμης (Carini et al, 2010). Το αποτέλεσμα είναι μια ζύμη με μειωμένη εκτατότητα και αυξημένη αντίσταση στην παραμόρφωση, χαρακτηριστικά που θεωρούνται ανεπιθύμητα στην παραγωγή φρέσκων ζυμαρικών. Οι ερευνητές προτείνουν ότι, εξαιτίας του περιορισμένου χρόνου ανάμειξης, ίσως απαιτείται αύξηση της ενυδάτωσης για την επίτευξη καλύτερης ποιότητας προϊόντος. Ωστόσο, όπως αναφέρουν οι Manthey et al. (2004), και όπως έχει ήδη αναλυθεί, η προσέγγιση αυτή δεν φαίνεται να αποτελεί ιδανική λύση για την παραγωγή ζυμαρικών υψηλής ποιότητας.

Στα νέα μοντέλα παραγωγής ζυμαρικών, ο προ-αναμίκτης συνδέεται με έναν ιμάντα σταθεροποίησης (Beltmix® Storci S.p.a., Collecchio, Ιταλία), αντικαθιστώντας την παραδοσιακή δεξαμενή ανάμειξης με άξονα και λεπίδες. Το σύστημα αυτό βασίζεται σε έναν αργά κινούμενο μεταφορικό ιμάντα, πάνω στον οποίο η ζύμη μεταφέρεται χωρίς να υφίσταται μηχανική καταπόνηση. Αυτός ο ήπιος χειρισμός μειώνει σημαντικά την οξειδωση των πρώτων υλών, συμβάλλοντας στη διατήρηση της χαρακτηριστικής κίτρινης απόχρωσης του σιμιγδαλιού. Επιπλέον, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το σύστημα αυτό προσφέρει πλεονεκτήματα στην καθαριότητα και την ταχύτητα συντήρησης, καθώς είναι ευκολότερο στον καθαρισμό σε σχέση με τους συμβατικούς αναμίκτες (Bresciani et.al, 2022). Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνες 8 και 9) απεικονίζονται ο βιομηχανικός εξωθητήρας ζυμαρικών Storci και ο ιμάντας σταθεροποίησης ζύμης Beltmix αντίστοιχα:



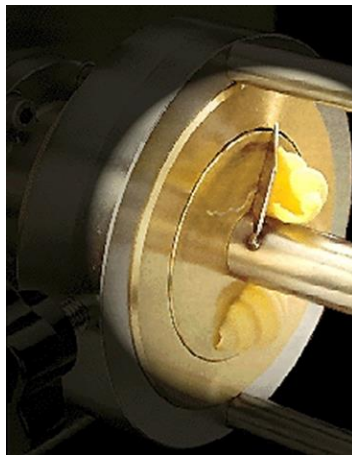
Εικόνα 8: Βιομηχανικός εξωθητήρας ζυμαρικών Storci:Ο εξοπλισμός αυτός επιτρέπει την ομοιόμορφη ανάμειξη και εξώθηση της ζύμης υπό ελεγχόμενες συνθήκες, συμβάλλοντας στη διατήρηση του χρώματος, της υφής και της ποιότητας των τελικών προϊόντων (Storci, n.d.).



Εικόνα 9: Ιμάντας σταθεροποίησης ζύμης Beltmix: Χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ζυμαρικών και αρτοσκευασμάτων για να σταθεροποιεί το σχήμα της ζύμης κατά τη μεταφορά, αποτρέποντας ανεπιθύμητες παραμορφώσεις, να ελέγχει το πάχος και την ομοιομορφία του ζυμαριού πριν τη μορφοποίηση ή την κοπή, να μειώνει τη δημιουργία φυσαλίδων αέρα και επιφανειακών ρωγμών μέσω ήπιας πίεσης καθώς και να διασφαλίζει σταθερή τροφοδοσία στην επόμενη φάση (π.χ. κοπή, ξήρανση) (Storci, n.d.).

2.2.5 Τεχνολογίες Μορφοποίησης στη Βιομηχανική Παραγωγή Ζυμαρικών

Η φάση της μορφοποίησης έχει ως στόχο τη δημιουργία ενός συγκεκριμένου σχήματος και αποτελεί το βασικό στάδιο της παραγωγής ζυμαρικών. Η διαμόρφωση της ζύμης μπορεί να επιτευχθεί με δύο μεθόδους: εξώθηση υπό πίεση ή έλαση. Στην πρώτη περίπτωση, η ζύμη μεταφέρεται μέσα σε κύλινδρο με τη βοήθεια ενός κοχλίου, ο οποίος την συμπιέζει και την ωθεί προς μια μήτρα (Εικόνα 10). Κατά τη διαδικασία αυτή, η πίεση μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει τα 10 MPa. Ο κοχλίας είναι συνήθως κατασκευασμένος σε τρία διακριτά τμήματα: τροφοδοσίας, μεταφοράς και εξώθησης. Καθώς η ζύμη κινείται μέσω του κοχλίου, ακολουθεί μια ελικοειδή πορεία που ενισχύει το ζύμωμα. Σε επίπεδο μακροσκοπικής παρατήρησης, η ζύμη αποκτά πυκνή και ομοιογενή υφή, ωστόσο το δίκτυο της γλουτένης ενδέχεται να υποστεί έντονες μηχανικές τάσεις, ειδικά στο τελικό στάδιο, λίγο πριν τη διέλευση από τη μήτρα (Sarghini et al, 2005).



Εικόνα 10: Εξώθηση υπό πίεση: Η μήτρα είναι ένα βασικό εξάρτημα μιας πρέσας: η ζύμη, που σχηματίζεται στη δεξαμενή ζυμώματος και στη συνέχεια οδηγείται από τον κοχλία εξώθησης προς την κεφαλή της πρέσας, ωθείται μέσα από τη μήτρα. Αυτή η κυκλική ή ορθογώνια συσκευή «διαμορφώνει» τα ζυμαρικά (Bresciani et al, 2022).

Η δεύτερη μέθοδος μορφοποίησης περιλαμβάνει τη σταδιακή έλαση της ζύμης μέσω κυλίνδρων, με σκοπό τη μείωση του πάχους της μέχρι να προκύψει ένα φύλλο με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά (Εικόνες 11, 12). Κατά την έλαση, η πίεση ασκείται για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, μόνο κατά τη διέλευση της ζύμης από το σημείο επαφής των κυλίνδρων, επιτρέποντάς της να ανακτήσει γρήγορα τη μορφή της.

Automatic fresh dough rolling machine



Εικόνες 11,12: Μηχανήματα μορφοποίησης της ζύμης με έλαση (PamaRoma, n.d.).

Από τις δύο τεχνικές, η εξώθηση προτιμάται στη βιομηχανική παραγωγή λόγω της μεγαλύτερης αποδοτικότητας και της ευελιξίας που προσφέρει. Μέσω αυτής της διαδικασίας είναι εφικτή η δημιουργία περισσότερων από 200 διαφορετικών σχημάτων ζυμαρικών (Bresciani et. al, 2022). Ως εκ τούτου, η εξώθηση έχει αποτελέσει αντικείμενο περισσότερης επιστημονικής μελέτης σε σύγκριση με την έλαση. Πράγματι, η πλειοψηφία των ερευνών επικεντρώνεται στη μελέτη μεταβλητών που σχετίζονται με την εξώθηση ή στη σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων διαμόρφωσης.

Η χρήση μη παραδοσιακών πρώτων υλών ή η ανεπαρκής ενυδάτωση της ζύμης μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη διαδικασία της μορφοποίησης, καθώς οι παράμετροι που εμπλέκονται σε αυτό το στάδιο εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα της ζύμης σε νερό. Η ποσότητα αυτή, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, οφείλει να προσαρμόζεται ανάλογα με τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά της πρώτης ύλης, όπως είναι το μέγεθος των σωματιδίων, η περιεκτικότητα σε κατεστραμμένο άμυλο και η παρουσία φυτικών ινών.

Σε περίπτωση που η ενυδάτωση δεν είναι επαρκώς ελεγχόμενη, ενδέχεται να υπονομευθεί η διαδικασία της εξώθησης, οδηγώντας σε μη αναστρέψιμη καταστροφή του πρωτεϊνικού δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποδόμηση της δομής του προϊόντος κατά το μαγείρεμα, ιδίως όταν χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες χαμηλής ποιότητας.

Παράλληλα, εσφαλμένες συνθήκες κατά την εξώθηση μπορούν να προκαλέσουν πρόωρη διόγκωση και ζελατινοποίηση του αμύλου, λόγω της θερμότητας που παράγεται από τις δυνάμεις διάτμησης. Τέτοια φαινόμενα μπορούν να περιοριστούν με τη διατήρηση της θερμοκρασίας εξώθησης κάτω από τους 50 °C και την επιλογή σιμιγδαλιού με υψηλό σημείο ζελατινοποίησης αμύλου, ώστε να καθυστερεί η διόγκωση και η διαλυτοποίηση του αμύλου, περιορίζοντας την παρεμβολή στον σχηματισμό του πρωτεϊνικού δικτύου (Marti et. al, 2013, Marti et al., 2014).

2.2.6 Επίδραση των παραμέτρων εξώθησης στη δομή και ποιότητα των ζυμαρικών

Η πίεση και η παράμετρος Ειδικής Μηχανικής Ενέργειας (Specific Mechanical Energy-SME) είναι βασικές μεταβλητές για την αξιολόγηση της εξώθησης ζύμης, επηρεαζόμενες από παράγοντες όπως το επίπεδο ενυδάτωσης, την ταχύτητα του κοχλία και τη θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, η SME εκφράζει την ποσότητα μηχανικής ενέργειας που μεταφέρεται από τον κοχλία του εξωθητήρα στη ζύμη (ή μίγμα) ανά μονάδα μάζας προϊόντος, κατά τη διάρκεια της εξώθησης και είναι κρίσιμη διότι επηρεάζει τη γλουτενική δομή, την υφή και την αντοχή στο μαγείρεμα (Godavarti & Karwe, 1997). Η υψηλή ενυδάτωση μειώνει την αντίσταση της ζύμης, οδηγώντας σε χαμηλότερη SME και ασθενέστερο σχηματισμό γλουτένης, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά την πυκνότητα των ζυμαρικών. Η διάμετρος των σπαγγέτι σχετίζεται ελάχιστα με τις μεταβλητές εξώθησης, ενώ επηρεάζεται περισσότερο από τη σύνθεση της ζύμης, όπως η παρουσία λιπιδίων που μειώνουν την αντίσταση κατά την εξώθηση και παράγουν λεπτότερα ζυμαρικά (Abecassis et al, 1994). Η αύξηση της θερμοκρασίας εξώθησης αυξάνει σημαντικά τις απώλειες κατά το μαγείρεμα, λόγω της μετουσίωσης των πρωτεϊνών που μειώνει τη συνοχή του πρωτεϊνικού δικτύου. Ωστόσο, βέλτιστες θερμοκρασίες (40–50 °C) και υψηλή ταχύτητα κοχλία σε συνδυασμό με κατάλληλο επίπεδο ενυδάτωσης βελτιώνουν τα χαρακτηριστικά των ζυμαρικών μειώνοντας τη ζημιά στις πρωτεΐνες. Οι βέλτιστες συνθήκες εξώθησης εξαρτώνται από τη σύνθεση και τον τύπο ζυμαρικών, με παραδείγματα να δείχνουν προσαρμογές θερμοκρασίας, ταχύτητας και αναλογιών πρώτων υλών. Ο τύπος υλικού της μήτρας εξώθησης επηρεάζει την υφή και την αντοχή των ζυμαρικών: τα τεφλόν ένθετα παράγουν λεία επιφάνεια και πιο ανθεκτικά ζυμαρικά, ενώ τα χάλκινα δημιουργούν πιο

τραχιά και πορώδη προϊόντα που είναι πιο εύθραυστα και ευνοούν την προσκόλληση εντόμων (Lucisano et.al, 2008).

2.2.7 Συγκριτικές Τεχνολογίες Επεξεργασίας Ζύμης: Εξώθηση έναντι Έλασης

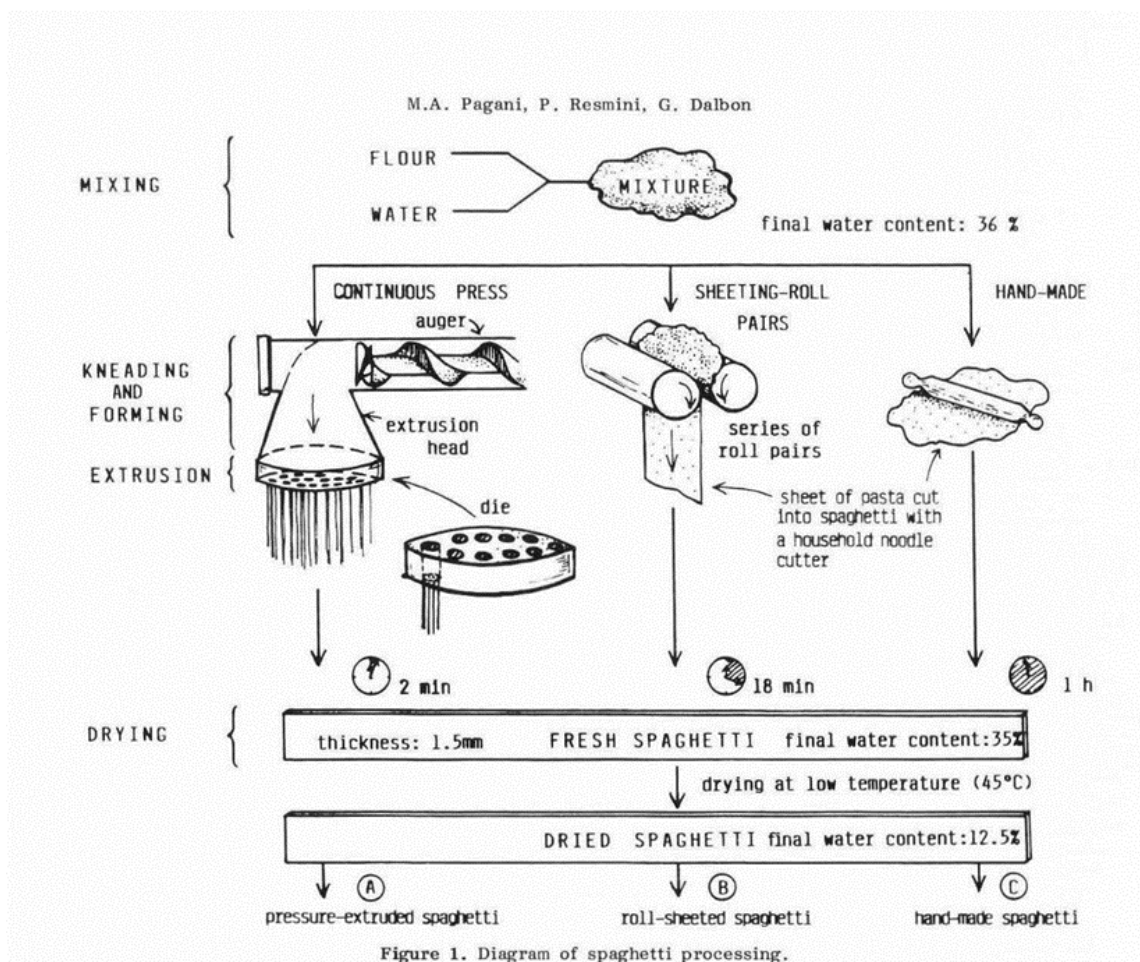
Έρευνες έχουν συγκρίνει τις επιδράσεις των μεθόδων διαμόρφωσης —εξώθησης και έλασης— στη δομή και ποιότητα της ζύμης ζυμαρικών. Σε μελέτη των Zardetto και DallaRosa για φρέσκα παστεριωμένα ζυμαρικά, παρατηρήθηκε ότι τα ζυμαρικά που έχουν υποστεί εξώθηση απορροφούν περισσότερο νερό και απελευθερώνουν περισσότερη ξηρή ουσία κατά το μαγείρεμα (Zardetto & DallaRosa, 2009). Αυτό αποδίδεται στην ατελή ανάπτυξη του δικτύου πρωτεϊνών κατά την εξώθηση, καθώς και στη μηχανική καταπόνηση που προκαλεί μερική αποικοδόμηση του αμύλου και αυξημένο σχηματισμό πρόδρομων ενώσεων της αντίδρασης Maillard, όπως φουροσινίνη. Παρότι τα ζυμαρικά που έχουν υποστεί εξώθηση δείχνουν μεγαλύτερη συνοχή πριν το μαγείρεμα, η θερμική επεξεργασία μειώνει τις διαφορές με τα «πλαστικοποιημένα». Κατά το μαγείρεμα, τα ζυμαρικά αυτά σχηματίζουν δευτερογενείς δεσμούς μεταξύ των πρωτεϊνών, υποδηλώνοντας την ύπαρξη ελεύθερων θειολικών ομάδων. Αντίθετα, στα ζυμαρικά που έχουν υποστεί έλαση σχηματίζεται από την αρχή πιο συνεκτικό και σταθερό δίκτυο γλουτένης (Marti et al., 2011). Ωστόσο, οι δομικές διαφορές δεν οδηγούν σε αισθητές γευστικές διαφορές, πιθανόν λόγω της παρουσίας αυγού στη σύνθεση.

Η μελέτη των Carini et al., (2009) συνέκρινε τρεις τεχνικές διαμόρφωσης ζυμαρικών – εξώθηση, κύλιση και ελασματοποίηση κενού – χρησιμοποιώντας ένα απλό σύστημα ζύμης (σιμιγδάλι:νερό 70:30). Διαπιστώθηκε ότι τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά των ζυμαρικών, όπως το χρώμα, η σφριγηλότητα και οι απώλειες μαγειρέματος, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επιλεγμένη μέθοδο διαμόρφωσης (Carini et al., 2009). Αντιθέτως, οι ιδιότητες κατανομής και κινητικότητας του νερού εντός της ζύμης επηρεάστηκαν σε μικρότερο βαθμό. Η εξώθηση, λόγω της εντονότερης μηχανικής καταπόνησης, ευνοεί ισχυρότερες αλληλεπιδράσεις νερού–βιοπολυμερών, προσδίδοντας στο προϊόν μεγαλύτερη εκτασιμότητα. Αντίθετα, η έλαση υπό ηπιότερες συνθήκες οδηγεί σε λιγότερο συμπαγή και εκτατό προϊόν, το οποίο ωστόσο διατηρεί καλύτερα τα στερεά

κατά το μαγείρεμα. Η εφαρμογή κενού κατά την έλαση βελτιώνει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, προσδίδοντας στο προϊόν πιο έντονο χρώμα και ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες των ζυμαρικών που έχουν υποστεί εξώθηση. Η αφαίρεση του εγκλωβισμένου αέρα κατά την ελασματοποίηση κενού πιθανώς ενίσχυσε τη δομική συνοχή, διευκολύνοντας τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των βιοπολυμερών και του νερού (Zardetto & DallaRosa, 2009).

Η επίδραση της τεχνολογίας διαμόρφωσης στην ποιότητα των ζυμαρικών είναι εντονότερη όταν χρησιμοποιείται αλεύρι μαλακού σίτου, λόγω της χαμηλότερης αντοχής του σε μηχανική καταπόνηση. Η εξώθηση παράγει μια πιο συμπαγή δομή, η οποία σχετίζεται με αργή απορρόφηση νερού και μεγαλύτερο χρόνο μαγειρέματος, χωρίς όμως να βελτιώνει την τελική συμπεριφορά στο μαγείρεμα. Η διαφορά αποδίδεται στην οργάνωση των πρωτεϊνών: στα στρωματοποιημένα ζυμαρικά σχηματίζεται πιο συνεχές δίκτυο γλουτένης, ενδεχομένως λόγω της δράσης των κυλίνδρων που ευθυγραμμίζουν τα ινίδια, οδηγώντας σε προϊόν πιο σφιχτό και λιγότερο κολλώδες. Σε ζύμες εμπλουτισμένες με 25% φαγόπυρο, η ιδανική τεχνολογία φαίνεται να είναι η εξώθηση ακολουθούμενη από σταδιακή κύλιση (Marti et al., 2011), καθώς προσφέρει δομή με υψηλή συνοχή και μειωμένες απώλειες κατά το μαγείρεμα, εξασφαλίζοντας σταθερότητα και μειωμένη αποσύνθεση.

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 13) μπορεί κανείς να παρατηρήσει την διαδικασία παρασκευής ζυμαρικών, από την ανάμειξη μέχρι και την παραγωγή του τελικού προϊόντος, μέσα από τις τεχνικές της εξώθησης και έλασης (Pagani et. al, 1989).



Εικόνα 13: Διαδικασία παραγωγής ζυμαρικών (Pagani et. al,1989).

2.2.8 Ξήρανση και σταθερότητα των ζυμαρικών: επιπτώσεις στη διάρκεια ζωής και ποιότητας

Όπως συμβαίνει με πολλά τρόφιμα, τα ζυμαρικά υποβάλλονται σε αποξήρανση προκειμένου να παραταθεί ο χρόνος ζωής τους, ο οποίος συνήθως ανέρχεται σε δύο έτη. Ωστόσο, οι βιταμίνες υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου. Όταν τα επίπεδα βιταμινών δεν ανταποκρίνονται πλέον στις δηλώσεις της διατροφικής επισήμανσης, οι παραγωγοί οφείλουν να χαρακτηρίσουν το προϊόν ως ληγμένο. Συνεπώς, η διάρκεια ζωής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον βαθμό εμπλουτισμού και τις δηλωμένες τιμές στην ετικέτα. Τυπικά, η βιομηχανία στοχεύει σε τελική υγρασία 12% για την ξήρανση των ζυμαρικών, παρότι ο Ομοσπονδιακός Κώδικας Κανονισμών επιτρέπει υγρασία έως και

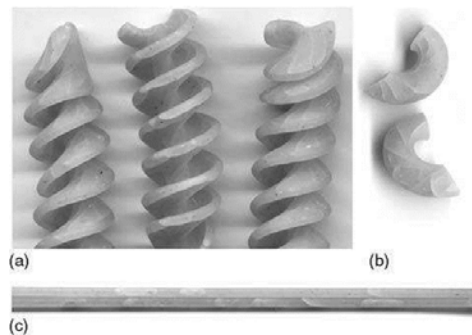
13%. Η διαδικασία ξήρανσης είναι απαιτητική, καθώς τα ζυμαρικά παρουσιάζουν δυσκολία στην ομοιόμορφη απομάκρυνση της υγρασίας. Η χαμηλή υγρασία, σε συνδυασμό με τις μεταβολές των διαστάσεων κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, ενδέχεται να προκαλέσει εμφάνιση ρωγμών (έλεγχο), όταν οι μηχανικές τάσεις που αναπτύσσονται υπερβαίνουν την αντοχή του προϊόντος. Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας κατά την ξήρανση επηρεάζει τις ιδιότητες των ζυμαρικών, κυρίως μέσω της απενεργοποίησης ενζύμων και της μετουσίωσης των πρωτεϊνών (Manthey&Twombly, 2005).

Η διαδικασία αποξήρανσης των ζυμαρικών περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια, τα οποία διακρίνονται σε τρεις βασικές φάσεις: την αρχική φάση προξήρανσης, την κύρια ή τελική φάση ξήρανσης και, τέλος, τη φάση ψύξης ή/και σταθεροποίησης του προϊόντος.

Στάδια Ξήρανσης

α. Προξήρανση

Η προξήρανση αποτελεί το αρχικό στάδιο της διαδικασίας ξήρανσης και ξεκινά αμέσως μετά την έξοδο του προϊόντος από τη μήτρα. Σε αυτό το σημείο, αέρας –συνήθως θερμαινόμενος– διοχετεύεται στην επιφάνεια της μήτρας, προσφέροντας ένα πρώτο, επιφανειακό στέγνωμα του προϊόντος. Η φάση αυτή ονομάζεται αρχική προξήρανση και επιτελεί σημαντικές λειτουργίες. Κυριότερη επιδίωξη είναι η επαρκής αφυδάτωση της επιφάνειας των ζυμαρικών, ώστε να αποφευχθεί η συγκόλληση μεταξύ των τεμαχίων. Επιπλέον, αυξάνεται η επιφανειακή ακαμψία, γεγονός που μειώνει τον κίνδυνο παραμόρφωσης ή κατάρρευσης, ιδίως σε κοίλα σχήματα όπως το κοράλι, τα κελύφη και τα ζίτι, όταν αυτά πέσουν ή στοιβαχτούν(Εικόνα 14)(Manthey&Twombly, 2005).Αν και η ποσότητα νερού που αφαιρείται στο αρχικό αυτό στάδιο είναι σχετικά μικρή (περίπου 1%), η διαδικασία είναι καθοριστική για τη διασφάλιση της ποιότητας του τελικού προϊόντος.



Εικόνα 14: Τελικός έλεγχος σε διαφορετικά είδη ζυμαρικών: (α) ροτέλα, (β) μακαρόνια με γωνιακή καμπυλότητα και (γ) σπαγγέτι. Στα σπαγγέτι παρατηρούνται μερικές και πλήρεις οβάλ αλλοιώσεις, ενώ στη ροτέλα οι έλεγχοι εντοπίζονται τόσο στην εξωτερική επιφάνεια όσο και στην πρόσοψη των πτερυγίων) (Manthey&Twombly, 2005).

Μετά την έξοδο από τη μήτρα, τα ζυμαρικά μεταφέρονται στο κύριο τμήμα προξήρανσης του στεγνωτηρίου. Στην περίπτωση των μακρών ζυμαρικών, η συλλογή γίνεται σε μεταλλικά καλάμια, τα οποία οδηγούνται μηχανικά στο στεγνωτήριο. Αντίστοιχα, τα κοντά ζυμαρικά είτε διοχετεύονται απευθείας στο στεγνωτήριο (όταν αυτό βρίσκεται κάτω από τον εξωθητήρα), είτε μεταφέρονται μέσω μεταφορικών μέσων –όπως ιμάντες με πλέγμα– που επιτρέπουν τη συνεχή ροή αέρα (Manthey&Twombly, 2005).

Τα ζυμαρικά εισέρχονται στο στάδιο προξήρανσης με περιεκτικότητα σε υγρασία της τάξης του 29–31%. Το στάδιο αυτό αντιστοιχεί περίπου στο 10% της συνολικής διάρκειας ξήρανσης και επιτυγχάνει την απομάκρυνση σχεδόν του ενός τρίτου του συνολικού νερού του προϊόντος. Ο υψηλός ρυθμός αποξήρανσης επιτυγχάνεται επειδή τα ζυμαρικά βρίσκονται ακόμα σε πλαστική κατάσταση, η οποία προλαμβάνει την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων (Manthey&Twombly, 2005).

Η διατήρηση της πλαστικότητας εξαρτάται από τη θερμοκρασία της ξήρανσης: σε πολύ υψηλή θερμοκρασία (περίπου 80°C) η μετάβαση σε ελαστική κατάσταση παρατηρείται όταν η υγρασία πέσει στο 18%, ενώ σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (περίπου 60°C) το όριο είναι περίπου 21%. Το νερό δρα ως πλαστικοποιητής, επιτρέποντας στο προϊόν να παραμορφώνεται χωρίς την ανάπτυξη μόνιμων τάσεων. Παράλληλα, η θερμοκρασία συμβάλλει στην ενίσχυση αυτής της πλαστικότητας (Manthey&Twombly, 2005). Γενικά, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο χαμηλότερη είναι η απαιτούμενη υγρασία για τη διατήρηση της πλαστικής κατάστασης.

Το στάδιο της προξήρανσης, όπως και η τελική ξήρανση, ενδέχεται να περιλαμβάνει ένα ενδιάμεσο στάδιο σταθεροποίησης –το λεγόμενο «στάδιο ανάπαυσης» ή «εφίδρωσης». Κατά τη διάρκειά του, η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα είναι ρυθμισμένες έτσι ώστε να μην προωθούν περαιτέρω απώλεια νερού από το προϊόν. Αντίθετα, ευνοείται η εσωτερική ανακατανομή της υγρασίας, όπου το κέντρο των ζυμαρικών, που διατηρεί υψηλότερη υγρασία, μεταφέρει νερό προς την επιφάνεια (Manthey&Twombly, 2005). Αυτό μειώνει τις διαφορές υγρασίας στο εσωτερικό του προϊόντος, περιορίζοντας την εμφάνιση διαστασιακών αλλαγών και εσωτερικών τάσεων. Αν η επιφάνεια επανενυδατωθεί επαρκώς, αποκτά και πάλι πλαστικότητα, διευκολύνοντας την αποφόρτιση των τάσεων που αναπτύσσονται.

β. Τελική Ξήρανση

Κατά την είσοδο στο τελικό στάδιο ξήρανσης, τα ζυμαρικά έχουν υγρασία μεταξύ 18% και 21%, ενώ στο τέλος της διαδικασίας αυτή μειώνεται περίπου στο 12%. Σε αυτό το στάδιο, τα ζυμαρικά δεν βρίσκονται πλέον σε πλαστική αλλά σε ελαστική κατάσταση, γεγονός που καθιστά τον έλεγχο της ξήρανσης ιδιαίτερα σημαντικό. Αν η απομάκρυνση της υγρασίας γίνει υπερβολικά γρήγορα, μπορεί να αναπτυχθούν μεγάλες εσωτερικές τάσεις, κυρίως στην επιφάνεια, οι οποίες υπερβαίνουν τη μηχανική αντοχή του προϊόντος, προκαλώντας ρωγμές – φαινόμενο γνωστό ως «checking» (Manthey&Twombly, 2005).

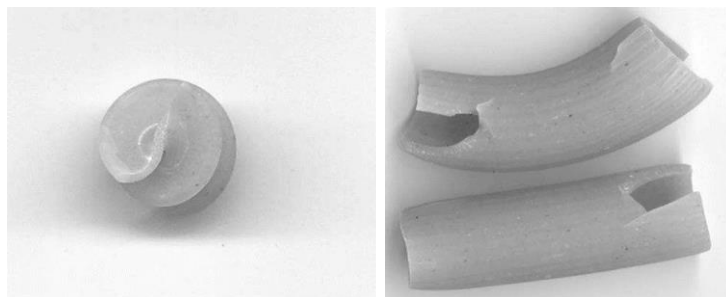
Αν και οι ρωγμές παρατηρούνται στο τελικό στάδιο, η αιτία τους μπορεί να σχετίζεται με προηγούμενα στάδια της διαδικασίας. Για παράδειγμα, η φθορά του εξαρτήματος εξώθησης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του πάχους των ζυμαρικών. Ένα παχύτερο προϊόν είναι δυσκολότερο να αποξηρανθεί ομοιόμορφα, και αν δεν τροποποιηθεί ανάλογα το προφίλ ξήρανσης, αυξάνεται η πιθανότητα δημιουργίας τάσεων και ρωγμών στο εσωτερικό του προϊόντος.

γ. Στάδιο Ψύξης και Σταθεροποίησης

Μετά την ολοκλήρωση της ξήρανσης, τα ζυμαρικά ψύχονται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και εκτίθενται σε σχετική υγρασία περίπου 50%. Σκοπός του σταδίου αυτού είναι να επιτευχθεί ισορροπία μεταξύ του προϊόντος και του περιβάλλοντος, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος ρωγμών λόγω εξωτερικών πιέσεων. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, η υγρασία κατανέμεται πιο ομοιόμορφα: νερό από το εσωτερικό των ζυμαρικών μετακινείται προς την επιφάνεια, με αποτέλεσμα τη μείωση των εντάσεων που αναπτύχθηκαν κατά την ξήρανση (Manthey&Twombly, 2005).

Ωστόσο, σε περιβάλλον με υψηλή υγρασία, ενδέχεται να παρουσιαστούν προβλήματα. Η επιφάνεια των αποξηραμένων ζυμαρικών μπορεί να αρχίσει να απορροφά υγρασία από τον αέρα, γεγονός που οδηγεί σε διαστολή της επιφάνειας και δημιουργία εσωτερικών τάσεων. Αν αυτές οι τάσεις προστεθούν σε τυχόν υπολειμματικές εντάσεις από τη διαδικασία ξήρανσης, το προϊόν μπορεί να παρουσιάσει ρωγμές. Ακόμη και χωρίς υπολειμματικές τάσεις, περιβάλλον με σχετική υγρασία 75% μπορεί να προκαλέσει ζημιά. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων, τα ζυμαρικά συνιστάται να συσκευάζονται εντός τριών ωρών από την έξοδό τους από το στεγνωτήριο (Manthey & Twombly, 2005).

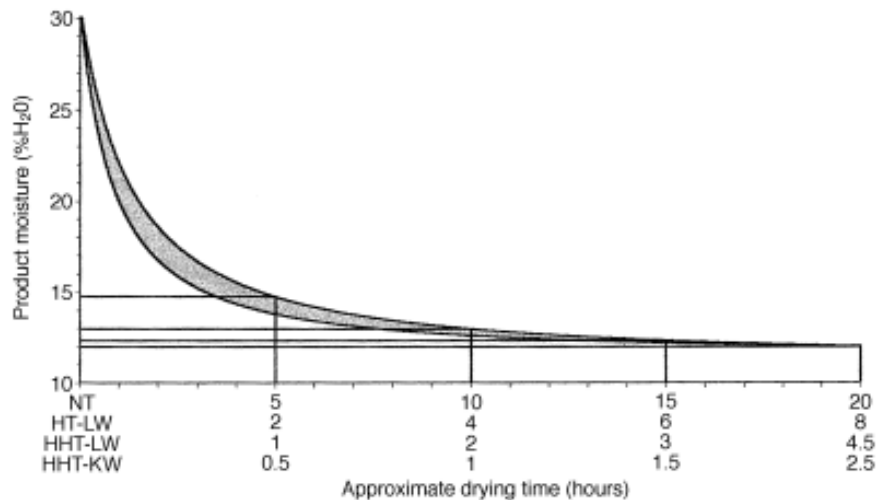
Στις Εικόνες 15 και 16 απεικονίζονται οι βλάβες που προκλήθηκαν κατά την ενυδάτωση και εξαιτίας μηχανικής βλάβης (Manthey&Twombly, 2005).



Εικόνες 15, 16: Τα ριγκατόνι εμφανίζουν μηχανικές βλάβες. Οι ρωγμές στα ζυμαρικά είναι μόνο στα άκρα τους και οι σπασμένες περιοχές είναι περίπου ορθογώνιες. Πρόβλημα ενυδάτωσης στη ροτέλα, όπως φαίνεται από την εγκάρσια τομή. Διακρίνονται ζώνες ανεπαρκούς ενυδάτωσης περίπου στο 1/3 της απόστασης από το κέντρο του προϊόντος (Manthey&Twombly, 2005).

Η πρόοδος στην τεχνολογία ξήρανσης έχει επιτρέψει την ανάπτυξη τριών βασικών τύπων επεξεργασίας, ανάλογα με τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία. Ο πρώτος τύπος είναι η συμβατική ξήρανση{(χαμηλή θερμοκρασία-standard (NT))} ο οποίος μιμείται τις παραδοσιακές μεσογειακές συνθήκες και διαρκεί περίπου 24 ώρες για σπαγγέτι. Ο δεύτερος είναι η ξήρανση σε υψηλή θερμοκρασία (60–80°C){high (HT)}ο οποίος μειώνει τον χρόνο στους 12 ώρες, και ο τρίτος τύπος είναι η ξήρανση σε εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία (άνω των 80°C){ultra-high (HHT)}, ο οποίος επιταχύνει περαιτέρω τη διαδικασία, φτάνοντας σε χρόνο μικρότερο των 5 ωρών (Manthey&Twombly, 2005).

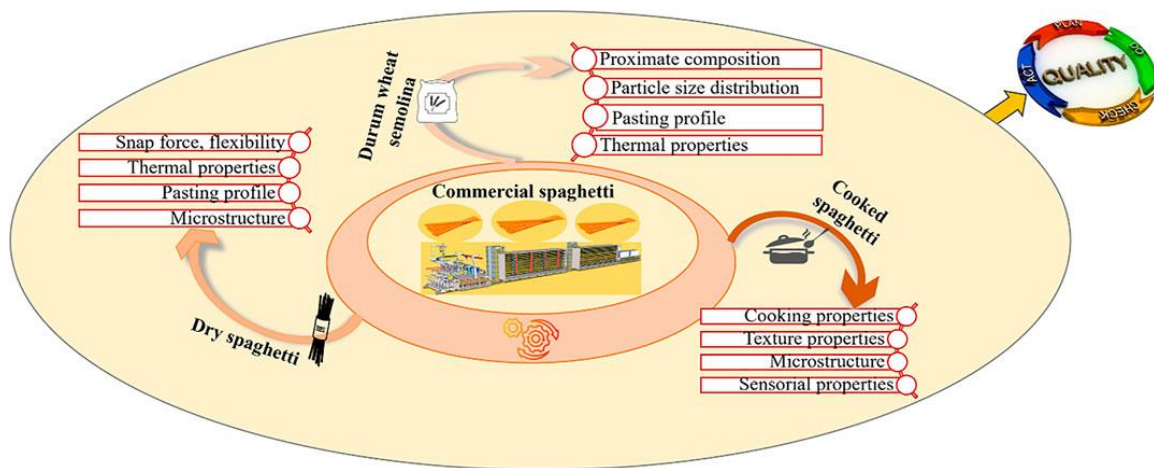
Η Εικόνα 17 απεικονίζει την τυπική καμπύλη μείωσης της υγρασίας του προϊόντος από περίπου 30% σε περίπου 12% κατά την συμβατική ξήρανση (NT), την ξήρανση σε υψηλή θερμοκρασία (HT) και την ξήρανση σε εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία (HHT). Η διαδικασία χαρακτηρίζεται από ταχεία απομάκρυνση νερού σε σύντομο χρονικό διάστημα, ακολουθούμενη από παρατεταμένη φάση τελικής ξήρανσης και σταθεροποίησης (Johnston & Dintheer, 2000).



Εικόνα 17: Η βασική καμπύλη της υγρασίας του προϊόντος. Για να διασφαλιστεί ο σταθερός έλεγχος της ποιότητας σε αυτούς τους μικρούς χρόνους ξήρανσης και να καταστεί δυνατή η βελτιστοποίησή της, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ζωνών με ελεγχόμενες κλιματικές συνθήκες (Johnston & Dintheer, 2000).

Ο ακριβής κύκλος ξήρανσης επιλέγεται ανάλογα με το είδος του προϊόντος και τον εξοπλισμό του παραγωγού. Παραδείγματα τέτοιων προφίλ ξήρανσης μπορούν να βρεθούν στη μελέτη των Yue κ.ά (1999), που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ποιότητας και Επεξεργασίας Ζυμαρικών του Κρατικού Πανεπιστημίου της Βόρειας Ντακότα.

Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 18) συνοψίζει σχηματικά τη διαδικασία αξιολόγησης της ποιότητας των ζυμαρικών (σπαγγέτι) από το σιμιγδάλι σκληρού σίτου μέχρι το τελικό, μαγειρεμένο προϊόν.



Εικόνα 18: Διαδικασία αξιολόγησης της ποιότητας των ζυμαρικών (σπαγγέτι). Η εικόνα παρουσιάζει τη διαδικασία αξιολόγησης της ποιότητας ζυμαρικών από το σιμιγδάλι σκληρού σίτου έως το μαγειρεμένο προϊόν, μέσω ανάλυσης σύστασης, θερμικών και ρεολογικών ιδιοτήτων, μικροδομής, υφής και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών (Carpentieri et al., 2024).

2.3 Ανίχνευση ρωγμών

Ο σχηματισμός ρωγμών υποβαθμίζουν αισθητά την εμπορική αξία του τελικού προϊόντος λόγω της αλλοίωσης της εμφάνισής του. Η διαδικασία ανίχνευσης ρωγμών περιλαμβάνει την απεικόνιση των δειγμάτων —συχνά κατά τη μεταφορά τους μέσω ιμάντων— και την περαιτέρω επεξεργασία των εικόνων με τη χρήση ειδικών αλγορίθμων, προκειμένου να εντοπιστούν οι ρωγμές. Οι κύριες τεχνικές που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τον

καθορισμό ορίου (thresholding) με μετατροπή έγχρωμων ή γκρι εικόνων σε δυαδικές, την αναγνώριση μορφών και την ανίχνευση ακμών, με στόχο τον προσδιορισμό του περιγράμματος των αντικειμένων. Προηγείται στάδιο προεπεξεργασίας, το οποίο συνήθως περιλαμβάνει αποθορυβοποίηση και αφαίρεση περιοχών φόντου, προκειμένου να αυξηθεί η ακρίβεια ταξινόμησης (Ogawa& Adachi, 2017). Ωστόσο, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή και βελτιστοποίηση των παραμέτρων ψηφιακής επεξεργασίας για κάθε είδος δείγματος, ώστε να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

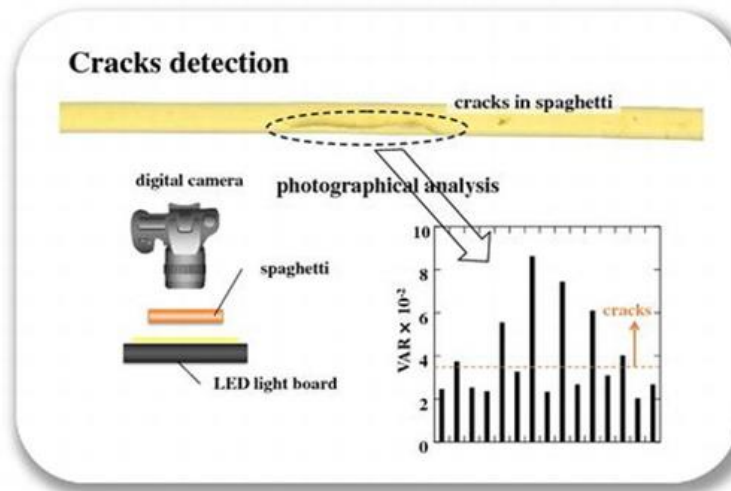
Παρά την πρόοδο στην αυτοματοποίηση της ανίχνευσης ρωγμών σε ορισμένα τρόφιμα, η διαδικασία ελέγχου για ρωγμές στα αποξηραμένα ζυμαρικά εξακολουθεί να βασίζεται στην ανθρώπινη οπτική αξιολόγηση στο πλαίσιο της βιομηχανικής παραγωγής. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς, καθώς επιβαρύνει φυσικά τους επιθεωρητές και μειώνει τη δυνατότητα διατήρησης συνεχούς προσοχής κατά τη δειγματοληψία (Ogawa& Adachi, 2017). Συνεπώς, καθίσταται αναγκαία η ανάπτυξη και εφαρμογή αυτοματοποιημένων συστημάτων ανίχνευσης ρωγμών για τα ζυμαρικά.

Παρόλα αυτά, η χρήση τεχνικών ψηφιακής απεικόνισης στα ζυμαρικά ενέχει ιδιαίτερες δυσκολίες. Ένα βασικό εμπόδιο είναι η παρουσία φυσικών κηλίδων στην επιφάνειά τους, που προέρχονται από το πίτουρο του σίτου. Αυτές οι κηλίδες δυσχεραίνουν τη διακριτότητα μεταξύ εμπορεύσιμων προϊόντων χωρίς ρωγμές και ζυμαρικών που παρουσιάζουν μικρορωγμές ή άλλα ελαττώματα, καθιστώντας την ακριβή ταξινόμηση μέσω αυτοματοποιημένων συστημάτων περισσότερο απαιτητική.

Για την αντιμετώπιση των περιορισμών που σχετίζονται με τις υφιστάμενες μεθόδους ανίχνευσης ρωγμών στα αποξηραμένα ζυμαρικά, αναπτύχθηκε μια νέα, απλοποιημένη προσέγγιση βασισμένη στην επεξεργασία εικόνας. Η μέθοδος αυτή, η οποία παρουσιάστηκε από τους Ogawa και Adachi (2017), αξιοποιεί εικόνες φωτός μετάδοσης που καταγράφονται με απλή ψηφιακή κάμερα, χωρίς να απαιτείται εκτεταμένη προεπεξεργασία (π.χ. αποθορυβοποίηση ή αφαίρεση οριακών περιοχών με φόντο)(Εικόνα 19). Μέσω της ανάλυσης γεωμετρικών χαρακτηριστικών, όπως ο μέσος όρος (AVE) και η αντίθεση (CNT) του ιστογράμματος εικόνας, επιτυγχάνεται η διάκριση ρωγμών από φυσικές επιφανειακές κηλίδες που σχετίζονται με το πίτουρο του σίτου.

Η προτεινόμενη μέθοδος αποδείχθηκε αποτελεσματική τόσο για σπαγγέτι με λεία επιφάνεια, παραγόμενο μέσω καλουπιού τεφλόν, όσο και για σπαγγέτι με τραχιά υφή, που διαμορφώθηκε με χάλκινο καλούπι. Επιπλέον, μέσω τεχνικών φασματοποίησης της

εικόνας, ήταν δυνατός ο κατά προσέγγιση εντοπισμός της θέσης των ρωγμών, ενισχύοντας περαιτέρω τη χρησιμότητα της μεθόδου στη βιομηχανική αξιολόγηση ποιότητας.



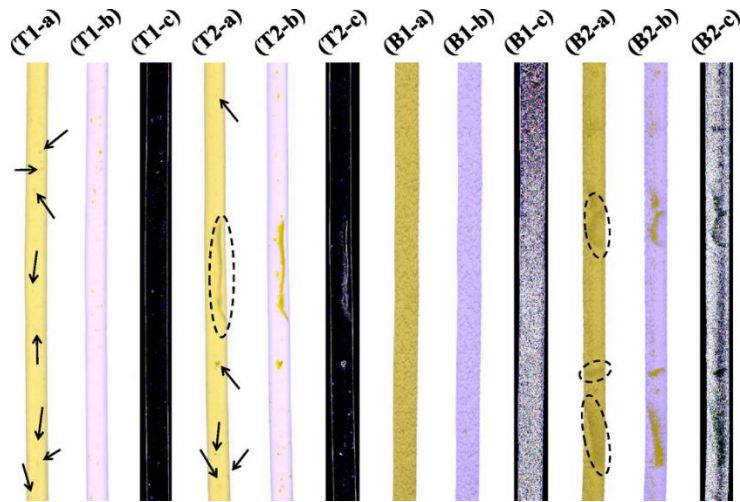
Εικόνα 19: Μια απλή τεχνική ανάλυσης εικόνας με ψηφιακή κάμερα διευκολύνει την ανίχνευση ρωγμών σε αποξηραμένα σπαγγέτι, χωρίς εκτενή προεπεξεργασία και με δυνατότητα διάκρισης από κηλίδες πίτουρου (Ogawa & Adachi, 2017).

Διέλευση φωτός αποξηραμένων σπαγγέτι

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζονται εικόνες διέλευσης φωτός αποξηραμένων σπαγγέτι που παρασκευάστηκαν με εξώθηση μέσω μήτρων χύτευσης από τεφλόν και μπρούντζο. Τα δείγματα που προήλθαν από μήτρες τεφλόν εμφανίζουν λεία επιφάνεια, ενώ εκείνα από μήτρες μπρούντζου παρουσιάζουν τραχιά υφή (Ogawa & Adachi, 2017). Κηλίδες προερχόμενες από πίτουρο σιταριού ήταν ορατές στα σπαγγέτι της τεφλονικής μήτρας, αλλά όχι σε εκείνα της μπρούντζινης, λόγω της αυξημένης επιφανειακής τραχύτητας.

Το ίδιο σχήμα περιλαμβάνει και τις επεξεργασμένες εικόνες, στις οποίες εφαρμόστηκαν βασικοί αλγόριθμοι δυαδοποίησης και ανίχνευσης ακμών, προκειμένου να αξιολογηθεί η καταλληλότητά τους για την ανίχνευση ρωγμών. Για την ανίχνευση ακμών χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο Sobel, το οποίο εκτιμά τη χωρική κλίση της φωτεινότητας στην εικόνα. Τα όρια τόσο για τη δυαδοποίηση όσο και για την ανίχνευση ακμών ορίστηκαν

χειροκίνητα, ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα των προσεγγίσεων αυτών στον εντοπισμό ρωγμών στα δείγματα σπαγγέτι.



Εικόνα 20: Πρωτότυπες εικόνες διέλευσης φωτός και αντίστοιχες επεξεργασμένες εικόνες: (α) μετά από δυαδοποίηση, (β) μετά από ανίχνευση ακμών με φίλτρο Sobel, (γ) για σπαγγέτι που εξωθήθηκαν μέσω μήτρας από τεφλόν (T1 και T2) και μπρούντζο (B1 και B2). Οι ελλείψεις και τα βέλη αντιπροσωπεύουν τις ρωγμές που δημιουργήθηκαν στα σπαγγέτι και τις κηλίδες που προέρχονται από το πτύουρο σιταριού, αντίστοιχα (Ogawa & Adachi, 2017). Η δυαδική περιοχή επισημαίνεται με κίτρινο χρώμα.

2.4 Ποιοτικός έλεγχος ζυμαρικών: παραλαβή, ξήρανση και ανίχνευση ρωγμών

2.4.1 Κριτήρια Ελέγχου κατά την Παραλαβή Ζυμαρικών

Το χρώμα των αποξηραμένων ζυμαρικών και η υφή των μαγειρεμένων αποτελούν βασικά κριτήρια για την αξιολόγηση της ποιότητάς τους. Τα αποξηραμένα ζυμαρικά οφείλουν να έχουν ομοιόμορφη κίτρινη απόχρωση, χωρίς την παρουσία στίγματος, κηλίδων ή ρωγμών, ενώ τα μαγειρεμένα ζυμαρικά πρέπει να διατηρούν σταθερή, ελαστική και συνεκτική υφή (Antognelli, 1980, Abecassis, 1991, Landi, 1995, Sicignano et al, 2015).

Το ενδοσπέρμιο του υαλώδους σκληρού σίτου υποβάλλεται σε άλεση, παράγοντας σιμιγδάλι, αλεύρι και πίτουρα. Για την παραγωγή ζυμαρικών χρησιμοποιείται κυρίως σιμιγδάλι, στο οποίο είναι δυνατή η προσθήκη ολικής ή μερικώς ολικής άλεσης αλευριού. Συνεπώς, η επιλογή των συγκεκριμένων κλασμάτων άλεσης διαμορφώνει τα φυσικά και βιοχημικά χαρακτηριστικά των σωματιδίων, επηρεάζοντας τελικά την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος (Antognelli, 1980). Η περιεκτικότητα του σιμιγδαλιού σε τέφρα χρησιμοποιείται ως δείκτης για την παρουσία σωματιδίων προερχόμενων από τα εξωτερικά στρώματα και το φύτρο του κόκκου. Έχει διαπιστωθεί ότι όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε τέφρα, τόσο μειώνεται η ένταση του κιτρινωπού χρώματος και η φωτεινότητα των ζυμαρικών (Matsuo & Dexter, 1980a, Borrelli et al., 1999). Αυτό σχετίζεται με την παρουσία ενζύμων στους εξωτερικούς ιστούς του κόκκου, τα οποία συμμετέχουν στη διαδικασία σκουρόχρωσης του προϊόντος (Taha & Sági, 1987, Borrelli et al., 1999).

Τα εξωτερικά στρώματα του κόκκου, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα, είναι επίσης πλούσια σε πρωτεΐνες και υδατάνθρακες (Knudsen et al., 1995, Lempereur et al., 1997b, Ando et al., 2002). Τα συστατικά αυτά μπορούν να συμμετέχουν σε αντιδράσεις Maillard κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ανεπιθύμητου κοκκινωπού χρώματος στα ζυμαρικά, λόγω της αλληλεπίδρασης μεταξύ αμινοξέων και αναγωγικών σακχάρων (Anese et al., 1999, Pasqualone et al., 2014). Επιπλέον, η έλλειψη ομοιομορφίας στην επιφάνεια των ζυμαρικών ενδέχεται να οφείλεται στην κατανομή μεγέθους των σωματιδίων. Πιο συγκεκριμένα, τα λεπτόκοκκα σωματίδια ενυδατώνονται πιο γρήγορα και αποτελεσματικά από τα χονδρόκοκκα, οδηγώντας σε ανομοιογενή ενυδάτωση (Hebrard et al., 2003). Έχει παρατηρηθεί ότι η άνιση ενυδάτωση του χονδρόκοκκου σιμιγδαλιού κατά την παραγωγική διαδικασία προκαλεί την εμφάνιση λευκών κηλίδων στην επιφάνεια των ζυμαρικών (Abecassis, 1991).

Όσον αφορά τη δομή του τελικού προϊόντος, η αύξηση της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη στο σιμιγδάλι σχετίζεται με τη βελτίωση της συνεκτικότητας και της σφιχτής υφής των ζυμαρικών, λόγω της ανάπτυξης ενός ενισχυμένου ιξωδοελαστικού δικτύου γλουτένης γύρω από τους κόκκους αμύλου (Dexter & Matsuo, 1977, Wasik, 1978). Παρόλα αυτά, αν και η αύξηση της συνολικής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη φαίνεται να συνδέεται με μεγαλύτερη αναλογία γλιαδίνης, η αναλογία γλιαδίνης προς γλουτενίνη (gli/glu) δεν παρουσιάζει σταθερή συσχέτιση με τη σφιχτή υφή των ζυμαρικών (Samson et al., 2005, Sissons et al., 2005).

Η κατανομή του μεγέθους των σωματιδίων του σιμιγδαλιού, η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη και η περιεκτικότητα σε τέφρα θεωρούνται βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα των ζυμαρικών. Ωστόσο, έχει διαπιστωθεί ότι οι κόκκοι με υψηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη παρουσιάζουν αυξημένη παραγωγή χονδρόκοκκων σωματιδίων, γεγονός που αποδίδεται στη μεγαλύτερη μηχανική αντοχή τους κατά τη θραύση (Samson et al., 2005). Επιπλέον, δεδομένου ότι παρατηρείται αύξηση της περιεκτικότητας σε τέφρα και πρωτεΐνη από το εσωτερικό προς το εξωτερικό του κόκκου, τα σωματίδια που προέρχονται από το εσωτερικό του ενδοσπερμίου είναι συνήθως φτωχά σε αυτά τα συστατικά (Ando et al., 2002). Συνεπώς, παρτίδες σίτου με υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη οδηγούν σε σιμιγδάλι με μεγαλύτερο μέγεθος σωματιδίων, ενώ το σιμιγδάλι με χαμηλή πρωτεΐνη έχει συνήθως και χαμηλή τέφρα (Bilgin et al., 2010, Sacchetti et al., 2011). Αυτό καθιστά δύσκολη τη μεμονωμένη αξιολόγηση της επίδρασης κάθε χαρακτηριστικού στην ποιότητα των ζυμαρικών, λόγω της αλληλεξάρτησης μεταξύ τους.

Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκε ένα πειραματικό πρωτόκολλο που επιτρέπει την απομόνωση της επίδρασης καθενός από τους τρεις παράγοντες (πρωτεΐνη, τέφρα, μέγεθος σωματιδίων) διατηρώντας σταθερές τις υπόλοιπες μεταβλητές. Πιο συγκεκριμένα, στη μελέτη των Joubert κ.ά. (2018) διερευνήθηκε η επίδραση τριών βασικών παραμέτρων —του μεγέθους των σωματιδίων, της περιεκτικότητας σε τέφρα και της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη— στην ποιότητα των αποξηραμένων ζυμαρικών, με έμφαση στο χρώμα και τις ιξωδοελαστικές τους ιδιότητες. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε παρτίδες σκληρού σίτου, διαφορετικής περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη (εύρος 9,2%–13,5%). Από τις παρτίδες αυτές παρασκευάστηκαν 18 διαφορετικά δείγματα, τα οποία συνδύαζαν ποικίλες τιμές πρωτεΐνης, τέφρας (0,66%–1,15%) και τρεις διαφορετικές κατανομές μεγέθους σωματιδίων (λεπτόκοκκα, χονδρόκοκκα και μικτά). Το σιμιγδάλι κάθε δείγματος παρασκευάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να απομονωθούν οι επιδράσεις κάθε μεταβλητής.

Η εκτίμηση του χρώματος των αποξηραμένων ζυμαρικών πραγματοποιήθηκε μέσω της μεθόδου CIELAB, με καταγραφή των παραμέτρων L^* (φωτεινότητα), a^* (ερυθρότητα) και b^* (κιτρινότητα), με τη χρήση χρωματομέτρου. Για τη μέτρηση της ιξωδοελαστικότητας των δειγμάτων εφαρμόστηκαν δοκιμές παραμόρφωσης σε ελεγχόμενο περιβάλλον, ώστε να εκτιμηθεί η μηχανική απόκριση των ζυμαρικών μετά την αποξήρανση.

Τα αποτελέσματα της μελέτης κατέδειξαν ότι η περιεκτικότητα σε τέφρα αποτελεί τον πλέον καθοριστικό παράγοντα που επηρεάζει το χρώμα των ζυμαρικών, με τις υψηλότερες τιμές τέφρας να σχετίζονται με χαμηλότερη φωτεινότητα και λιγότερο έντονο κίτρινο χρώμα. Αντίθετα, οι παράγοντες της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνη και του μεγέθους των σωματιδίων ασκούν δευτερεύουσα επίδραση στο χρώμα, αλλά επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη ρεολογική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, τα λεπτόκοκκα δείγματα παρουσίασαν υψηλότερη συνοχή και καλύτερη κατανομή ενυδάτωσης, ενώ η υψηλή περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη ευνόησε τη δημιουργία ενός πιο ανθεκτικού ιξωδοελαστικού δικτύου (Joubert et.al, 2018).

Αντίστοιχα, σε μια άλλη μελέτη, αυτή των Carpentieri et al. (2024), συλλέχθηκαν δείγματα σιμιγδαλιού με διαφορετική περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη και άμυλο, καθώς και με διαφοροποιήσεις στο μέγεθος των κόκκων και στην περιεκτικότητα σε καροτενοειδή. Τα δείγματα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή ζυμαρικών, εφαρμόζοντας ποικίλες τεχνολογικές παραμέτρους παραγωγής, όπως διαφορετικά πρωτόκολλα ανάμιξης, διαδικασίες ξήρανσης και στάδια σταθεροποίησης της ζύμης.

Η αξιολόγηση των παραγόμενων προϊόντων πραγματοποιήθηκε μέσω συνδυασμού αναλυτικών τεχνικών. Εξετάστηκαν οι φυσικοχημικές ιδιότητες (περιεκτικότητα σε υγρασία, δείκτης χρώματος, θερμικές ιδιότητες), η μικροδομή μέσω μικροσκοπίας, καθώς και οι ιδιότητες μαγειρέματος, όπως η απώλεια στερεών ουσιών, η ικανότητα απορρόφησης νερού και η συνοχή της δομής μετά το βράσιμο. Παράλληλα, εκτιμήθηκε η υφή, η ελαστικότητα, η σκληρότητα και τα γενικά οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των σπαγγέτι. Στον Πίνακα 3 περιγράφονται οι χρησιμοποιούμενοι δείκτες (descriptors), οι ορισμοί τους και οι αντίστοιχες κλίμακες αξιολόγησης, οι οποίες κυμαίνονται από πολύ χαμηλή έως πολύ έντονη/υψηλή ένταση του χαρακτηριστικού, ενώ στον Πίνακα 4 περιγράφονται τα χημικά χαρακτηριστικά δειγμάτων σιμιγδαλιού σκληρού σίτου.

Πίνακας 3: Αξιολόγηση των οργανοληπτικών, απτικών και γευστικών ιδιοτήτων των ζυμαρικών. Οι δείκτες διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες: (α) οπτικο-οσφρητική αξιολόγηση, όπου καταγράφονται η φωτεινότητα, η τραχύτητα, η ένταση του κίτρινου χρώματος και η οσμή των ζυμαρικών· (β) απτική αξιολόγηση, που περιλαμβάνει την επιφανειακή κολλώδη υφή και την ευθραυστότητα μετά το μαγείρεμα· και (γ) αξιολόγηση γεύσης, όπου εξετάζονται η ελαστικότητα κατά τη μάσηση (pastafirmness), η προσκόλληση των ζυμαρικών μεταξύ τους (stickiness), η σκληρότητα και η παραμένουσα γευστική αίσθηση (noisysensation). Για κάθε χαρακτηριστικό δίνεται σαφής ορισμός καθώς και η αντίστοιχη κλίμακα μέτρησης, που κυμαίνεται από πολύ χαμηλή έως πολύ υψηλή ένταση.

Descriptors	Definition	Evaluation scales
Visual and olfactory evaluation		
Brightness	The extent to which the light is reflected on the surface of spaghetti	Ranging from 0 = absent to 10 = very intense
Roughness	Characteristic that describes the degree of irregularity of the surface of the strand	Ranging from 0 = absent to 10 = very intense
Yellow colour	The intensity of the yellow colour on the surface of spaghetti	Ranging from 0 = light yellow to 10 = dark yellow
Beige colour	The intensity of the beige colour on the surface of spaghetti	Ranging from 0 = light beige to 10 = dark beige
Pasta odour	Aroma associated with the cooked grain	Ranging from 0 = absent to 10 = very intense
Tactile evaluation		
Stickiness	Surface stickiness of the pasta which depends on the amount of starch released which makes it sticky	Ranging from 0 = not sticky to 10 = very sticky
Brittleness	Mechanical characteristic which indicates the resistance to crushing of the cooked pasta with the fingers	Ranging from 0 = least breakable to 10 = very breakable
Taste perception evaluation		
Pasta flavour	Olfactory-gustatory sensation associated with semolina pasta cooked and remaining in the mouth after swallowing	Ranging from 0 = absent to 10 = very intense
Hardness	Force required to cut the spaghetti with incisors	Ranging from 0 = little hard to 10 = very hard
Grainy mouthfeel	Amount of residual pieces of spaghetti warned in the mouth after swallowing	Ranging from 0 = least grainy to 10 = very grainy

Πίνακας 4: Χημικά χαρακτηριστικά δειγμάτων σιμιγδαλιού σκληρού σίτου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4, οι χημικές ιδιότητες των δειγμάτων σιμιγδαλιού ήταν πλήρως συμβατές με τα πρότυπα που χαρακτηρίζουν την πρώτη ύλη υψηλής ποιότητας για παραγωγή ζυμαρικών. Ειδικότερα, οι τιμές υγρασίας (14%–14,9%), γλουτένης (11,6%–11,9%), πρωτεΐνης (13,3%–14%) και αμύλου (68,1%–71,4%) εντάσσονται στο εύρος που θεωρείται ενδεικτικό σιμιγδαλιού με άριστες τεχνολογικές ιδιότητες (Sissons et al., 2012, DeCindio & Baldino, 2015). Επιπλέον, στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι σιμιγδάλι υψηλής ποιότητας ορίζεται από περιεκτικότητα πρωτεΐνης εντός 12%–15% dw, γλουτένη άνω του 11% dw και άμυλο μεταξύ 74%–76% dw (Garcia-Valle et al., 2021, Carpentieri et al., 2023). Η αυξημένη παρουσία αμυλόζης και λιπιδίων δύναται επίσης να οδηγήσει στο σχηματισμό συμπλόκων αμυλόζης–λιπιδίων, φαινόμενο που συνδέεται με μεγαλύτερη σκληρότητα και συμύκνωση των μαγειρεμένων ζυμαρικών, περιορισμένη διόγκωση αμύλου και αυξημένο ιξώδες κατά τη ζύμωση (Niu et al., 2017).

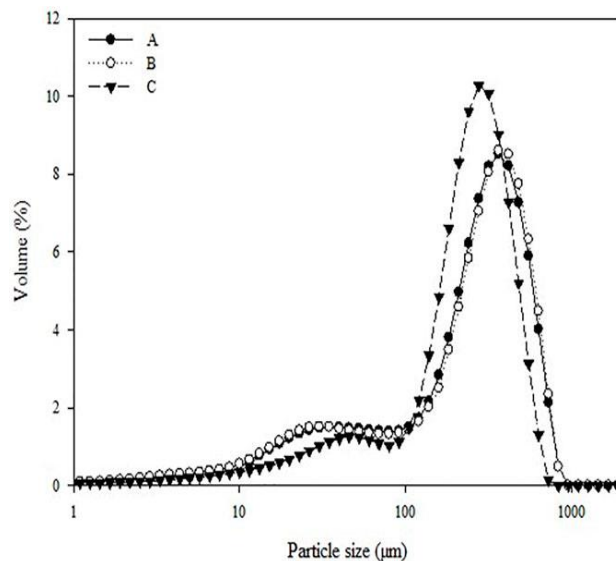
Sample	Moisture (%)	Protein (% dw)	Gluten (% dw)	Total dietary fiber (% dw)	Total starch (% dw)	Fat (% dw)	Amylose (% dw)
A	14.0 ± 0.1 ^a	14.0 ± 0.7 ^a	11.6 ± 0.1 ^a	4.4 ± 0.3 ^{ab}	71.4 ± 0.1 ^b	1.6 ± 0.3 ^c	23.4 ± 3.3 ^b
B	14.9 ± 1.0 ^a	13.3 ± 0.54 ^d	11.9 ± 0.2 ^a	4.7 ± 0.5 ^b	68.1 ± 1.0 ^a	1.0 ± 0.1 ^b	18.4 ± 0.8 ^a
C	13.9 ± 0.9 ^a	14.0 ± 0.45 ^d	11.7 ± 0.1 ^a	3.5 ± 0.3 ^a	68.2 ± 0.5 ^a	0.8 ± 0.0 ^a	21.9 ± 0.6 ^{ab}

Mean ($n = 5$) ± standard deviation. Values with different lowercase letter (a-b) within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$). dw, dry weight.

Όσον αφορά τις χρωματομετρικές παράμετροι γενικά διαπιστώθηκαν μικρές διαφοροποιήσεις στην ερυθρότητα των δειγμάτων, καθώς το σιμιγδάλι Α και Β εμφάνισε υψηλότερες τιμές του δείκτη a^* σε σχέση με το δείγμα C. Η τάση αυτή ενδέχεται να αποδίδεται σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα ανθοκυανινών στην αλευρόνη ή το περικάρπιο του σκληρού σίτου, με τις χρωματικές διαφορές να σχετίζονται πιθανότατα με τη γενετική ποικιλία και την κατανομή των χρωστικών στους κόκκους (Ficco et al., 2014). Παράλληλα, οι τιμές ΔΕ (0,79–2,55) υποδηλώνουν ότι οι χρωματικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δειγμάτων Α–Β, Α–C και Β–C είναι πιθανόν αντιληπτές οπτικά (Kubo et al., 2013).

Εκτός από το χρώμα, η κοκκομετρία αποτελεί κρίσιμο παράγοντα που επηρεάζει την ποιότητα του σιμιγδαλιού και την τεχνολογική συμπεριφορά κατά την παραγωγή ζυμαρικών (Carpentieri et al., 2022). Πιο λεπτόκοκκο σιμιγδάλι ενδέχεται να εμφανίζει κατεστραμμένα σημεία δέσμευσης νερού στους κόκκους αμύλου λόγω έντονης άλεσης, με αποτέλεσμα χαμηλότερη ικανότητα συγκράτησης νερού. Αντίθετα, πιο χονδρό σιμιγδάλι μπορεί να συνδέεται με υψηλότερη απορρόφηση βάρους κατά το μαγείρεμα (Sacchetti et al., 2011).

Για την πληρέστερη κατανόηση των διαφορών μεταξύ των πρώτων υλών και την αποτίμηση της επίδρασής τους στα τελικά ζυμαρικά, μετρήθηκε το μέγεθος των σωματιδίων των δειγμάτων σιμιγδαλιού A, B και C. Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1, η κατανομή ήταν διτροπική, με το μεγαλύτερο ποσοστό (90%) να αποτελείται από σωματίδια μεγάλου μεγέθους (476,16–592,37 μm) και ένα μικρότερο κλάσμα (10%) από λεπτότερα σωματίδια (24,56–44,11 μm).



Διάγραμμα 1: Κατανομή μεγέθους σωματιδίων δειγμάτων σιμιγδαλιού σκληρού σίτου (Sacchetti et al., 2011).

Επιπροσθέτως, οι θερμικές ιδιότητες του αμύλου παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της δομής και της υφής των σπαγγέτι τόσο κατά τον σχηματισμό της ζύμης όσο και κατά το μαγείρεμα (Sozer et al., 2007). Στις θερμικές αναλύσεις του αμύλου σκληρού σιταριού παρατηρούνται δύο χαρακτηριστικές κορυφές: η πρώτη, με θερμοκρασία κορυφής μετάβασης (Tpeak) συνήθως μεταξύ 51°C και 79°C (Romano et al., 2015), σχετίζεται με τη ζελατινοποίηση του αμύλου, ενώ η δεύτερη, με Tpeak 90–120°C (Detchewa et al., 2016), αντιστοιχεί στη διάσπαση των συμπλόκων αμυλόζης-λιπιδίου. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει τις θερμοκρασίες και τις ενθαλπίες μετάβασης των διαφορετικών δειγμάτων. Οι θερμοκρασίες ζελατινοποίησης κυμάνθηκαν από 62,56°C έως 66,87°C, τιμές που συμφωνούν με τα τυπικά εύρη των αμύλων σίτου. Τα δείγματα σπαγγέτι έδειξαν σαφώς υψηλότερες θερμοκρασίες σε σχέση με το σιμιγδάλι, ενώ το δείγμα σπαγγέτι A

κατέγραψε τις υψηλότερες τιμές σε σύγκριση με τα δείγματα Β και Γ, πιθανότατα λόγω διαφορών στις συνθήκες παραγωγικής επεξεργασίας.

Πίνακας 5: Θερμικές ιδιότητες των αναλυθέντων δειγμάτων σιμιγδαλιού και σπαγγέτι: T_{on} , θερμοκρασία έναρξης· T_{peak} , θερμοκρασία κορυφής· T_{end} , θερμοκρασία λήξης· ΔH , ενθαλπία μετάβασης (Carpentieri et al, 2024).

		Gelatinization				Amylose-lipid complex			
		T_{on} (°C)	T_{peak} (°C)	T_{end} (°C)	ΔH (J/g sample)	T_{on} (°C)	T_{peak} (°C)	T_{end} (°C)	ΔH (J/g sample)
Semolina	A	56.98 ± 0.06 ^a	62.90 ± 0.26 ^a	70.96 ± 0.63 ^b	0.89 ± 0.09 ^a	84.63 ± 1.30 ^a	96.69 ± 2.88 ^a	103.15 ± 1.19 ^a	0.37 ± 0.03 ^c
	B	56.81 ± 0.23 ^a	62.56 ± 0.13 ^a	70.24 ± 0.05 ^a	0.80 ± 0.09 ^a	92.52 ± 11.2 ^a	99.54 ± 3.89 ^a	104.30 ± 1.39 ^a	0.26 ± 0.02 ^b
	C	58.65 ± 0.31 ^b	62.81 ± 0.17 ^a	70.40 ± 0.53 ^a	0.79 ± 0.04 ^a	92.34 ± 5.05 ^a	98.50 ± 2.95 ^a	104.51 ± 1.08 ^a	0.11 ± 0.01 ^a
Spaghetti	A	60.07 ± 0.39 ^b	66.87 ± 0.28 ^C	74.60 ± 0.03 ^B	0.68 ± 0.06 ^A	88.24 ± 0.10 ^B	98.74 ± 2.05 ^A	103.81 ± 2.37 ^B	0.34 ± 0.05 ^C
	B	58.92 ± 0.27 ^A	64.43 ± 0.19 ^B	71.62 ± 0.59 ^A	0.76 ± 0.11 ^B	86.06 ± 1.41 ^A	97.00 ± 1.01 ^A	103.61 ± 2.24 ^B	0.24 ± 0.02 ^B
	C	58.03 ± 0.50 ^A	63.72 ± 0.24 ^A	71.28 ± 0.40 ^A	0.70 ± 0.03 ^A	87.28 ± 2.78 ^B	98.24 ± 1.22 ^A	100.97 ± 0.30 ^A	0.19 ± 0.03 ^A

Values with different lowercase letter within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$) for semolina samples. Values with different uppercase letter within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$) for spaghetti samples.

Οι θερμικές ιδιότητες των αναλυθέντων δειγμάτων σιμιγδαλιού και σπαγγέτι, οι θερμοκρασίες ζελατινοποίησης κυμαίνονταν από 62,56°C έως 66,87°C, εύρος που συμφωνεί με αυτό των αμύλων σιταριού. Τα δείγματα σπαγγέτι εμφάνισαν υψηλότερες τιμές σε σχέση με το σιμιγδάλι, ενώ το δείγμα Α παρουσίασε τις υψηλότερες θερμοκρασίες ζελατινοποίησης σε σύγκριση με τα δείγματα Β και Γ, πιθανώς λόγω διαφορών στις συνθήκες επεξεργασίας.

Όσον αφορά τα ιξωδομετρικά χαρακτηριστικά (pasting characteristics), δεν εντοπίστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές στη θερμοκρασία μεταξύ των δειγμάτων σιμιγδαλιού και σπαγγέτι ($p > 0,05$) (Πίνακας 6).

Πίνακας 6: Ιξωδομετρικά χαρακτηριστικά (pasting characteristics) δειγμάτων σπαγγέτι και σιμιγδαλιού. Το σιμιγδάλι Α εμφάνισε σημαντικά υψηλότερο μέγιστο ιξώδες σε σχέση με το σιμιγδάλι Β ($p < 0,05$), πιθανότατα λόγω της αυξημένης περιεκτικότητάς του σε άμυλο. Το υψηλότερο αυτό ποσοστό αμύλου φαίνεται να ενισχύει τις αλληλεπιδράσεις με τα υπόλοιπα συστατικά του σιμιγδαλιού, οδηγώντας σε πιο ανθεκτικό δίκτυο και αυξημένες τιμές ιξώδους (BeMiller, 2019). Το σιμιγδάλι Β εμφάνισε χαμηλότερες τιμές οπισθοδρόμησης και τελικού ιξώδους, κάτι που σχετίζεται με τη μικρότερη περιεκτικότητά του σε αμυλόζη σε σύγκριση με το σιμιγδάλι Α.

Sample	Brand	PT (°C)	PV (Pa s)	SB (Pa s)	EV (Pa s)
Semolina	A	59.94 ± 0.06 ^{Aa}	26.43 ± 4.34 ^{ABa}	15.97 ± 1.51 ^{Ac}	32.75 ± 1.29 ^{Bc}
	B	61.17 ± 1.05 ^{Aa}	18.75 ± 0.43 ^{Aa}	5.67 ± 1.90 ^{Aa}	15.01 ± 1.38 ^{Aa}
	C	62.8 ± 0.92 ^{Aa}	14.52 ± 2.05 ^{Aa}	10.06 ± 1.23 ^{Ab}	21.85 ± 0.98 ^{Ab}
Spaghetti	A	60.86 ± 1.39 ^{Aa}	30.64 ± 1.69 ^{ABa}	46.93 ± 2.95 ^{Ba}	64.35 ± 3.97 ^{Ca}
	B	59.94 ± 0.11 ^{Aa}	39.52 ± 6.42 ^{Ba}	44.45 ± 7.48 ^{Ba}	71.17 ± 0.77 ^{Ca}
	C	58.80 ± 2.32 ^{Aa}	32.56 ± 0.90 ^{ABa}	65.20 ± 3.75 ^{Cb}	85.20 ± 4.10 ^{Db}

PT, pasting temperature; PV, peak viscosity; SB, setback viscosity; EV, end viscosity.

Values with different uppercase letter within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$) for all samples.

Values with different lowercase letter within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$) for each group of semolina and spaghetti samples.

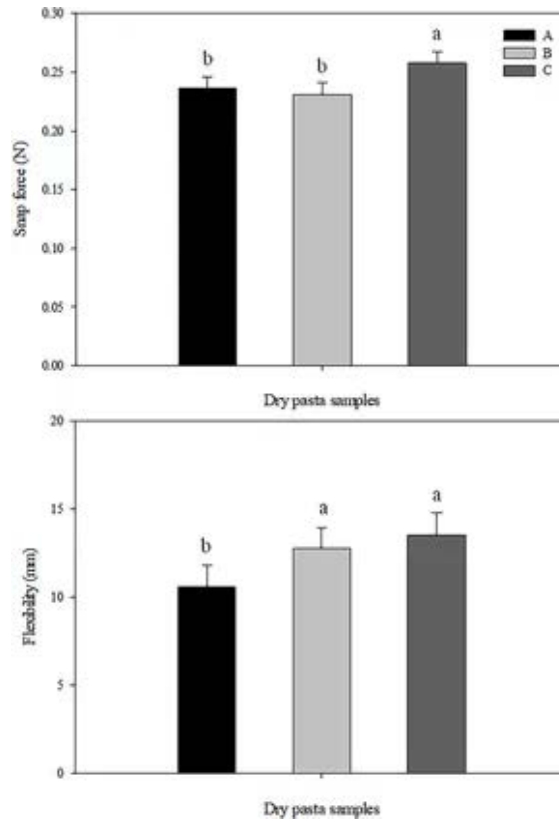
Όσον αφορά τη συμπεριφορά μαγειρέματος, η ικανότητα απορρόφησης νερού (WAC), οι απώλειες μαγειρέματος (CL) και η OCT των δειγμάτων αναφέρονται στον Πίνακα 7. Επίσης παρουσιάζεται η ποσότητα νερού που απορροφήθηκε ανά 100 g ξηρών ζυμαρικών κατά το μαγείρεμα.

Πίνακας 7: Ποιότητα μαγειρέματος των τριών τύπων σπαγγέτι (Α, Β και Γ). Δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων και οι τιμές WAC παρέμειναν σταθερές ακόμη και 10 λεπτά μετά το τέλος του μαγειρέματος. Το βάρος των μαγειρεμένων ζυμαρικών βρέθηκε να είναι 2,4–2,6 φορές υψηλότερο από εκείνο των ξηρών, τιμή που συμφωνεί με το ιδανικό όριο για ζυμαρικά σκληρού σίτου, το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνά το τριπλάσιο του ξηρού βάρους (Piwińska et al., 2016). Παρόλα αυτά, το δείγμα Α εμφάνισε χαμηλότερη τιμή WAC σε σχέση με τα δείγματα Β και Γ, γεγονός που πιθανόν συνδέεται με την υψηλότερη περιεκτικότητα του σιμιγδαλιού Α σε πρωτεΐνες και λιπίδια, τα οποία σχηματίζουν πιο συμπαγές δίκτυο, ή με μεγαλύτερο ποσοστό κατεστραμμένων κόκκων αμύλου λόγω εντονότερων συνθηκών ξήρανσης, περιορίζοντας έτσι τη διαθεσιμότητα του αμύλου για απορρόφηση νερού.

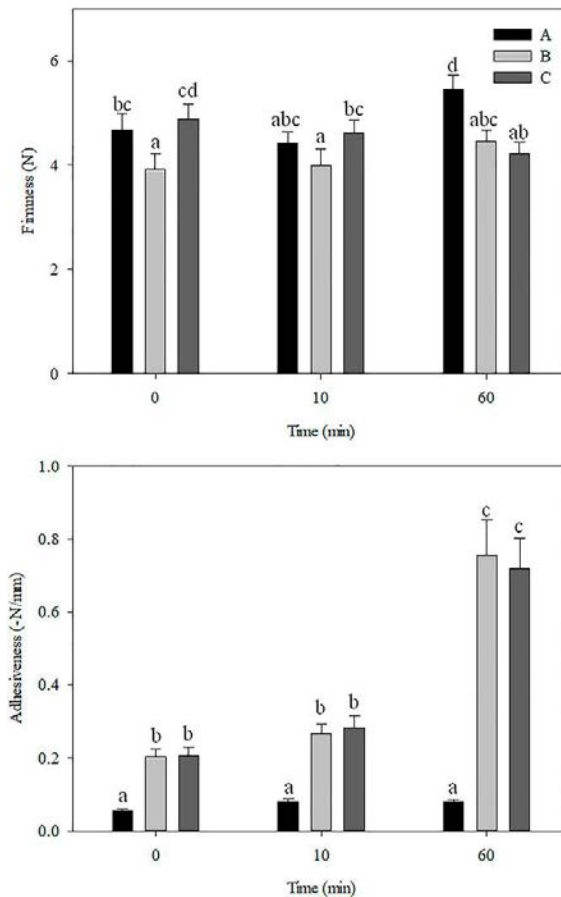
Sample	Water absorption (g/100 g)			Cooking loss (g/100 g)	Optimal cooking time (min)
	t = 0 min	t = 2 min	t = 10 min		
A	141 ± 8 ^{aA}	142 ± 8 ^{aA}	146 ± 5 ^{aA}	4.78 ± 0.1 ^a	13.30
B	146 ± 13 ^{aA}	149 ± 10 ^{aA}	152 ± 10 ^{aA}	5.37 ± 0.2 ^b	13.00
C	148 ± 10 ^{aA}	150 ± 12 ^{aA}	156 ± 15 ^{aA}	5.61 ± 0.5 ^b	12.30

Mean (n = 10) ± standard deviation. Values with different lowercase letter within the same column are significantly different ($p \leq 0.05$). Values with different uppercase letter within the same row are significantly different ($p \leq 0.05$).

Όσον αφορά την αντοχή των ξηρών και μαγειρεμένων δειγμάτων σπαγγέτι, αυτή αξιολογήθηκε μέσω δοκιμών κάμψης και συμπίεσης, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στις Εικόνες 21 και 22. Στην Εικόνα 21 απεικονίζεται η δύναμη που απαιτείται για την κάμψη και το σπάσιμο μιας κλωστής ξηρού σπαγγέτι, δείκτης πιθανής δομικής αδυναμίας που μπορεί να σχετίζεται με τη διαδικασία ξήρανσης ή τα χαρακτηριστικά του σιμιγδαλιού. Το δείγμα C εμφάνισε υψηλότερη δύναμη θραύσης και μεγαλύτερη ευκαμψία σε σχέση με τα Β και Α, γεγονός που συνδέεται με τις πιο ήπιες συνθήκες ξήρανσης που εφαρμόστηκαν στην παραγωγή τους. Έχει αποδειχθεί ότι οι υψηλές θερμοκρασίες ξήρανσης προκαλούν καταπονήσεις στο δίκτυο γλουτένης, οδηγώντας σε διαχωρισμό του από τους κόκκους αμύλου, κάτι που μειώνει τη συμπαγή υφή και αυξάνει την πιθανότητα θραύσης των ζυμαρικών (Baiano et al., 2019).

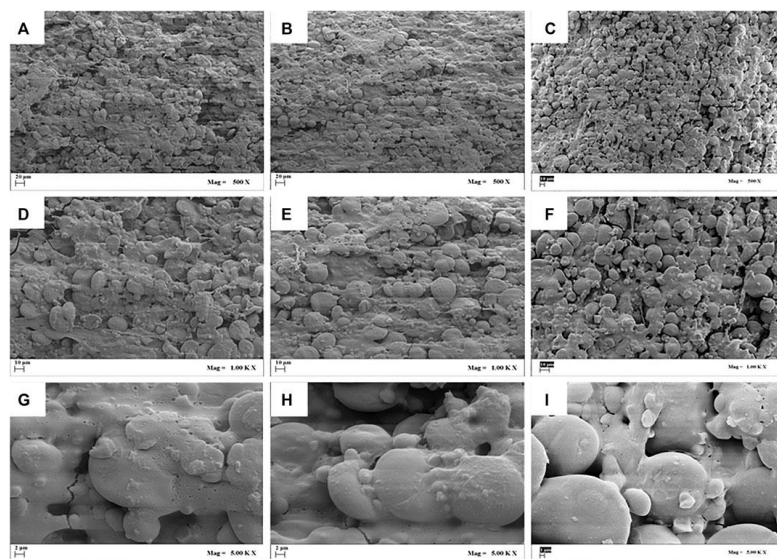


Εικόνα 21: Δύναμη θραύσης και Ευκαμψία δειγμάτων ξηρών ζυμαρικών. Διαφορετικά γράμματα πάνω από τις γραμμές υποδεικνύουν στατιστικά σημαντική διαφορά ($p \leq 0,05$) (Carpentieri et al., 2022).

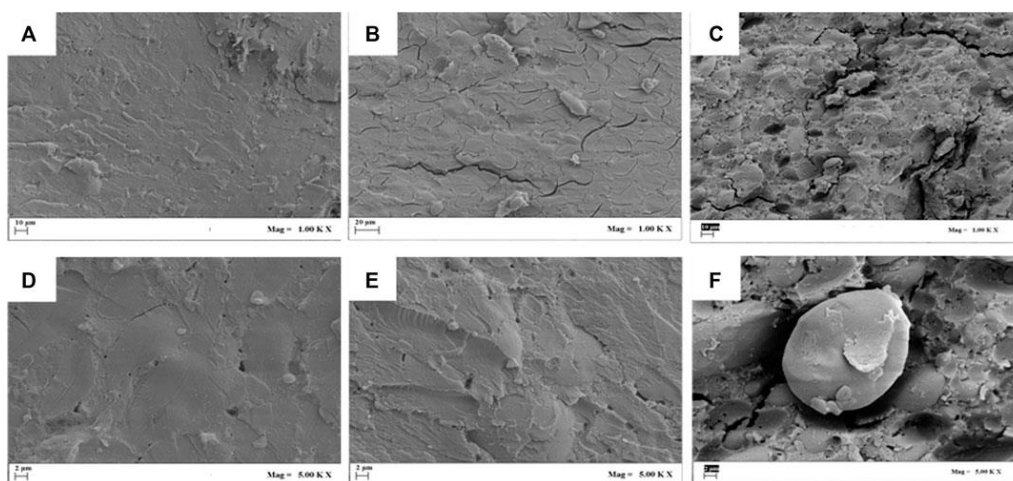


Εικόνα 22: Τιμές σκληρότητας και συνοχής μαγειρεμένων δειγμάτων ζυμαρικών ως συνάρτηση του χρόνου μετά το μαγείρεμα (δείγματα που διατηρούνται σε θερμοκρασία δωματίου). Διαφορετικά γράμματα πάνω από τις γραμμές υποδεικνύουν στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των τριών δειγμάτων στον ίδιο χρόνο ψύξης ($p \leq 0,05$) (Carpentieri et al., 2022).

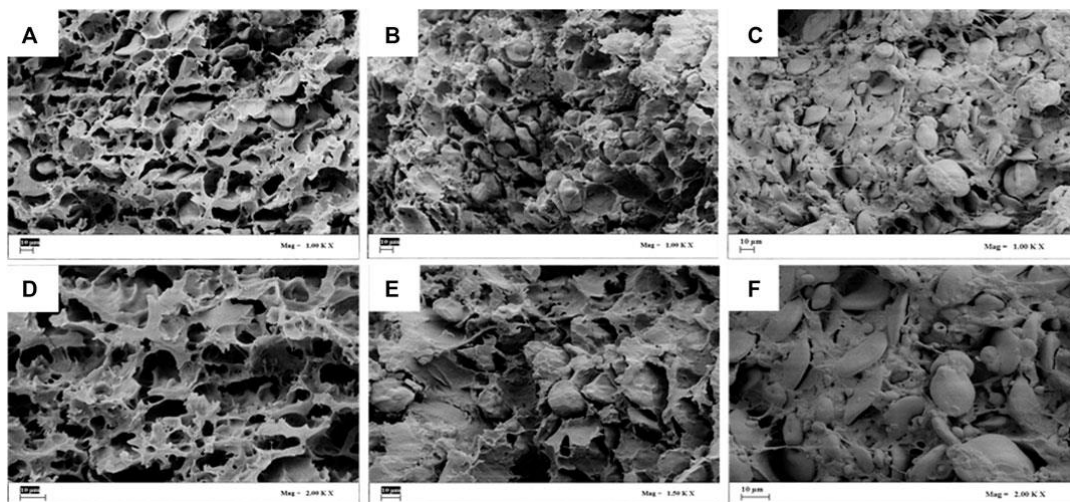
Για την εξέταση της μορφολογίας της επιφάνειας και της διατομής των ξηρών σπαγγέτι, καθώς και της δομής της επιφάνειας των μαγειρεμένων δειγμάτων, χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM). Οι μικρογραφίες σε διαφορετικά επίπεδα μεγέθυνσης παρουσιάζονται στις Εικόνες 23–25. Τα αποτελέσματα της μικροδομικής ανάλυσης συμφωνούν με εκείνα που προέκυψαν από τις δοκιμές μαγειρικών ιδιοτήτων, το προφίλ υψής, τις θερμικές μετρήσεις και τις ιδιότητες πάστας των ζυμαρικών.



Εικόνα 23: Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης της επιφάνειας ξηρών ζυμαρικών [(A, D, G) Δείγμα A σε αυξανόμενη μεγέθυνση 500 X, 1,00K X· 5,00K X, (B, E, H) Δείγμα B σε αυξανόμενη μεγέθυνση 500 X, 1,00K X· 5,00K X· (C, F, I) Δείγμα Γ σε αυξανόμενη μεγέθυνση 500 X, 1,00K X· 5,00K X] (Carpentieri et al., 2022).

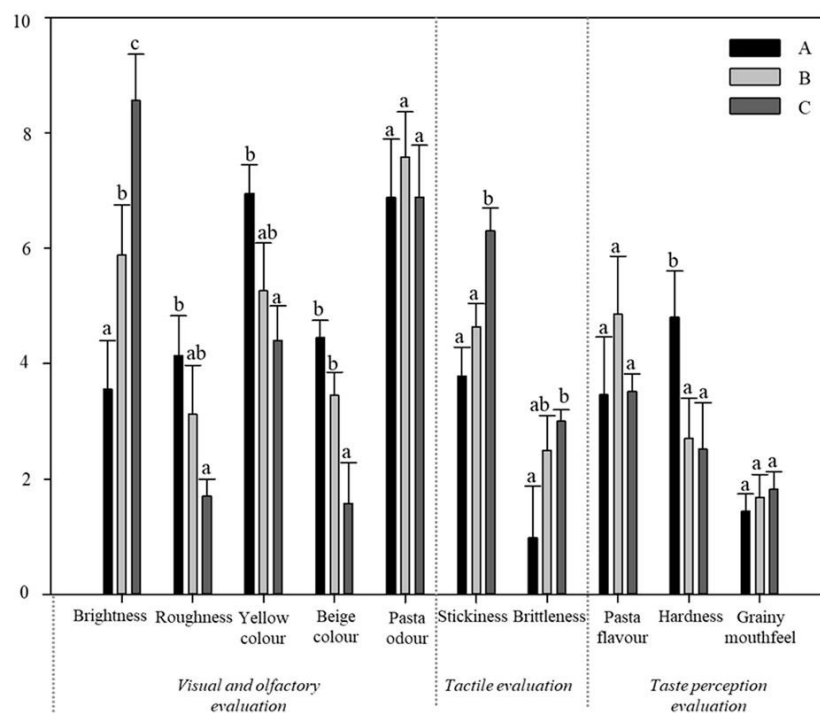


Εικόνα 24: Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης της τομής των ξηρών ζυμαρικών [(A, D) Δείγμα A σε αυξανόμενη μεγέθυνση 1,00K X· 5,00K X, (B, E) Δείγμα B σε αυξανόμενη μεγέθυνση 1,00K X· 5,00K X· (C, F) Δείγμα Γ σε αυξανόμενη μεγέθυνση 1,00K X· 5,00K X] (Carpentieri et al., 2022).



Εικόνα 25: Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης της τομής των μαγειρεμένων ζυμαρικών [(A, D) Δείγμα Α σε αυξανόμενη μεγέθυνση 1,00K X· 2,00K X, (B, E) Δείγμα Β σε αυξανόμενη μεγέθυνση 1,00K X· 2,00K X· (C, F) Δείγμα Γ σε αυξανόμενη μεγέθυνση 1,00K X· 2,00K X] (Carpentieri et al., 2022).

Τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των μαγειρεμένων σπαγγέτι αναφέρονται στην Εικόνα 26. Το Δείγμα Α παρουσίασε αισθητηριακό προφίλ σημαντικά διαφορετικό από τα άλλα δύο δείγματα. Συγκεκριμένα, όσον αφορά την οπτική και ρινική αξιολόγηση, έλαβε υψηλές βαθμολογίες για το μπεζ χρώμα.



Εικόνα 26: Αισθητηριακή αξιολόγηση δειγμάτων σπαγγέτι. Τα διαφορετικά γράμματα πάνω από τις στήλες δηλώνουν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τριών δειγμάτων ($p \leq 0,05$) (Carpentieri et al., 2022).

Τα αποτελέσματα ανέδειξαν σαφή συσχέτιση μεταξύ της ποιότητας του σιμιγδαλιού, των τεχνολογικών σταδίων παραγωγής και των τελικών ιδιοτήτων του προϊόντος. Συγκεκριμένα, η υψηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη συνδέθηκε με βελτιωμένη συνοχή και μειωμένη απώλεια στερεών ουσιών κατά το μαγείρεμα, ενώ η μικροδομή επηρεάστηκε σημαντικά από τις συνθήκες ξήρανσης. Συνολικά, η μελέτη υπογραμμίζει τον κρίσιμο ρόλο τόσο των πρώτων υλών όσο και των παραμέτρων της βιομηχανικής διαδικασίας στη διαμόρφωση της ποιότητας των ζυμαρικών, προσφέροντας χρήσιμες κατευθύνσεις για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής εμπορικών προϊόντων.

2.4.2 Ποιοτικά Χαρακτηριστικά και Έλεγχος Ζυμαρικών κατά το στάδιο της ξήρανσης

Όπως προαναφέρθηκε η ξήρανση αποτελεί μια ευρέως εφαρμοζόμενη τεχνολογία συντήρησης τροφίμων, συμβάλλοντας καθοριστικά στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής τους (Aimoto et al., 2013). Στην περίπτωση των αποξηραμένων noodles, η διαδικασία

αυτή μειώνει την υγρασία σε ασφαλή επίπεδα αποθήκευσης και συντελεί στη διαμόρφωση ενός προϊόντος με υψηλή αποδοχή λόγω της ευκολίας στη χρήση, του χαμηλού κόστους και της σταθερής ποιότητας. Σύμφωνα με το Κινεζικό Ινστιτούτο Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, η παραγωγή αποξηραμένων noodles στην Κίνα ανήλθε το 2023 σε περίπου 6,9 εκατομμύρια τόνους, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της συνεχούς βελτιστοποίησης της τεχνολογίας ξήρανσης.

Η ξήρανση αποτελεί ακόμη μία σύνθετη και κρίσιμη φάση της παραγωγικής διαδικασίας, με καθοριστική επίδραση στην τελική ποιότητα του προϊόντος. Κατά τη διάρκειά της, παρατηρείται συνεχής ανταλλαγή θερμότητας και υγρασίας μεταξύ των ζυμαρικών και του αέρα, οδηγώντας στη δημιουργία διαβαθμίσεων θερμοκρασίας και υγρασίας στο εσωτερικό τους (Mercier et al., 2014). Παράλληλα, λαμβάνουν χώρα σημαντικές φυσικοχημικές μεταβολές, όπως ζελατινοποίηση του αμύλου, μετουσίωση πρωτεϊνών και ενζυματικές ή μη ενζυματικές αντιδράσεις, οι οποίες επηρεάζουν κρίσιμα χαρακτηριστικά όπως η εμφάνιση, το χρώμα, η υφή και η συμπεριφορά κατά το μαγείρεμα (DeNoni & Pagani, 2010, Pasqualone et al., 2014, Ogawa et al., 2017). Ο ακριβής έλεγχος των παραμέτρων ξήρανσης είναι συνεπώς απαραίτητος για τη διασφάλιση της επιθυμητής ποιότητας. Ωστόσο, απρόβλεπτες μεταβολές συνθηκών, όπως ξαφνικές αλλαγές καιρού ή τεχνικές δυσλειτουργίες, ενδέχεται να οδηγήσουν σε απότομες μεταβολές θερμοκρασίας και υγρασίας, προκαλώντας ελαττώματα που συχνά οδηγούν στην απόρριψη του προϊόντος.

Ιδιαίτερη ανησυχία προκαλεί η ανάπτυξη έντονων διαβαθμίσεων υγρασίας, οι οποίες οδηγούν σε ανομοιογενή κατανομή εσωτερικών τάσεων και, τελικά, στη δημιουργία ρωγμών. Οι ρωγμές αυτές εμφανίζονται κυρίως στην επιφάνεια, έχουν ακανόνιστη μορφή και συχνά συσχετίζονται με τα όρια μεγάλων κόκκων αμύλου. Η παραδοσιακή μέθοδος οπτικού ελέγχου στην παραγωγή ζυμαρικών, ιδιαίτερα σε μαζική κλίμακα, είναι χρονοβόρα και ενδέχεται να παρουσιάζει περιορισμένη ακρίβεια και επαναληψιμότητα. Για τον λόγο αυτό, ο τομέας της βιομηχανίας τροφίμων στρέφεται ολοένα και περισσότερο προς τη χρήση τεχνολογιών επεξεργασίας εικόνας για την αυτοματοποιημένη και αντικειμενική αξιολόγηση της ποιότητας των ζυμαρικών (Higuchi & Yoshida, 2014, Mokhtar et al., 2011, Ogawa & Adachi, 2017, Xing et al., 2007). Σύγχρονες τεχνικές, όπως η μικροτομογραφία ακτίνων Χ, έχουν αξιοποιηθεί από τους Liu et al. (2024) για την ανάλυση της εσωτερικής πορώδους δομής των noodles, λαμβάνοντας μετρήσεις για μέσο μέγεθος και αριθμό πόρων καθώς και ποσοστό όγκου. Αντίστοιχα, οι An et al. (2024)

χρησιμοποίησαν εργαλεία επεξεργασίας εικόνας για την ποσοτική ανάλυση της μικροδομής διατομής των μαγειρεμένων noodles. Παρά τις σημαντικές αυτές συνεισφορές, η έρευνα σχετικά με τις ρωγμές τάσης που προκαλούνται από τη διαδικασία ξήρανσης παραμένει ελλιπής και απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση.

Η επιστημονική έρευνα έχει δώσει ιδιαίτερη έμφαση στα ελαττώματα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία της ξήρανσης, η οποία θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς εμπλέκει τη μεταφορά θερμότητας και υγρασίας εντός της δομής του τροφίμου. Κατά την ξήρανση, η μη ομοιόμορφη κατανομή υγρασίας ή/και θερμοκρασίας προκαλεί ανομοιογενή συρρίκνωση, δημιουργώντας εσωτερικές τάσεις. Όταν αυτές οι τάσεις ξεπεράσουν ένα συγκεκριμένο όριο, είναι πιθανή η εμφάνιση ρωγμών (Liu et al, 1997). Οι ρωγμές στα ζυμαρικά συνδέονται με ανεπαρκή αφυδάτωση του γλουτενικού πλέγματος, το οποίο διαχωρίζεται από το άμυλο (Sung & Stone, 2005).

Η επίδραση της ξήρανσης στον σχηματισμό ρωγμών και στο σπάσιμο των ζυμαρικών είναι τόσο σημαντική, ώστε έχουν αναπτυχθεί μαθηματικά μοντέλα για την πρόβλεψη αυτών των φαινομένων, βασισμένα σε μεταβολές της συρρίκνωσης και των μηχανικών ιδιοτήτων του προϊόντος (Liu et al., 1997, Sung & Stone, 2005). Ιδιαίτερα κρίσιμες θεωρούνται δύο χρονικές φάσεις της ξήρανσης: η αρχική φάση, όπου παρατηρείται δημιουργία ρωγμών στην επιφάνεια, και η τελική φάση, κατά την οποία οι ρωγμές εμφανίζονται στον πυρήνα των ζυμαρικών (Andrieu et al., 1988). Η άμεση έκθεση των ζυμαρικών που έχουν υποστεί εξώθηση σε υψηλές θερμοκρασίες θεωρείται βασική αιτία για την πρόκληση ρωγμών και θραύσεων, καθώς οδηγεί σε ταχύτατη και μη ομοιόμορφη απομάκρυνση του νερού. Ωστόσο, ο συνδυασμός υψηλών θερμοκρασιών με αέρα υψηλής σχετικής υγρασίας φαίνεται να μειώνει τον κίνδυνο σχηματισμού ρωγμών.

Ρωγμές και φαινόμενα θραύσης ενδέχεται να εμφανιστούν όχι μόνο κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, αλλά και μεταγενέστερα, ως αποτέλεσμα είτε της ενίσχυσης προϋπαρχουσών εσωτερικών τάσεων είτε της δημιουργίας νέων, οι οποίες υπερβαίνουν το κρίσιμο όριο αντοχής του προϊόντος. Σε περιπτώσεις όπου οι αρχικές τάσεις επιδεινώνονται, τα ελαττώματα παρατηρούνται συχνά κατά μήκος του άξονα μακρόστενων τύπων ζυμαρικών, ακόμη και αν δεν ήταν ορατά αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας ξήρανσης. Αντίστοιχα, η ανάπτυξη νέων τάσεων μπορεί να οφείλεται σε μηχανικές καταπονήσεις, όπως συγκρούσεις μεταξύ τεμαχίων ή με τις επιφάνειες του εξοπλισμού παραγωγής και μεταφοράς (Higuchi & Yoshida, 2014).

Στο πλαίσιο αυτό, οι Ghaedniaa και Aziznaghsh (2011) πρότειναν έναν αλγόριθμο βασισμένο σε αριθμητικές μεθόδους για την εκτίμηση της παραμόρφωσης και του μηχανισμού θραύσης εύθραυστων υλικών, όπως τα ζυμαρικά τύπου σπαγγέτι, κατά την πρόσκρουσή τους σε άκαμπτες επιφάνειες. Δεδομένου ότι ο χρόνος επαφής της σύγκρουσης είναι εξαιρετικά σύντομος, η διάδοση των προκαλούμενων τάσεων δεν είναι στιγμιαία, με αποτέλεσμα να παρατηρείται συγκέντρωση τάσεων στην περιοχή κοντά στο σημείο κρούσης. Για την πρόβλεψη της θραύσης απαιτείται η συνεκτίμηση των τριών βασικών τύπων μηχανικών τάσεων —διατμητικών, θλιπτικών και εφελκυστικών— οι οποίες παρουσιάζουν τα κρίσιμα μέγιστα σε διαφορετικές αποστάσεις από το σημείο επαφής.

Το αποδεκτό επίπεδο παρουσίας ρωγμών στα ζυμαρικά διαφέρει ανάλογα με τις εσωτερικές προδιαγραφές ποιότητας κάθε παραγωγικής μονάδας. Ωστόσο, σύμφωνα με τη διεθνή πρακτική, το επιτρεπόμενο ποσοστό τεμαχισμένων ή ραγισμένων προϊόντων στις περισσότερες περιπτώσεις δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το 2% της συνολικής παραγωγής (Turnbull, 2001).

2.5 Επίδραση της ξήρανσης στη μαζική μεταφορά υγρασίας και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των ζυμαρικών

Η ποιότητα μαγειρέματος των ζυμαρικών και η αντίληψη του καταναλωτή για το τελικό προϊόν εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τις συνθήκες ξήρανσης. Εάν δεν προορίζονται να διατεθούν ως φρέσκα προϊόντα με περιορισμένη διάρκεια ζωής, απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία για τη διασφάλιση της βιοχημικής και μικροβιολογικής σταθερότητάς τους (Johnston, 2001). Σε βιομηχανικό επίπεδο, η ξήρανση πραγματοποιείται συνήθως μέχρι η περιεκτικότητα σε υγρασία να μειωθεί στα 120 g/kg, ενώ ο Ομοσπονδιακός Κώδικας Κανονισμών επιτρέπει μέγιστη υγρασία 130 g/kg (Stuknytė et al., 2014). Σήμερα, κυριαρχούν τεχνολογίες ξήρανσης υψηλής (HighTemperature-HT) και πολύ υψηλής θερμοκρασίας (VeryHighTemperature-VHT), οι οποίες μειώνουν τον χρόνο επεξεργασίας και περιορίζουν τον μικροβιακό πληθυσμό σε σύγκριση με τη χαμηλή θερμοκρασία (Güler et al., 2002). Ωστόσο, οι αυξημένες θερμοκρασίες μπορούν να επηρεάσουν το χρώμα, προκαλώντας καφέ αποχρωματισμό μέσω αντιδράσεων Maillard (Anese et. al., 1999).

Η ξήρανση ζυμαρικών σε υψηλή και πολύ υψηλή θερμοκρασία (high temperature drying, HTD) αποτελεί ευρέως διαδεδομένη βιομηχανική πρακτική, καθώς μειώνει σημαντικά τον χρόνο επεξεργασίας και περιορίζει την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Ωστόσο, η έντονη θερμική καταπόνηση που υφίσταται το προϊόν μπορεί να επηρεάσει αρνητικά ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, η ταχεία απομάκρυνση της υγρασίας δημιουργεί απότομες διαβαθμίσεις υγρασίας μεταξύ του πυρήνα και της επιφάνειας, αυξάνοντας τον κίνδυνο εμφάνισης μακροσκοπικών ρωγμών που επηρεάζουν την ακεραιότητα και την εμπορική εμφάνιση των ζυμαρικών (Marchylo & Dexter, 2001). Επιπλέον, οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες δύνανται να επιφέρουν καστανό αποχρωματισμό λόγω αντιδράσεων Maillard, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται μεταβολή στη γεύση. Παρά τα μειονεκτήματα αυτά, η HTD συμβάλλει στη βελτίωση της συνεκτικότητας του αμύλου και της γλουτένης, προσφέροντας αυξημένη αντοχή στο μαγείρεμα και μειωμένη απώλεια στερεών στο νερό (Anese et al., 1999, Güler et al., 2002).

Η ποιότητα μαγειρέματος των ζυμαρικών που έχουν αποξηρανθεί σε υψηλές θερμοκρασίες (HT) ή πολύ υψηλές θερμοκρασίες (VHT) είναι ανώτερη από αυτή των ζυμαρικών που έχουν ξηρανθεί σε χαμηλές θερμοκρασίες (DeStefanis & Sgrulletta, 1990). Μερικά άλλα πλεονεκτήματα της ξήρανσης HT σε θερμοκρασίες περίπου 70°C και VHT σε θερμοκρασίες πάνω από 80°C είναι η βελτίωση στο χρώμα του προϊόντος, η μείωση των μικροοργανισμών (συνολικός αριθμός) και οι μικρότεροι χρόνοι στεγνώματος (DeStefanis & Sgrulletta, 1990). Αποτελέσματα από έρευνες έχουν δείξει ότι η ξήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες και σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες οδηγεί στη μείωση της λυσίνης που περιέχει το σιμιγδάλι σε ποσοστό 10-11% και πως το χρώμα των ζυμαρικών είναι πιο κιτρινωπό το οποίο είναι και το επιθυμητό. Ακόμη οι υψηλές θερμοκρασίες βοηθάνε στην αύξηση της έκτασης της μετουσίωσης της πρωτεΐνης με αποτέλεσμα την ακαμψία και τη σφριγηλότητα των ζυμαρικών. Επιτυγχάνεται καλύτερο αποτέλεσμα ως προς την ποιότητα του τελικού προϊόντος και αυξάνεται η ικανότητα συγκράτησης της σάλτσας (Masato et al., 2021, Tagliasco et al., 2021, Ohmura et al., 2023). Στις περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει κάποιο λάθος στο διάγραμμα ξήρανσης το χρώμα των ζυμαρικών γίνεται πιο σκούρο. Επί του παρόντος, οι περισσότεροι κατασκευαστές ζυμαρικών προτιμούν τις τεχνολογίες ξήρανσης HT και VHT για την παραγωγή ζυμαρικών τους.

Η ποιότητα μαγειρέματος των ζυμαρικών έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη ζελατινοποίηση του αμύλου και τον σχηματισμό πρωτεϊνικού δικτύου

(Resmini & Pagani, 1983). Έτσι, είναι πιθανό οι ιδιότητες του αμύλου να συμβάλλουν επίσης στην ποιότητα μαγειρέματος των ζυμαρικών. Αν και έως και το 80% της ξηρής ύλης του σιμιγδαλιού είναι άμυλο, έχει λάβει περιορισμένη ερευνητική προσοχή (Lintas & DAppolonia, 1973). Οι Yue κ.ά (1999) μελέτησαν τις επιδράσεις των θερμοκρασιών ξήρανσης στις φυσικοχημικές ιδιότητες του αμύλου που απομονώθηκε από τα ζυμαρικά και ανέφεραν ότι εμφανίστηκαν μικρές αλλά όχι αμελητέες αλλαγές στις ιδιότητες του αμύλου που παρήχθησαν κατά την ξήρανση. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες ξήρανσης επιτρέπουν τον σχηματισμό ενός πιο συμπαγούς δικτύου γλουτένης, με αποτέλεσμα το άμυλο να απορροφά λιγότερο νερό. Κατέληξαν επίσης στο συμπέρασμα ότι ορισμένες από τις ποιοτικές βελτιώσεις στα αποξηραμένα με HT και VHT ζυμαρικά που συμβαίνουν πρέπει να αποδοθούν σε αυτές τις αλλαγές.

Γενικά, τα προϊόντα ζυμαρικών ξηραίνονται σε ένα τελικό ποσοστό υγρασίας περίπου 11-12%. Ο ολικός χρόνος ξήρανσης κυμαίνεται από 6 έως 24 ώρες ανάλογα με τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά της εφαρμοζόμενης μεθόδου. Μετά την ξήρανση τα προϊόντα ψύχονται, τεμαχίζονται και τελικώς συσκευάζονται (Berteli, 2005).

2.6 Ρωγμές μετά το στάδιο της ξήρανσης

Στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στη βιομηχανική μονάδα παραγωγής ζυμαρικών στη Foggia, Ιταλία (Baiano et.al., 2019), στόχος ήταν η διερεύνηση των συνθηκών δημιουργίας ρωγμών και σπασιμάτων κατά τη βιομηχανική επεξεργασία. Η έρευνα επικεντρώθηκε στον εντοπισμό των κρίσιμων σταδίων της παραγωγικής γραμμής όπου παρατηρείται η μεγαλύτερη υποβάθμιση της ακεραιότητας των προϊόντων. Για τον σκοπό αυτό σχεδιάστηκε ένα πείραμα πεδίου, το οποίο βασίστηκε στη συστηματική δειγματοληψία 4 τύπων ζυμαρικών σε πολλαπλά σημεία της γραμμής παραγωγής, ξεκινώντας από την έξοδο του ξηραντηρίου και καταλήγοντας στο τελικό στάδιο συσκευασίας. Κάθε δείγμα εξετάστηκε με οπτικό έλεγχο, ώστε να διακριθούν δύο κατηγορίες βλαβών: οι ρωγμές, δηλαδή λεπτές σχισμές στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό του προϊόντος, και τα σπασίματα, δηλαδή πλήρης διάσπαση του τεμαχίου. Τα χαρακτηριστικά των δειγμάτων σιμιγδαλιού σκληρού σιταριού και των 4 τύπων ζυμαρικών που εξετάστηκαν σε αυτή τη μελέτη συνοψίζονται στους Πίνακες 8 και 9, αντίστοιχα.

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά των δειγμάτων σκληρού σιμιγδαλιού που χρησιμοποιήθηκαν. Ο τύπος Β εμφάνισε την υψηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη ($14,5 \pm 0,3\%$), ενώ οι τύποι Α, C, D, E και F παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές ($13 \pm 0,2\%$ και $12 \pm 0,3\%$). Παράλληλα, ο τύπος Β κατέγραψε τον χαμηλότερο δείκτη γλουτένης ($80 \pm 3\%$), σε αντίθεση με τους υπόλοιπους που εμφάνισαν σημαντικά υψηλότερες τιμές ($95 \pm 1\%$ και $94 \pm 1\%$). Οι διαφορές αυτές κρίθηκαν στατιστικά σημαντικές ($p < 0,05$) σύμφωνα με τη δοκιμή LSD (Baiano et al, 2019).

Brand	Protein content (%)	Gluten index
A	$13 \pm 0.2b$	$95 \pm 1b$
B	$14.5 \pm 0.3c$	$80 \pm 3a$
C, D, E, F	$12 \pm 0.3a$	$94 \pm 1b$

Πίνακας 9: Διαστάσεις των διαφορετικών τύπων ζυμαρικών, συμπεριλαμβανομένου του μήκους, της διαμέτρου και του πάχους για διάφορα σχήματα (Baiano et al, 2019).

Pasta type	Length (mm)	Diameter (mm)	Thickness (mm)
<i>Rigatoni</i>	55.5 ± 0.2	15.1 ± 0.1	1.05 ± 0.01
<i>Mezzi rigatoni</i>	39.0 ± 0.2	15.1 ± 0.1	1.10 ± 0.02
<i>Zitoni tagliati</i>	39.0 ± 0.2	9.8 ± 0.1	1.10 ± 0.02
<i>Maccheroni</i>	39.0 ± 0.2	11.3 ± 0.1	1.04 ± 0.01

Τα ριγκατόνι παρουσιάζουν αυξημένα ελαττώματα, κυρίως ρωγμές, μετά τη διαδικασία ξήρανσης, με την ένταση του προβλήματος να ενισχύεται κατά τον χειρισμό τους — ιδιαίτερα στο στάδιο μεταξύ της χοάνης ζυγαριάς πολλαπλών κεφαλών και του σταθμού συσκευασίας — και να επιδεινώνεται περαιτέρω τόσο κατά τον χειρισμό των συσκευασμένων ζυμαρικών όσο και κατά την προετοιμασία των χαρτοκιβωτίων (Πίνακας 10).

Πίνακας 10: Τα ριγκατόνι εμφανίζουν αυξημένες ρωγμές μετά την ξήρανση, οι οποίες εντείνονται κατά τον χειρισμό και τη συσκευασία (Baiano et al, 2019).

Sampling point	% cracks	% breakages
Conveyor belt	2a	0a
Vibrating sieve	2a	0a
Loading hopper of multi-head scales	2a	0a
Package after control by metal detector	8.7±1.5b	1±0.5b
Package withdrawn from the carton box	14±1c	1.3±0.6b

Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι οι σοβαρότερες αλλοιώσεις εμφανίζονται κατά το στάδιο της συσκευασίας, όπου οι ρωγμές αυξήθηκαν κατά 335 % και τα σπασίματα κατά 100 % σε σχέση με τα προηγούμενα στάδια. Αντίστοιχα, κατά την τοποθέτηση των πακέτων σε χαρτοκιβώτια παρατηρήθηκε περαιτέρω επιδείνωση, με αύξηση ρωγμών κατά 60 % και σπασιμάτων κατά 30 %. Επίσης, η ανάλυση κατέδειξε ότι η γεωμετρία των ζυμαρικών επηρεάζει καθοριστικά την αντοχή τους: τα μακρύτερα και λεπτότερα σχήματα παρουσίασαν σαφώς υψηλότερα ποσοστά φθοράς σε σχέση με τα πιο κοντά και παχύτερα.

Τέλος, εφαρμόστηκαν τεχνικές παρεμβάσεις με σκοπό τον περιορισμό των μηχανικών καταπονήσεων. Συγκεκριμένα, δοκιμάστηκε η εγκατάσταση ρυθμιστών πτώσης (shutters) στη συσκευαστική μηχανή, οι οποίοι μείωσαν την κινητική ενέργεια πρόσκρουσης κατά τη φάση της πτώσης. Η παρέμβαση αυτή οδήγησε σε μείωση των ρωγμών κατά περίπου 40 % και των σπασιμάτων σχεδόν κατά 90 %, επιβεβαιώνοντας ότι οι βασικές βλάβες δεν προέρχονται από τη διαδικασία ξήρανσης αλλά από τις μηχανικές καταπονήσεις της συσκευασίας (Πίνακας 11).

Πίνακας 11: Ρωγμές και σπασίματα των ριγκατόνι πριν και μετά την τροποποίηση της γραμμής συσκευασίας (Baiano et al, 2019).

Packaginglines	Before	After
% cracks ¹	7.0±4.1b	10.7±1.9a
% breakages	1.4±0.5b	0.1a

Η μελέτη καταδεικνύει ότι η βελτιστοποίηση του τελικού σταδίου της παραγωγής αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τη διασφάλιση της ποιότητας και τη μείωση των απωλειών στο βιομηχανικό προϊόν.

2.7 Η γλουτένη και ο ρόλος της στην ποιότητα των ζυμαρικών

2.7.1 Η γλουτένη και το ασκορβικό οξύ

Η γλουτένη αποτελεί ένα από τα βασικότερα συστατικά των δημητριακών και ιδιαίτερα του σιμιγδαλιού σκληρού σίτου, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρασκευή ζυμαρικών. Η κατανόηση της φύσης και του ρόλου της είναι ουσιώδης τόσο σε βιολογικό όσο και σε τεχνολογικό επίπεδο, καθώς η γλουτένη συμβάλλει καθοριστικά στη δομή, την ελαστικότητα και τη συνοχή της ζύμης, επηρεάζοντας άμεσα την ποιότητα και την αντοχή των τελικών προϊόντων. Η γλουτένη μπορεί να οριστεί ως ένα συνεκτικό και ιξωδοελαστικό σύμπλεγμα πρωτεϊνών, το οποίο προκύπτει ως παραπροϊόν κατά την απομόνωση του αμύλου από το αλεύρι σίτου. Από βιολογικής άποψης, θεωρείται ότι προέρχεται από τις πρωτεΐνες αποθήκευσης του ενδοσπέρμιου του κόκκου του σιταριού (Schofield & Booth, 1983). Πρόκειται για την πρωτεΐνη που καθιστά δυνατή τη δημιουργία ζύμης, προσδίδοντας στο σιτάρι τη μοναδική του ικανότητα να παράγει προϊόντα με διογκωμένο όγκο.

Παρά το γεγονός ότι η τεχνική διαχωρισμού του αλευριού σίτου σε άμυλο και γλουτένη είναι γνωστή εδώ και περίπου τρεις αιώνες, η συστηματική εμπορική εκμετάλλευση της γλουτένης ξεκίνησε μόλις το δεύτερο μισό του 20ού αιώνα. Τα τελευταία πενήντα χρόνια, η γλουτένη έχει εξελιχθεί σε μια φυτικής προέλευσης πρωτεΐνη με αυξανόμενη βιομηχανική σημασία, χρησιμοποιούμενη τόσο ως ενισχυτικό του αλευριού για την

παραγωγή ψωμιού όσο και ως συστατικό σε ποικιλία τροφίμων αλλά και μη εδώδιμων προϊόντων (Day, 2011). Η πιο διαδεδομένη της μορφή είναι η αποξηραμένη «ζωτική γλουτένη σίτου», η οποία παρασκευάζεται βιομηχανικά μέσω τεχνικών υγρής εκχύλισης και ελεγχόμενης αφυδάτωσης, διατηρώντας τις βασικές λειτουργικές της ιδιότητες μετά την επανυδάτωση.

Η γλουτένη παρουσιάζει ικανότητα σχηματισμού ελαστικού πλέγματος κατά την ενυδάτωση, συγκράτησης υγρασίας και θερμοσκληρυνόμενης συμπεριφοράς, γεγονός που την καθιστά χρήσιμη σε πολλές εφαρμογές, τόσο σε προϊόντα διατροφής όσο και σε βιομηχανικές χρήσεις πέραν των δημητριακών. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί τροποποιημένες μορφές γλουτένης με ευρύτερες εφαρμογές, λόγω του χαμηλότερου κόστους σε σύγκριση με άλλες πηγές πρωτεΐνης, όπως αυτές που προέρχονται από γάλα ή σόγια (Day, 2011).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο όρος «γλουτένη» χρησιμοποιείται επίσης για την αναφορά στην πρωτεϊνική ύλη που απομένει μετά την απομάκρυνση του αμύλου από τον αραβόσιτο· ωστόσο, η λεγόμενη «γλουτένη καλαμποκιού» παρουσιάζει πολύ διαφορετικές λειτουργικές ιδιότητες σε σχέση με τη γλουτένη σίτου. Παράλληλα, ο όρος συσχετίζεται και με μια ομάδα πρωτεϊνών που ευθύνονται για την πρόκληση της κοιλιοκάκης, περιλαμβάνοντας τα αποθηκευτικά πρωτεϊνικά κλάσματα σίτου, σίκαλης, κριθαριού, τριτικάλης και πιθανώς βρώμης (Day, 2011).

Η γλουτένη περιέχεται σε δημητριακά όπως το σιτάρι, η σίκαλη, το κριθάρι, η τριτικάλε, η όλυρα, η βρώμη και το αλεύρι καμούτ, καθώς και στα περισσότερα αρτοσκευάσματα, ζυμαρικά, κέικ και μπισκότα (Gobbetti et al., 2007). Επιπλέον, μπορεί να αξιοποιηθεί ως πρόσθετο για την αύξηση του όγκου ή της πυκνότητας τροφίμων, γεγονός που οδηγεί στη χρήση της σε προϊόντα όπως χοτ ντογκ, κονσερβοποιημένες ή αποξηραμένες σούπες, επεξεργασμένα τυριά και σάλτσες με βάση την κρέμα (Gobbetti et al., 2007).

Η αντικατάσταση της γλουτένης αποτελεί μια τεράστια τεχνολογική πρόκληση, καθώς είναι μια σημαντική πρωτεΐνη που σχηματίζει δομή στα προϊόντα αρτοποιίας και ζυμαρικών. Σχηματίζοντας ένα ισχυρό πρωτεϊνικό δίκτυο, το άμυλο διατηρείται στα ζυμαρικά κατά το μαγείρεμα. Όταν χρησιμοποιούνται πρώτες ύλες χωρίς γλουτένη, οι ιξωδοελαστικές ιδιότητες της ζύμης, η ποιότητα μαγειρέματος και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά

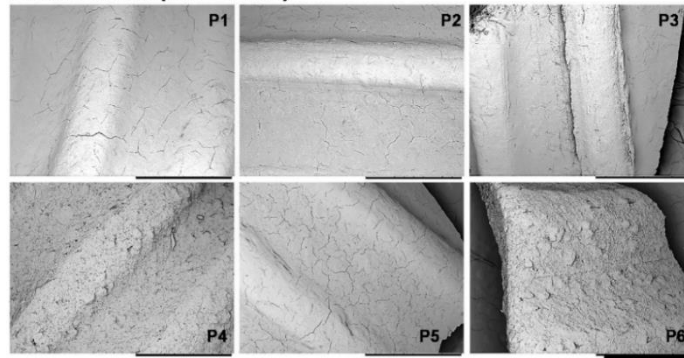
μπορεί επίσης να αλλάξουν (DeArcangelis et al., 2020). Επομένως, απαιτούνται ουσίες που μιμούνται αυτές τις ιδιότητες.

Για τον σκοπό αυτό, πραγματοποιήθηκε μελέτη των Bouziane κ.ά (2023) η οποία διερεύνησε την επίδραση αλκαλικών αλάτων (Na_2CO_3 , K_2CO_3) και της πρωτεΐνης ορού γάλακτος (Whey Protein Isolate, WPI) στην ποιότητα ζυμαρικών χωρίς γλουτένη, που παρασκευάστηκαν από άλευρο ρυζιού και καλαμποκιού. Οι ερευνητές στόχευσαν να βελτιώσουν τις τεχνολογικές και οργανοληπτικές ιδιότητες των ζυμαρικών, δεδομένης της έλλειψης γλουτένης, η οποία συνήθως μειώνει τη συνοχή και την ποιότητα στο μαγείρεμα.

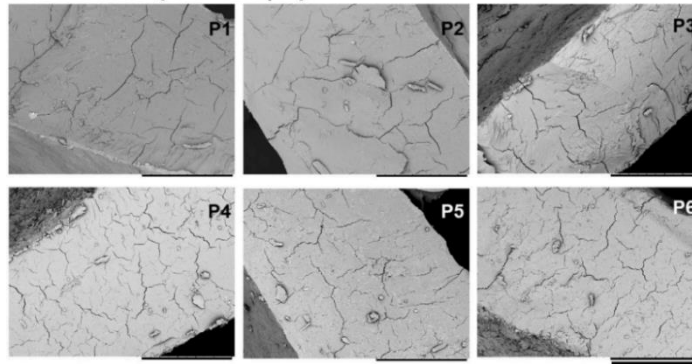
Όσον αφορά την δομή της επιφάνειας, όπως έχει αναφερθεί και από τους Li et al. (2018) σε αλκαλικά noodles σίτου, τα ζυμαρικά από ρύζι-καλαμπόκι εμφάνισαν ορατά ανοίγματα στη διατομή τους, πιθανόν λόγω του ταχέως σχηματισμού πρωτεϊνικού δικτύου που οδηγεί σε λιγότερο συνεκτική επιφάνεια και, κατά συνέπεια, σε μεγαλύτερες απώλειες στερεών κατά το μαγείρεμα. Η αύξηση της συγκέντρωσης αλατιού (από P1 σε P3) μείωσε το μέγεθος των οπών έως και 80%. Το δείγμα P5 παρουσίασε σημαντικά μικρότερες οπές από τον μάρτυρα, αλλά μεγαλύτερες σε σύγκριση με το P3, γεγονός που υποδηλώνει ότι όχι μόνο η παρουσία αλλά και το στάδιο προσθήκης των αλάτων επηρεάζει το πορώδες.

Η ενσωμάτωση πρωτεϊνών αύξησε τον αριθμό των οπών (ιδίως στο P4), μειώνοντας όμως τις διαστάσεις τους, ενώ η κατανομή τους ήταν πιο ανομοιογενής. Η εξωτερική επιφάνεια των ζυμαρικών εμφάνιζε κατάγματα σε όλα τα δείγματα (Εικόνα 27), χωρίς στατιστικά σημαντικές διαφορές ($p > 0,05$). Σε χαμηλή μεγέθυνση, η επιφάνεια ήταν γενικά λεία, εκτός από τα δείγματα με πρωτεΐνες (P4 και P6), τα οποία παρουσίαζαν έντονη τραχύτητα και αυξημένα κατάγματα (Εικόνα 28). Σε μεγαλύτερες μεγεθύνσεις, η προοδευτική αύξηση της αλατότητας (P1–P3) συσχετίστηκε με διαχωρισμό υλικού από τη μήτρα, με το P3 να εμφανίζει πιο διαβρωμένη όψη σε σχέση με τα P1 και P2. Η προσθήκη πρωτεϊνών στο P4 οδήγησε σε μειωμένη ομοιογένεια, ενώ στο P6, η ταυτόχρονη παρουσία αλάτων επέτρεψε την εκ νέου ανάδειξη κόκκων αμύλου. Το δείγμα P5 εμφάνισε χαρακτηριστικά παρόμοια με τα P1 και P2.

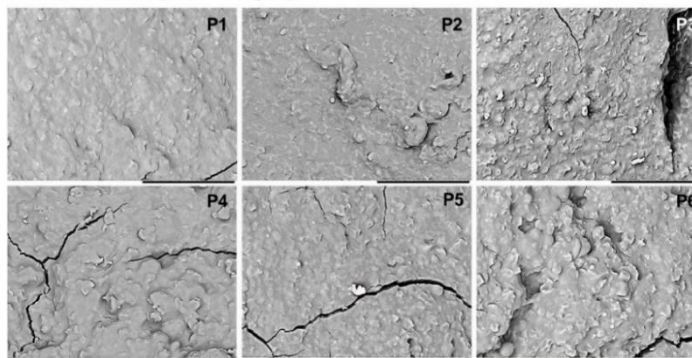
Pasta surface (bar = 2 mm)



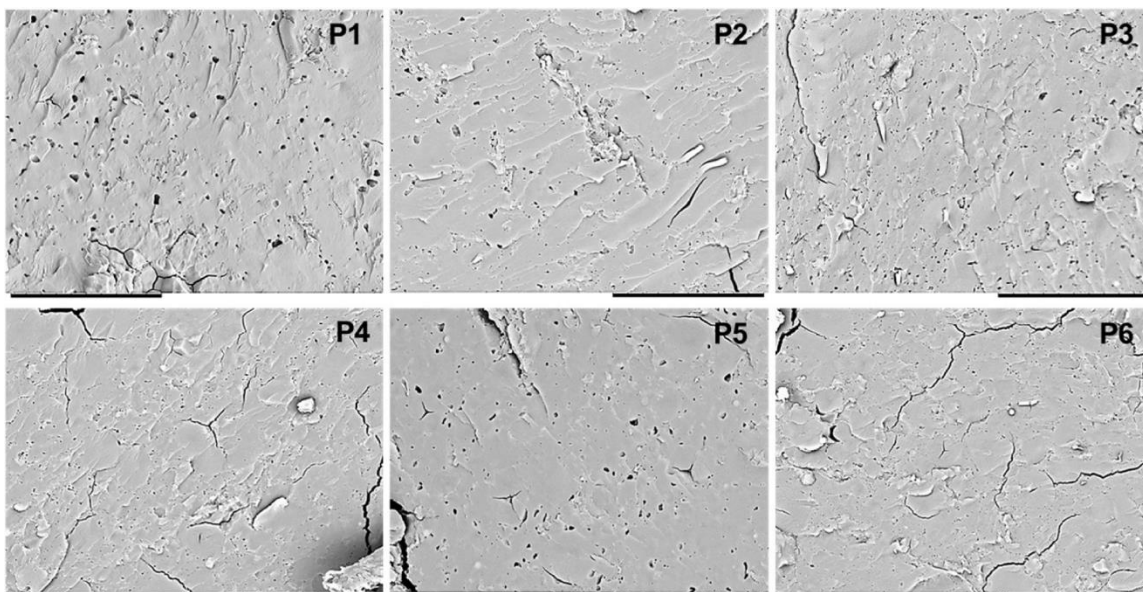
Pasta surface (bar = 500 μ m)



Pasta surface (bar = 50 μ m)



Εικόνα 27: Εικόνες της επιφάνειας ζυμαρικών με ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης: P1, δείγμα ελέγχου (αναλογία ρύζι:καλαμπόκι 2:1). P2, ζυμαρικά με προσθήκη 0,5% αλκαλικών αλάτων. P3, ζυμαρικά με 1,0% αλκαλικά άλατα. P4, ζυμαρικά με 5% απομονωμένη πρωτεΐνη ορού γάλακτος. P5, ζυμαρικά παραγόμενα από σφαιρίδια με 1% αλκαλικά άλατα. P6, ζυμαρικά από σφαιρίδια με 1% αλκαλικά άλατα και 5,0% απομονωμένη πρωτεΐνη ορού γάλακτος (Bouziane et.al, 2023).



Εικόνα 28:Εικόνες ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης της επιφάνειας της διατομής των ζυμαρικών. P1, ζυμαρικά ελέγχου (ρύζι:καλαμπόκι 2:1). P2, ζυμαρικά με 0,5% αλκαλικά άλατα. P3, ζυμαρικά με 1,0% αλκαλικά άλατα. P4, ζυμαρικά με 5% απομονωμένη πρωτεΐνη ορού γάλακτος. P5, ζυμαρικά από σφαιρίδια που περιέχουν 1% αλκαλικά άλατα. P6, ζυμαρικά από σφαιρίδια που περιέχουν 1% αλκαλικά άλατα + 5,0% απομονωμένη πρωτεΐνη ορού γάλακτος (Bouziane et.al, 2023).

Το ασκορβικό οξύ (AsA) και οι συγγενείς του ενώσεις έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί παράγοντες βελτίωσης στη διαδικασία παραγωγής αρτοσκευασμάτων. Το AsA κατατάσσεται στις ουσίες που θεωρούνται ασφαλείς για χρήση στα τρόφιμα και συναντάται φυσικά σε πολλά φυτικά προϊόντα. Η προσθήκη του παρουσιάζει πολλαπλά οφέλη, ιδιαίτερα στην τεχνολογία ζυμαρικών που παρασκευάζονται από αλεύρι με ασθενή ικανότητα σχηματισμού γλουτένης, καθώς συμβάλλει στη μείωση της απώλειας στερεών ουσιών κατά το μαγείρεμα και περιορίζει την ανεπιθύμητη συσσωμάτωση των ζυμαρικών (Every et al., 2005).

Σε μοριακό επίπεδο, το AsA ενισχύει τη δομή της γλουτένης μέσω της οξείδωσης των θειολικών ομάδων ($-SH$) σε δισουλφιδικές γέφυρες ($-S-S-$), ενισχύοντας τη συνοχή και τη σταθερότητα της ζύμης. Οι βελτιώσεις αυτές αντανakλώνται στις ρεολογικές παραμέτρους, όπως καταγράφονται με τη βοήθεια οργάνων μέτρησης όπως το εκτενόγραμμα και το κυψελόγραμμα, όπου παρατηρείται αύξηση της αντοχής της ζύμης και μείωση της εκτατότητάς της.

Επιπλέον, η προσθήκη ασκορβικού οξέος και συναφών ενώσεων του, όπως το DeHydro-L-AsA (DHA) και το 2,3-DiKeto-L-Gulonic οξύ (DKG), επηρεάζει σημαντικά τις ρεολογικές ιδιότητες του μίγματος αλεύρου–νερού κατά την ανάμειξη. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί αύξηση της σκληρότητας της ζύμης, γεγονός που μπορεί να βελτιώσει τη συμπεριφορά της κατά την επεξεργασία και το τελικό ποιοτικό προφίλ του προϊόντος (Olanca et al., 2009).

2.7.2 Εξώθηση και η επίδρασή της στην ποιότητα των ζυμαρικών χωρίς γλουτένη

Η εξώθηση αποτελεί βασική τεχνολογική διεργασία στην παραγωγή ζυμαρικών χωρίς γλουτένη, με σημαντική επίδραση στην τελική ποιότητα του προϊόντος (Schober&Bean, 2012). Μέσω αυτής της μεθόδου, η ζύμη διαμορφώνεται και αποκτά συγκεκριμένο σχήμα και υφή, ενώ παράλληλα διαμορφώνονται κρίσιμα λειτουργικά και αισθητικά χαρακτηριστικά, όπως:

I. Σχήμα και Υφή

Η εξώθηση επιτρέπει ακριβή έλεγχο της μορφής και της υφής των ζυμαρικών. Παράμετροι όπως το σχήμα της μήτρας, η πίεση και η θερμοκρασία επεξεργασίας επηρεάζουν άμεσα την εμφάνιση και την αίσθηση στο στόμα του τελικού προϊόντος. Η κατάλληλη ρύθμιση αυτών των παραμέτρων είναι απαραίτητη για την αποφυγή ανεπιθύμητων υφών, όπως υπερβολική απαλότητα ή ευθραυστότητα(Mishra, et.al., 2023).

II. Ποιότητα Μαγειρέματος

Η διαδικασία εξώθησης καθορίζει την ικανότητα των ζυμαρικών να διατηρούν τη δομή και την υφή τους κατά το βράσιμο. Η σωστή εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής διασφαλίζει ομοιόμορφο μαγείρεμα και αποφυγή αποσύνθεσης του προϊόντος κατά τη θερμική επεξεργασία(Mishra et.al., 2023).

III. Αλληλεπίδραση Συστατικών

Η εξώθηση επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο τα συστατικά της ζύμης (π.χ. άμυλα, πρωτεΐνες, συνδετικά) αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αυτή η αλληλεπίδραση καθορίζει την ομοιογένεια της ζύμης, τον βαθμό ενυδάτωσης και τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος(Mishra et.al., 2023).

IV. Ξήρανση και Σταθερότητα Προϊόντος

Τα ζυμαρικά που έχουν υποστεί εξώθηση υποβάλλονται σε διαδικασία ξήρανσης για τη μείωση της υγρασίας και την ενίσχυση της σταθερότητας στο ράφι. Ο τρόπος και οι συνθήκες ξήρανσης (θερμοκρασία, διάρκεια) επηρεάζουν άμεσα τη συνολική ποιότητα, την υφή και τη διάρκεια ζωής του προϊόντος.

2.7.3 Μέθοδοι ξήρανσης και οι επιπτώσεις τους στην υφή των ζυμαρικών χωρίς γλουτένη

Η ξήρανση αποτελεί καθοριστικό στάδιο στην παραγωγική διαδικασία των ζυμαρικών χωρίς γλουτένη, καθώς επηρεάζει τόσο την τελική υφή του προϊόντος όσο και τη σταθερότητά του κατά την αποθήκευση (Gazzola et al., 2015). Η επιλογή της μεθόδου ξήρανσης, καθώς και οι συνθήκες εφαρμογής της, διαμορφώνουν τα φυσικοχημικά και αισθητηριακά χαρακτηριστικά των ζυμαρικών.

I. Ξήρανση στον Αέρα

Η ξήρανση με αέρα αποτελεί τη συχνότερα εφαρμοζόμενη μέθοδο στην παραγωγή ζυμαρικών χωρίς γλουτένη. Όταν εφαρμόζεται με ακρίβεια και σωστό έλεγχο θερμοκρασίας και υγρασίας, συμβάλλει στη διατήρηση της επιθυμητής υφής και ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο υπερβολικής αφυδάτωσης. Αντίθετα, ανεπαρκής έλεγχος μπορεί να οδηγήσει σε επιφανειακές ρωγμές ή σε δημιουργία σκληρού εξωτερικού φλοιού (Mishra et.al., 2023).

II. Λυοφιλίωση (Lyophilization)

Η λυοφιλίωση θεωρείται ιδιαίτερα ευνοϊκή για τη διατήρηση της ποιότητας των ζυμαρικών, καθώς αποφεύγεται η θερμική καταπόνηση. Η διαδικασία αυτή συμβάλλει στην παραγωγή ζυμαρικών με πιο λεπτή και ευχάριστη υφή, που συχνά εκτιμάται από τους καταναλωτές. Ωστόσο, η υψηλότερη ενεργειακή απαίτηση καθιστά τη μέθοδο αυτή λιγότερο διαδεδομένη σε βιομηχανική κλίμακα (Mishra et.al., 2023).

III. Ήπια Αφυδάτωση

Η χρήση τεχνικών αφυδάτωσης σε χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να αποτελεί αποτελεσματική εναλλακτική λύση, ιδιαίτερα για ευαίσθητες πρώτες ύλες. Αυτή η μέθοδος

μειώνει τον κίνδυνο υπερβολικού μαγειρέματος των ζυμαρικών και συμβάλλει στη διατήρηση των αρχικών αισθητηριακών ιδιοτήτων του προϊόντος.

IV. Έλεγχος Θερμοκρασίας και Υγρασίας

Ανεξάρτητα από την επιλεγμένη μέθοδο ξήρανσης, ο αυστηρός και συνεχής έλεγχος της θερμοκρασίας και της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος είναι καθοριστικός για τη διατήρηση της επιθυμητής υφής και της μακροχρόνιας σταθερότητας των ζυμαρικών στο ράφι (Mishra et.al., 2023).

2.8 Ζύμωση υπό κενό και η συμβολή της στη δομή και ποιότητα των ζυμαρικών

Η ζύμωση αποτελεί καθοριστικό στάδιο στην παραγωγή προϊόντων δημητριακών που βασίζονται στη ζύμη (Cappelli et al., 2020). Η διεργασία αυτή επηρεάζει τη δομή των πρωτεϊνών και του αμύλου, γεγονός που με τη σειρά του καθορίζει τα επόμενα στάδια επεξεργασίας αλλά και την τελική ποιότητα των προϊόντων (Carini et al., 2010, Gao et al., 2018). Ως πρώτο και θεμελιώδες βήμα στην παρασκευή ζύμης, η ανάμειξη/ζύμωμα επηρεάζεται από παράγοντες όπως ο τύπος μίξερ, η ταχύτητα, ο χρόνος και η εφαρμοζόμενη πίεση, οι οποίοι καθορίζουν την ομοιόμορφη κατανομή των συστατικών.

Η ζύμωση υπό κενό (vacuum kneading ή vacuum mixing) αποτελεί μια τεχνολογική διεργασία που εφαρμόζεται στη βιομηχανική παραγωγή ζυμαρικών και συνδέεται με την ποιότητα της ζύμης και του τελικού προϊόντος. Στην πράξη, κατά τη φάση ανάμιξης του σιμιγδαλιού με το νερό, εφαρμόζεται κενό αέρος μέσα στον αναμικτήρα. Κατά την ανάμειξη της ζύμης με ζυμαρικά, υπάρχει περιορισμένη ανάπτυξη γλουτένης λόγω της χαμηλής προσθήκης νερού (μόνο 30–37% υγρασία), με αποτέλεσμα την εύθρυπτη ζύμη (Hou et al., 2010). Το δίκτυο γλουτένης αναπτύσσεται περαιτέρω με ενθουλάκωση κόκκων αμύλου κατά τη διάρκεια της ανάπαυσης και του φύλλου (Baik, 2010). Η ανάμειξη υπό κενό θα μπορούσε να προάγει την επαρκή και ομοιόμορφη ενυδάτωση των σωματιδίων του αλευριού και διευκολύνουν την ανάπτυξη της γλουτένης κατά την ανάμειξη (Fu, 2008).

Η επιτυχία ή όχι της χρήσης του κενού στην ποιότητα της ζύμης εξαρτάται σίγουρα από τις παραμέτρους της διαδικασίας όπως είναι ο βαθμός του κενού, η χρονική διάρκεια ανάμειξης, η ταχύτητα ανάμειξης καθώς και η θερμοκρασία. Ρόλο διαδραματίζουν σίγουρα

και το είδος του αλευριού(αν είναι πλούσιο σε πρωτεΐνη ή όχι) η σύνθεση των συστατικών καθώς και η ποσότητα του νερού που προστίθεται. Ο χρόνος ανάμειξης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό δικτύου της γλουτένης και για τον αερισμό της ζύμης. Με τον ίδιο τρόπο, οι Li κ.ά (2012) ανακάλυψαν ότι οι ιδιότητες των φρέσκων νουντλς ενισχύθηκαν από το κενό ανάμειξη, και η καλύτερη ποιότητα μαγειρέματος και φαγητού παρατηρήθηκε στο 0,06 MPa.

Η ζύμωση υπό κενό είναι κρίσιμη για τον έλεγχο των φυσαλίδων στα ζυμαρικά. Με τη μείωσή τους, βελτιώνεται η μικροδομή, η ομοιομορφία του χρώματος και η μηχανική αντοχή, ενώ περιορίζονται προβλήματα κατά την ξήρανση και το μαγείρεμα. Πιο συγκεκριμένα, με τη συμβατική ανάμιξη, συχνά εγκλωβίζονται φυσαλίδες αέρα στο εσωτερικό της ζύμης, γεγονός που οδηγεί σε ανεπιθύμητες αλλοιώσεις στη μικροδομή. Οι φυσαλίδες αυτές δημιουργούν κενά και πόρους, οι οποίοι με τη σειρά τους αποτελούν εστίες συγκέντρωσης μηχανικών τάσεων κατά τη φάση της ξήρανσης, ευνοώντας τον σχηματισμό ρωγμών και ανωμαλιών. Επιπλέον, οι φυσαλίδες επηρεάζουν αρνητικά το χρώμα των ζυμαρικών (λευκές κηλίδες, ανομοιομορφία) και τη μηχανική αντοχή τους, ενώ αυξάνουν και την απώλεια στερεών στο νερό κατά το μαγείρεμα (Li et al.,2012).

Η εφαρμογή της ζύμωσης υπό κενό έρχεται να αντιμετωπίσει αυτά τα προβλήματα. Σε αυτήν την τεχνολογία, η ανάμιξη πραγματοποιείται σε περιβάλλον μειωμένης πίεσης, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση του εγκλωβισμένου αέρα και τον περιορισμό του σχηματισμού φυσαλίδων. Η ομοιόμορφη ενυδάτωση του σιμιγδαλιού και η καλύτερη κατανομή του νερού ευνοούν την ανάπτυξη ενός πιο συνεκτικού και ανθεκτικού δικτύου γλουτένης, το οποίο συγκρατεί αποτελεσματικά το άμυλο και ενισχύει τη συνοχή της ζύμης (Li et al.,2012).

Ερευνητικά δεδομένα δείχνουν ότι η ζύμωση υπό κενό οδηγεί σε σημαντική μείωση τόσο του αριθμού όσο και του μεγέθους των φυσαλίδων στη ζύμη, με αποτέλεσμα μια πιο λεία και συμπαγή μικροδομή. Τα ζυμαρικά που παρασκευάζονται με αυτήν τη μέθοδο παρουσιάζουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή, χαμηλότερη απώλεια στερεών στο μαγείρεμα και βελτιωμένη ελαστικότητα και υφή. Επιπρόσθετα, η απουσία φυσαλίδων συμβάλλει σε πιο ομοιογενές και ελκυστικό χρώμα, καθώς και σε περιορισμό των μικρορωγμών κατά την ξήρανση (Li et al.,2012).

Συνολικά, η ζύμωση υπό κενό αποτελεί μια τεχνολογική καινοτομία που συνδέεται άμεσα με τη μείωση των φυσαλίδων και τη βελτίωση της ποιότητας των ζυμαρικών. Η εφαρμογή

του μπορεί να ενταχθεί στη σύγχρονη βιομηχανία ζυμαρικών ως εργαλείο πρόληψης τεχνολογικών προβλημάτων, συμβάλλοντας στη σταθερότητα και την οργανοληπτική ανωτερότητα του τελικού προϊόντος.

2.8.1 Άλλοι παράγοντες ρωγμών-Σύνοψη

Οι ρωγμές στα ζυμαρικά σπάνια οφείλονται σε έναν παράγοντα· είναι συνήθως αποτέλεσμα συνδυαστικών επιδράσεων πρώτης ύλης, τεχνικής και ξήρανσης. Συγκεκριμένα, αποτελούν ένα πολυπαραγοντικό φαινόμενο που σχετίζεται τόσο με τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών όσο και με τις τεχνολογικές παραμέτρους της παραγωγής. Όπως ήδη έχει συζητηθεί, η ποιότητα και η ποσότητα της γλουτένης παίζουν πρωταρχικό ρόλο, καθώς ένα αδύναμο ή ανεπαρκές πλέγμα γλουτένης δεν μπορεί να συγκρατήσει αποτελεσματικά το άμυλο, οδηγώντας σε εύθραυστο προϊόν. Η υγρασία της ζύμης, η ταχύτητα και η πίεση της εξώθησης επηρεάζουν τη δομή της, δημιουργώντας ανισομερή σημεία που αποτελούν αδύναμες περιοχές κατά την ξήρανση (DeStefanis & Sgrulletta, 1990). Το στάδιο της ξήρανσης θεωρείται καθοριστικό, αφού υψηλές ή απότομες μεταβολές θερμοκρασίας και ταχύτητας ξήρανσης προκαλούν ανομοιόμορφη συρρίκνωση και ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων, οι οποίες εκδηλώνονται ως ρωγμές στην επιφάνεια. Ακόμη και πιο προηγμένες τεχνικές, όπως η ξήρανση υπό κενό, αν δεν ελεγχθούν σωστά, μπορούν να εντείνουν τα φαινόμενα αυτά.

Επιπλέον, εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την υφή και ποιότητα των ζυμαρικών. Για παράδειγμα, η αποθήκευση σε περιβάλλον με μεταβαλλόμενη υγρασία ή η μη ομοιόμορφη θερμική καταπόνηση κατά το βράσιμο ενδέχεται να επιδεινώσουν την εμφάνιση μικρορωγμών. Χημικές προσθήκες όπως αλάτι, αυγά και άλλα ενισχυτικά καθώς και βελτιωτικά αλεύρου μπορούν να ενισχύσουν ή να υπονομεύσουν την ελαστικότητα της ζύμης, γεγονός που εποδρά στην αντοχή σε ρωγμές (Ohmura et. al., 2023). Συνολικά, οι ρωγμές αποτελούν αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης πολλών παραγόντων, όπου η ισορροπία ανάμεσα στη σύσταση της πρώτης ύλης και τις συνθήκες επεξεργασίας καθορίζει την τελική αντοχή και ποιότητα των ζυμαρικών. Ο παρακάτω πίνακας(Πίνακας 12) συνοψίζει τα κυριότερα αίτια ρωγμών στα ζυμαρικά.

Πίνακας 12: Αίτια εμφάνισης ρωγμών στα ζυμαρικά

Κατηγορία	Αίτια
Πρώτες ύλες	Χαμηλή περιεκτικότητα σε γλουτένη Χαμηλή ποιότητα πρωτεϊνών σκληρού σίτου Ακατάλληλη αναλογία πρωτεΐνης/αμύλου
Διαδικασία παραγωγής	Υπερβολική πίεση στην εξώθηση Ανεπαρκής ενυδάτωση του σιμιγδαλιού Μη ομοιογενής ανάμιξη
Ξήρανση	Υψηλές θερμοκρασίες ξήρανσης Απότομες αλλαγές θερμοκρασίας και υγρασίας Ανεπαρκής έλεγχος υγρασίας
Μικροδομή ζυμαρικών	Ανεπαρκής συνοχή γλουτενικού δικτύου Ανομοιόμορφη κατανομή νερού Ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων κατά την αφυδάτωση

2.8.2 Τεχνολογικά προβλήματα και πρόληψη

Κατά την ξήρανση των ζυμαρικών, η ανισομερής απομάκρυνση υγρασίας μεταξύ διαφορετικών τμημάτων του προϊόντος οδηγεί σε διαφοροποιημένη συρρίκνωση, η οποία μπορεί να προκαλέσει ανάπτυξη εσωτερικών μηχανικών τάσεων και, τελικά, ρωγμές. Για την αποφυγή του φαινομένου αυτού, έχουν προταθεί διάφορες στρατηγικές (Baiano et al, 2019):

- Η *προγραμματισμένη ξήρανση*, με σταδιακή ή συνεχόμενη ρύθμιση θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, επιτρέπει πιο ομοιόμορφη απώλεια υγρασίας και ελαχιστοποίηση θερμοϋγρομετρικών κλίσεων. Με άλλα λόγια, η θερμοκρασία και η σχετική υγρασία ρυθμίζονται με τρόπο ώστε να επιτρέπουν πιο ομοιόμορφη απώλεια υγρασίας σε όλη τη μάζα του προϊόντος. Επίσης, η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά από χαμηλά

επίπεδα σε υψηλότερα, μειώνοντας το θερμικό σοκ και τις εσωτερικές τάσεις (Resmini & Pagani, 1983), με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται η δημιουργία “σκληρής κρούστας” (casehardening) και μείωση μικροδομικών θραύσεων.

- Η *διατήρηση αυξημένης σχετικής υγρασίας* στο περιβάλλον ξήρανσης επιβραδύνει τη διαδικασία, μειώνοντας τον κίνδυνο επιφανειακής αφυδάτωσης και αστοχιών δομής. Η αυξημένη δηλαδή υγρασία στον θάλαμο ξήρανσης περιορίζει την εξάτμιση νερού από την επιφάνεια, δίνοντας χρόνο στο εσωτερικό να «ακολουθήσει» τη διαδικασία αφυδάτωσης. Εφαρμόζεται σχετική υγρασία $> 70\%$ κατά τα πρώτα στάδια, σε συνδυασμό με χαμηλή θερμοκρασία ($40\text{--}50^{\circ}\text{C}$). Επιτυγχάνεται έτσι μείωση διαφοράς υγρασίας μεταξύ πυρήνα και επιφάνειας, περιορισμός συρρίκνωσης και επιφανειακών ρωγμών (Petitot et al., 2009).
- Σε ορισμένες περιπτώσεις, η *έγχυση ατμού* μπορεί να συνεισφέρει στον περιορισμό των επιφανειακών τάσεων και στη σταθεροποίηση της δομής. Ο ατμός αυξάνει την επιφανειακή υγρασία, μειώνει την τάση και επιτρέπει πιο ομοιόμορφη απώλεια νερού. Εφαρμόζεται περιοδική υγρανση με ατμό ή νερό στα ενδιάμεσα στάδια, με δυνητικά οφέλη την ανακούφιση επιφανειακών τάσεων και τη μείωση πιθανότητας μικρορωγμών.
- Επιπλέον, μια *φάση ισορροπίας* μετά την αρχική ξήρανση, σε περιβάλλον ελεγχόμενης υγρασίας, βοηθά στην ομογενοποίηση της κατανομής υγρασίας εντός του προϊόντος. Συγκεκριμένα, τα ζυμαρικά αφήνονται σε περιβάλλον με ελεγχόμενη υγρασία και θερμοκρασία, ώστε η υγρασία να ανακατανέμεται ομοιόμορφα στο προϊόν. Εφαρμόζεται παρεμβολή περιόδων 2–6 ωρών ανάμεσα σε φάσεις έντονης ξήρανσης με αποτέλεσμα να σταθεροποιούνται οι εσωτερικές τάσεις και να μειώνεται έτσι η πιθανότητα δημιουργίας ρωγμών κατά την επόμενη φάση θερμικής καταπόνησης (Cubadda, 1994).
- Ο *ελεγχόμενος ρυθμός ξήρανσης* είναι κρίσιμος, καθώς υπερβολικά γρήγορη ξήρανση προκαλεί ρωγμές, ενώ υπερβολικά αργή μπορεί να οδηγήσει σε μικροβιακή αλλοίωση ή ανάπτυξη μούχλας. Οι απότομες μεταβολές θερμοκρασίας προκαλούν διαφορές στη διαστολή/συστολή της γλουτένης και του αμύλου, οδηγώντας σε καταπόνηση. Υπάρχει σταδιακή αύξηση θερμοκρασίας (π.χ., από 40°C σε 80°C) ή χρήση μέσης θερμοκρασίας ξήρανσης με μεγαλύτερη διάρκεια (Dexter et al., 1984). Έτσι, επιτυγχάνεται περιορισμός θερμικού σοκ καθώς και διατήρηση δομικής ακεραιότητας.

- Τέλος, η σταθερή θερμοκρασία καθ' όλη τη διάρκεια της διεργασίας είναι απαραίτητη, καθώς οι διακυμάνσεις μπορεί να εντείνουν την ανισομερή αφυδάτωση και την ανάπτυξη καταπονήσεων.

Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται συνοπτικά τα αίτια των ρωγμών με τις προαναφερθείσες τεχνικές πρόληψής τους καθώς και τα οφέλη από την κάθε τεχνική ξεχωριστά.

Πίνακας 13. Τεχνικές πρόληψης ρωγμών στα ζυμαρικά

Αίτιο ρωγμών	Τεχνική πρόληψης	Επιστημονική βάση
Ταχεία απώλεια υγρασίας από την επιφάνεια	Σταδιακή, πολυφασική ξήρανση με ελεγχόμενο προφίλ θερμοκρασίας/υγρασίας	Μειώνει τις διαφορές υγρασίας μεταξύ πυρήνα και επιφάνειας, περιορίζοντας τις εσωτερικές τάσεις
Δημιουργία “σκληρής κρούστας” (casehardening)	Διατήρηση υψηλής σχετικής υγρασίας (>70%) στα αρχικά στάδια	Προλαμβάνει την υπερβολική επιφανειακή αφυδάτωση, επιτρέποντας ομοιόμορφη κατανομή υγρασίας
Ανομοιόμορφη κατανομή υγρασίας μετά από φάσεις ξήρανσης	Εισαγωγή φάσεων ισορροπίας (tempering)	Επιτρέπει τη μετακίνηση υγρασίας από τον πυρήνα προς την επιφάνεια πριν την επόμενη φάση ξήρανσης
Θερμικό σοκ από απότομες μεταβολές θερμοκρασίας	Σταδιακή αύξηση θερμοκρασίας ή χρήση μέσης θερμοκρασίας ξήρανσης	Περιορίζει τις διαφορές διαστολής/συστολής αμύλου και γλουτένης
Υψηλή επιφανειακή τάση	Περιοδική έγχυση ατμού ή υγρασίας	Ανακουφίζει τις τάσεις και μειώνει τον κίνδυνο μικρορωγμών
Πολύ γρήγορος ή πολύ αργός ρυθμός ξήρανσης	Ελεγχόμενος ρυθμός ξήρανσης μέσω αισθητήρων και αυτοματισμού	Διατηρεί ισορροπία ανάμεσα στην ασφάλεια και τη δομική σταθερότητα

Στην παραγωγή ζυμαρικών μπορούν να εμφανιστούν διάφορα ελαττώματα, και η δυνατότητα ταχείας εντοπισμού της πηγής τους είναι κρίσιμη για την αποτελεσματική αντιμετώπισή τους. Η διαθεσιμότητα ακριβών δεδομένων σχετικά με τις βέλτιστες παραμέτρους ξήρανσης, όπως αυτές μετρώνται και παρακολουθούνται στη συγκεκριμένη διαδικασία, αποτελεί βασικό εργαλείο για τον έλεγχο ποιότητας. Η ύπαρξη μιας «γραμμής

βάσης» για σύγκριση διευκολύνει σημαντικά την ταχεία επίλυση πολλών προβλημάτων (Manthey & Twombly, 2005).

Ο στόχος της παραγωγής ζυμαρικών είναι η παρασκευή αποξηραμένων προϊόντων με ημιδιαφανή όψη, αν και σε ορισμένα τμήματα της αγοράς προτιμώνται ζυμαρικά που έχουν εξωθηθεί μέσω χάλκινης μήτρας, γεγονός που προσδίδει τραχιά επιφάνεια. Τα ζυμαρικά πρέπει να είναι απαλλαγμένα από οπτικά ελαττώματα, όπως σημάδια τριβής, κηλίδες ενυδάτωσης και στίγματα. Επιπλέον, πρέπει να εμφανίζουν κατάλληλη υφή κατά το μαγείρεμα, με μη κολλώδη και σφιχτή δομή, περιορισμένες απώλειες κατά το μαγείρεμα και αντοχή σε υπερβολική θερμική επεξεργασία (Manthey & Twombly, 2005).

2.8.3 Πρόσφατες Εξελίξεις στην Παρασκευή Ζυμαρικών

Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία ζυμαρικών έχει γνωρίσει σημαντικές καινοτομίες, οι οποίες επηρεάζουν πολλαπλές πτυχές της παραγωγής, όπως η προετοιμασία της ζύμης, οι τεχνικές διαμόρφωσης, η καινοτομία συστατικών και η αποδοτικότητα της παραγωγικής διαδικασίας. Οι εξελίξεις αυτές έχουν συμβάλει στην ενίσχυση της ποιότητας, της ποικιλίας και της βιωσιμότητας των ζυμαρικών.

Ένας σημαντικός τομέας προόδου αφορά την ανάπτυξη αυτοματοποιημένων μηχανών ζυμαρικών, οι οποίες αξιοποιούν σύγχρονες τεχνολογίες για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής, εξασφαλίζοντας αυξημένη απόδοση και σταθερή ποιότητα. Οι μηχανές αυτές επιτρέπουν ακριβή ανάμειξη, εξώθηση, διαμόρφωση και κοπή της ζύμης, μειώνοντας την ανάγκη για χειρωνακτική εργασία και διασφαλίζοντας τυποποιημένα προϊόντα (Prakash & Ravindra, 2021).

Στην προετοιμασία της ζύμης, έχουν εισαχθεί καινοτόμες τεχνικές ανάμειξης, όπως η ανάμειξη χαμηλής ταχύτητας και η ανάμειξη υπό κενό, οι οποίες βελτιώνουν την ανάπτυξη της γλουτένης και την ομοιόμορφη ενυδάτωση της ζύμης. Οι μέθοδοι αυτές οδηγούν σε καλύτερη υφή και ιδιότητες μαγειρέματος των ζυμαρικών.

Στις τεχνικές διαμόρφωσης, τα παραδοσιακά σχήματα ζυμαρικών, όπως σπαγγέτι και πέννες, έχουν εμπλουτιστεί με νέα σχέδια και υφές. Οι βελτιώσεις στην τεχνολογία εξώθησης επιτρέπουν τη δημιουργία περίπλοκων σχημάτων, προσφέροντας μεγαλύτερη

ποικιλία προϊόντων και βελτιωμένη αισθητηριακή εμπειρία για τον καταναλωτή (Millar et al., 2019).

Η καινοτομία συστατικών έχει επίσης σημαντικό ρόλο, με έμφαση στην υγιεινή διατροφή. Η χρήση αλεύρων ολικής άλεσης, κινόα, όλυρας και άλλων εναλλακτικών δημητριακών έχει οδηγήσει στη δημιουργία ζυμαρικών με υψηλότερη περιεκτικότητα σε φυτικές ίνες και βελτιωμένη διατροφική αξία. Παράλληλα, η αξιοποίηση υποπροϊόντων άλλων βιομηχανιών, όπως οι χρησιμοποιημένοι κόκκοι μπύρας ή φλούδες λαχανικών, μειώνει τα απόβλητα και προσθέτει μοναδικά γευστικά και υφής χαρακτηριστικά στα προϊόντα.

Τέλος, σημαντικές προόδους έχουν σημειώσει οι τεχνολογίες συσκευασίας, όπως η συσκευασία τροποποιημένης ατμόσφαιρας (MAP) και η συσκευασία υπό κενό, οι οποίες παρατείνουν τη διάρκεια ζωής των ζυμαρικών, διατηρούν τη φρεσκάδα και συμβάλλουν στη μείωση των τροφικών αποβλήτων (Yeasmen et al., 2023).

2.8.4 Μελλοντικές Προοπτικές στην Παρασκευή Ζυμαρικών

Οι προοπτικές ανάπτυξης της βιομηχανίας ζυμαρικών είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικές, καθώς η παραγωγή συνεχώς εξελίσσεται για να ανταποκρίνεται στις μεταβαλλόμενες απαιτήσεις των καταναλωτών, τις τεχνολογικές καινοτομίες και τις περιβαλλοντικές προκλήσεις. Οι βασικοί τομείς που αναμένονται να διαμορφώσουν το μέλλον της παραγωγής ζυμαρικών περιλαμβάνουν τα εξής (Kaur, 2023):

α) Υγεία και Διατροφή: Η ζήτηση για πιο θρεπτικά προϊόντα οδηγεί στην ανάπτυξη ζυμαρικών με βελτιωμένο διατροφικό προφίλ. Η χρήση εναλλακτικών δημητριακών, όπως κινόα, όλυρα ή φαγόπυρο, καθώς και η ενσωμάτωση λαχανικών και άλλων φυτικών συστατικών, συμβάλλει στην αύξηση της περιεκτικότητας σε φυτικές ίνες και φυτοθρεπτικά συστατικά. Στο μέλλον, αναμένονται περαιτέρω καινοτομίες για τη δημιουργία λειτουργικών και εμπλουτισμένων ζυμαρικών που καλύπτουν ειδικές διατροφικές ανάγκες και παρέχουν πρόσθετα οφέλη για την υγεία (Gałkowska et al., 2021).

β) Εναλλακτικά Συστατικά: Η διερεύνηση μη παραδοσιακών αλεύρων και αρχαίων δημητριακών αναμένεται να συνεχιστεί. Αλεύρια οσπρίων όπως ρεβιθίου και φακής, καθώς και δημητριακά όπως ο αμάραντος και το τεφ, προσφέρουν υψηλότερη

περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες, ποικιλία γεύσεων και διαφορετικές υφές, διευρύνοντας τις επιλογές για τους καταναλωτές (Dapkevicus et al., 2021).

γ)Βιώσιμη Παραγωγή: Η βιωσιμότητα αποτελεί βασικό παράγοντα για το μέλλον της βιομηχανίας ζυμαρικών. Οι προσπάθειες επικεντρώνονται στη μείωση της κατανάλωσης νερού, στην αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στην υιοθέτηση οικολογικών λύσεων συσκευασίας. Παράλληλα, η χρήση υποπροϊόντων άλλων βιομηχανιών τροφίμων στη ζύμη μειώνει τα απόβλητα και προωθεί πρακτικές κυκλικής οικονομίας (Koli et al., 2022).

δ)Τεχνολογικές Εξελίξεις: Ο συνεχής εκσυγχρονισμός της τεχνολογίας αναμένεται να βελτιώσει περαιτέρω τις διαδικασίες παραγωγής. Ο αυτοματισμός και η ρομποτική θα συμβάλλουν στην αύξηση της παραγωγικής αποδοτικότητας και στη διασφάλιση σταθερής ποιότητας, ενώ η μηχανική ακριβείας και οι προηγμένες τεχνολογίες ξήρανσης θα βελτιώσουν τη διατήρηση της υφής και της γεύσης των ζυμαρικών (Li et al., 2021).

ε)Καινοτομία στη Μαγειρική: Η δημιουργικότητα στη μαγειρική αποτελεί πεδίο μελλοντικής ανάπτυξης, με στόχο την ανάδειξη νέων γεύσεων και υφών. Η συνδυαστική χρήση διαφορετικών συστατικών, σαλτσών και καρυκευμάτων, καθώς και η σύντηξη παραδοσιακών και διεθνών συνταγών, αναμένεται να οδηγήσει σε καινοτόμα και γευστικά προϊόντα ζυμαρικών (Obadi & Xu, 2021).

3. Συμπεράσματα

Τα ζυμαρικά αποτελούν ένα από τα πλέον διαδεδομένα τρόφιμα παγκοσμίως, με βαθιές ρίζες στην ιστορία της ανθρώπινης διατροφής και ιδιαίτερη σύνδεση με την παράδοση της Μεσογείου. Η ιστορική τους εξέλιξη δείχνει την προσαρμοστικότητα και τη συνεχή βελτίωση της τεχνολογίας παραγωγής τους, από τα πρώτα χειροποίητα ζυμαρικά έως τα σύγχρονα βιομηχανικά προϊόντα υψηλής ποιότητας. Η παραγωγική διαδικασία των ζυμαρικών περιλαμβάνει μια σειρά κρίσιμων σταδίων, όπως η επιλογή και άλεση του σκληρού σίτου, η προσεκτική ανάμειξη με νερό για τη δημιουργία ομοιογενούς ζύμης, η εξώθηση μέσω ειδικών μητρών, η προ-ξήρανση και η τελική ξήρανση. Κάθε στάδιο έχει καθοριστική σημασία για τη διαμόρφωση της υφής, της δομής και της διατροφικής αξίας του τελικού προϊόντος.

Κατά την παραλαβή των πρώτων υλών, εφαρμόζονται αυστηρά κριτήρια ελέγχου, τα οποία περιλαμβάνουν την αξιολόγηση της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνες, της ποιότητας της γλουτένης, της χρωματικής καθαρότητας, της υγρασίας και της απουσίας ξένων σωμάτων. Αυτά τα χαρακτηριστικά επηρεάζουν άμεσα τη συνοχή της ζύμης και την αντοχή της κατά τη διάρκεια της εξώθησης και της ξήρανσης. Ο έλεγχος των ζυμαρικών κατά τη διαδικασία ξήρανσης είναι εξίσου κρίσιμος, καθώς η ταχύτητα και η ομοιομορφία αφυδάτωσης καθορίζουν την ανάπτυξη τάσεων στο πλέγμα της γλουτένης και, κατά συνέπεια, την εμφάνιση ελαττωμάτων όπως οι ρωγμές. Οι ρωγμές στα ζυμαρικά είναι αποτέλεσμα κυρίως ανισομερούς απώλειας υγρασίας, αλλά η ένταση και η συχνότητά τους επηρεάζονται σημαντικά από την ποιότητα και την ποσότητα της γλουτένης. Η γλουτένη λειτουργεί ως βασικό δομικό στοιχείο, παρέχοντας ελαστικότητα και αντοχή στη ζύμη. Η ανεπαρκής ή κακή ποιότητας γλουτένη αυξάνει την ευπάθεια σε θραύση κατά τη ξήρανση και το βράσιμο.

Συνολικά, η παραγωγή ζυμαρικών υψηλής ποιότητας απαιτεί τη συνδυαστική προσοχή σε όλες τις παραμέτρους: επιλογή και ποιότητα πρώτης ύλης, σωστή ζύμωση και εξώθηση, αυστηρό έλεγχο κατά την παραλαβή και ξήρανση, καθώς και την κατανόηση των παραγόντων που προκαλούν ρωγμές. Η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ τεχνολογικής γνώσης, ελέγχου πρώτων υλών και εφαρμογής σύγχρονων διαδικασιών εξασφαλίζει ένα προϊόν με σταθερή υφή, υψηλή διατροφική αξία και αισθητικά αψεγάδιαστη εμφάνιση, ανταποκρινόμενο στις απαιτήσεις των καταναλωτών και στις προκλήσεις της σύγχρονης βιομηχανίας τροφίμων.

4. Βιβλιογραφία

Abecassis, J. (1991). Qualité du blé dur, de la semoule et des pâtes alimentaires. *Industries des Céréales*, 72, 7–11.

Abecassis, J., Abbou, R., Chaurand, M., Morel, M. H., & Vernoux, P. (1994). Influence of extrusion conditions on extrusion speed and pressure in the extruder and on pasta quality. *Cereal Chemistry*, 71(3), 247–253.

Aimoto, U., Ogawa, T., & Adachi, S. (2013). Water sorption kinetics of spaghetti prepared under different drying conditions. *Food Science and Technology Research*, 19(1), 17–22.

An, D., Qi, Y., Liu, S., & Xu, B. (2024). Changes in overall digital structure, starch properties and moisture distribution reveal how the hardness of wheat noodles evolves under different cooking status. *Food Research International*, 192, 114781.

Ando, H., Sugi, K., Watanabe, K., Morita, N., & Mitsunaga, T. (2002). Distribution of food components in each fraction of wheat grain. *Food Science and Technology Research*, 8(1), 10–13.

Andrieu, J., Boivin, M., & Stamatopoulos, A. (1988). Heat and mass transfer modeling during pasta drying: Application to crack formation risk prediction. In S. Bruin (Ed.), *Preconcentration and drying of food materials* (pp. 183–192). Elsevier Science Publishers B.V.

Anese, M., Nicoli, M. C., Massini, R., & Lerici, C. R. (1999). Effect of drying processing on the Maillard reaction in pasta. *Food Research International*, 32(3), 193–199. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(99\)00076-9](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(99)00076-9)

Angelino, D., Martina, A., Rosi, A., Veronesi, L., Antonini, M., Mennella, I., ... & Pellegrini, N. (2019). Glucose- and lipid-related biomarkers are affected in healthy obese or hyperglycemic adults consuming a whole-grain pasta enriched in prebiotics and probiotics: A 12-week randomized controlled trial. *The Journal of Nutrition*, 149(10), 1714–1723.

Antognelli, C. (1980). The manufacture and applications of pasta as a food and as a food ingredient: A review. *International Journal of Food Science & Technology*, 15(2), 125–145.

Arribas, C., Cabellos, B., Guillamón, E., & Pedrosa, M. M. (2020). Cooking and sensorial quality, nutritional composition and functional properties of cold-extruded rice/white bean

gluten-free fettuccine fortified with whole carob fruit flour. *Food & Function*, 11(8), 7913–7924. <https://doi.org/10.1039/D0FO01447B>

Baiano, A., Chio, A. G., & Scapola, D. (2019). Analysis of cracking and breakage in dried pasta: A case study. *Quality Assurance and Safety of Crops & Foods*, 11(1), 1–6. <https://doi.org/10.3920/QAS2019.1580>

Baik, B. K. (2010). Effects of flour protein and starch on noodle quality. In G. G. Hou (Ed.), *Asian noodles: Science, technology, and processing* (pp. 261–283). Wiley.

Belitz, H.-D., & Grosch, W. (1992). *Lehrbuch der Lebensmittelchemie* (4th ed.). Springer Verlag.

BeMiller, J. N. (2019). *Carbohydrate chemistry for food scientists* (3rd ed.). AACC International.

Berteli, M. N., & Marsaioli, A. (2005). Evaluation of short cut pasta air dehydration assisted by microwaves as compared to the conventional drying process. *Journal of Food Engineering*, 68(2), 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.05.029>

Bilgin, O., Korkut, K. Z., Baser, I., Daglioglu, O., Ozturk, I., Kahraman, T., & Balkan, A. (2010). Variation and heritability for some semolina characteristics and grain yield and their relations in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *World Journal of Agricultural Sciences*, 6(3), 301–308.

Borrelli, G. M., Troccoli, A., Di Fonzo, N., & Fares, C. (1999). Durum wheat lipoxygenase activity and other quality parameters that affect pasta color. *Cereal Chemistry*, 76(3), 335–340. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.3.335>

Bouziane, M., Cappa, C., Bouasla, A., Moles, A., Barabba Terno, A., D'Arrigo, C., Brandolini, A., & Hidalgo, A. (2023). Effect of alkaline salts and whey protein isolate on the quality of rice-maize gluten-free pasta. *LWT – Food Science and Technology*, 191, 115623. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115623>

Bresciani, A., Pagani, M. A., & Marti, A. (2022). Pasta-making process: A narrative review on the relation between process variables and pasta quality. *Foods*, 11(3), 256. <https://doi.org/10.3390/foods11030256>

Cappelli, A., Bettaccini, L., & Cini, E. (2020). The kneading process: A systematic review of the effects on dough rheology and resulting bread characteristics, including

improvement strategies. *Trends in Food Science & Technology*, 104, 91–101. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.008>

Carini, E., Vittadini, E., Curti, E., & Antoniazzi, F. (2009). Effects of different shaping modes on physico-chemical properties and water status of fresh pasta. *Journal of Food Engineering*, 93(4), 400–406. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2009.11.007>

Carini, E., Vittadini, E., Curti, E., Antoniazzi, F., & Viazani, P. (2010). Effect of different mixers on physicochemical properties and water status of extruded and laminated fresh pasta. *Food Chemistry*, 122(2), 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.031>

Carpentieri, S., Larrea-Wachtendorff, D., & Ferrari, G. (2024). Influence of semolina characteristics and pasta-making process on the physicochemical, structural, and sensorial properties of commercial durum wheat spaghetti. *Frontiers in Food Science and Technology*, 4, Article 1416654. <https://doi.org/10.3389/frfst.2024.1416654>

Chiavaroli, L., Kendall, C. W., Braunstein, C. R., Mejia, S. B., Leiter, L. A., Jenkins, D. J., & Sievenpiper, J. L. (2018). Effect of pasta in the context of low-glycaemic index dietary patterns on body weight and markers of adiposity: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials in adults. *BMJ Open*, 8(3), e019438. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-019438>

Coultate, T. P. (2009). *Food: The chemistry of its components* (5th ed.). RSC Publishing.

Cubadda, R. (1994). Pasta quality: Chemical, physical, and sensory factors. *Cereal Foods World*, 39, 437–442.

Dapkevicius, M., de Sgardioli, B. E., Câmara, S. P. A., Poeta, P., & Malcata, F. X. (2021). Current trends of enterococci in dairy products: A comprehensive review of their multiple roles. *Foods*, 10(4), 821. <https://doi.org/10.3390/foods10040821>

D'Appolonia, B. L., & Gilles, K. A. (1971). Effect of various starches in baking. *Cereal Chemistry*, 48(6), 625–636.

D'Appolonia, B. L., & Kim, S. K. (1976). Recent developments on wheat flour pentosans. *Bakers Digest*, 50, 45–49, 53–54.

Day, L. (2011). Wheat gluten: Production, properties and application. In G. O. Phillips & P. A. Williams (Eds.), *Handbook of food proteins* (pp. 267–288). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857093639.2.267>

- de la Peña, E., & Manthey, F. A. (2017). Effect of formulation and dough hydration level on extrusion, physical and cooked qualities of nontraditional spaghetti. *Journal of Food Process Engineering*, 40(1), e12301. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12301>
- de la Peña, E., Manthey, F. A., Patel, B. K., & Campanella, O. H. (2014). Rheological properties of pasta dough during pasta extrusion: Effect of moisture and dough formulation. *Journal of Cereal Science*, 60(2), 346–351. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.03.002>
- De Arcangelis, E., Cuomo, F., Trivisonno, M. C., Marconi, E., & Messina, M. C. (2020). Gelatinization and pasta making conditions for buckwheat gluten-free pasta. *Journal of Cereal Science*, 95, 103073. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2020.103073>
- De Cindio, B., & Baldino, N. (2015). Pasta: Manufacture and composition. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of food and health* (Vol. 6, pp. 235–241). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00522-5>
- Debbouz, A., & Doetkott, C. (1996). Effect of process variables on spaghetti quality. *Cereal Chemistry*, 73(6), 672–676.
- Del Nobile, M. A., Baiano, A., Conte, A., & Mocchi, G. (2005). Influence of protein content on spaghetti cooking quality. *Journal of Cereal Science*, 41(3), 347–356. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.10.005>
- De Noni, I., & Pagani, M. A. (2010). Cooking properties and heat damage of dried pasta as influenced by raw material characteristics and processing conditions. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 50(5), 465–472. <https://doi.org/10.1080/10408390802544512>
- DeStefanis, E., & Sgrulletta, D. (1990). Effects of high temperature drying on technological properties of pasta. *Journal of Cereal Science*, 12(1), 97–104. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(09\)80135-3](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(09)80135-3)
- Deng, L., & Manthey, F. A. (2017). Effect of single-pass and multipass milling systems on whole wheat durum flour and whole wheat pasta quality. *Cereal Chemistry*, 94(6), 963–969. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-01-17-0009-R>

Detchewa, P., Thongngam, M., Jane, J. L., & Naivikul, O. (2016). Preparation of gluten-free rice spaghetti with soy protein isolate using twin-screw extrusion. *Journal of Food Science and Technology*, 53(9), 3485–3494. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2322-0>

Dexter, J. E. (2004). *Food processing: Principles and applications* (pp. 249–256). Ames, IA: Blackwell Publishing.

Dexter, J. E., & Matsuo, R. R. (1977). Influence of protein content on some durum wheat quality parameters. *Canadian Journal of Plant Science*, 57(3), 717–727. <https://doi.org/10.4141/cjps77-105>

Dexter, J. E., Matsuo, R. R., & Tkachuk, R. (1984). The structure and protein composition of pasta. *Cereal Chemistry*, 61(1), 17–21.

Every, D. L., Simmons, K. H., & Ross, M. (2005). Studies on the mechanism of the ascorbic acid improver effect on bread using flour fractionation and reconstitution methods. *Journal of Cereal Science*, 30(2), 147–158. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2004.12.004>

Ficco, D. B. M., Mastrangelo, A. M., Trono, D., Borrelli, G. M., De Vita, P., Fares, C., et al. (2014). The colours of durum wheat: A review. *Crop and Pasture Science*, 65(1), 1–15. <https://doi.org/10.1071/CP13293>

Fu, B. X. (2008). Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing. *Food Research International*, 41(9), 888–902. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2008.03.001>

Gałkowska, D., Witczak, T., & Witczak, M. (2021). Ancient wheat and quinoa flours as ingredients for pasta dough—Evaluation of thermal and rheological properties. *Molecules*, 26(22), 7033. <https://doi.org/10.3390/molecules26227033>

Gao, J., Tay, S. L., Koh, A. H.-S., & Zhou, W. (2018). Dough and bread making from high- and low-protein flours by vacuum mixing: Part 3. Oral processing of bread. *Journal of Cereal Science*, 79, 408–417. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2017.12.002>

Garcia-Valle, D. E., Bello-Pérez, L. A., Agama-Acevedo, E., & Alvarez-Ramirez, J. (2021). Structural characteristics and in vitro starch digestibility of pasta made with durum wheat semolina and chickpea flour. *LWT – Food Science and Technology*, 145, 111347. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111347>

Gazzola, A., Spadoni, A., Palla, G., & Vallicelli, M. (2015). Freeze-drying of gluten-free pasta. *LWT – Food Science and Technology*, 61(1), 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.11.003>

Ghaednia, H., & Azizinaghsh, H. (2011). Breaking of a falling spaghetti. *International Young Physicists' Tournament Archive*. http://archive.iypt.org/iypt_book/2011_4_Breaking_spaghetti_Iran_HG_HA_v1.pdf

Giacco, R., Vitale, M., & Riccardi, G. (2016). Pasta: Role in diet. In B. Caballero, P. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of food and health* (pp. 242–245). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00512-1>

Giannetti, V., Mariani, M. B., Marini, F., & Biancolillo, A. (2021). Effects of thermal treatments on durum wheat pasta flavour during production process: A modelling approach to provide added-value to pasta dried at low temperatures. *Talanta*, 225, 121955. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121955>

Gobbetti, M., Rizzello, C. G., Di Cagno, R., & De Angelis, M. (2007). Sourdough lactobacilli and celiac disease. *Food Microbiology*, 24(2), 187–196. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2006.06.001>

Godavarti, S., & Karwe, M. V. (1997). Determination of specific mechanical energy distribution on a twin-screw extruder. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 67(4), 277–287. <https://doi.org/10.1006/jaer.1997.0179>

Granfeldt, Y., & Björck, I. (1991). Glycemic response to starch in pasta: A study of mechanisms of limited enzyme availability. *Journal of Cereal Science*, 14(1), 47–61. [https://doi.org/10.1016/S0733-5210\(09\)80008-4](https://doi.org/10.1016/S0733-5210(09)80008-4)

Güler, S., Köksel, H., & Ng, P. K. W. (2002). Effects of industrial pasta drying temperatures on starch properties and pasta quality. *Food Research International*, 35(5), 421–427. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(01\)00136-3](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(01)00136-3)

Ελληνική Στατιστική Αρχή. (2023). *Μηνιαίες δαπάνες κατανάλωσης νοικοκυριών: Α' τρίμηνο 2023*. <https://www.statistics.gr/>

Hebrard, A., Oulahna, D., Galet, L., Cuq, B., Abecassis, J., & Fages, J. (2003). Hydration properties of durum wheat semolina: Influence of particle size and temperature. *Powder Technology*, 130(1–3), 211–218. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(02\)00252-4](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(02)00252-4)

- Higuchi, M., & Yoshida, S. (2014). *Device for predicting crack generation in dry noodles and classification system* (U.S. Patent No. US20140110314A1). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US20140110314/en>
- Hong, E., Lee, S. Y., Jeong, J. Y., Park, J. M., Kim, B. H., Kwon, K., & Chun, H. S. (2017). Modern analytical methods for the detection of food fraud and adulteration by food category. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97(12), 3877–3896. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8364>
- Hou, G. G., Otsubo, S., Okusu, H., & Shen, L. (2010). Noodle processing technology. In G. G. Hou (Ed.), *Asian noodles: Science, technology, and processing* (pp. 99–140). Wiley.
- International Pasta Organization. (2022). *The world pasta industry status report*. <http://www.internationalpasta.org>
- Johnston, K. W. (2001). Pasta drying. In R. C. Kill & K. Turnbull (Eds.), *Pasta and semolina technology* (pp. 159–161). Blackwell Science Ltd.
- Johnston, K. W., & Dintheer, W. (2000). Pasta drying. In *Pasta and noodle technology* (pp. 158–175). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/9780470999370.ch6>
- Joubert, M., Morel, M.-H., & Lullien, V. (2018). Pasta color and viscoelasticity: Revisiting the role of particle size, ash and protein content. *Cereal Chemistry*, 95(5), 1–8. <https://doi.org/10.1002/cche.10038>
- Kasarda, D. D., King, G., & Kumosinski, T. F. (1994). Comparison of spiral structures in wheat high molecular weight glutenin subunits and elastin by molecular modeling. In T. F. Kumosinski & M. N. Liebman (Eds.), *Molecular modeling* (pp. 209–220). American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-1994-0561.ch013>
- Kaur, P. (2023). Recent advances in the pasta making. *Pharma Innovation*, 12(7), 2698–2702. <https://doi.org/10.22271/tpi.2023.v12.i7ae.21743>
- Kim, H. R., & Bushuk, W. (1995). Changes in some physicochemical properties of flour proteins due to partial reduction with dithiothreitol. *Cereal Chemistry*, 72(5), 450–456.
- Knudsen, K. E. B., Steinfeldt, S., Borsting, C. F., & Eggum, B. O. (1995). The nutritive value of decorticated mill fractions of wheat. I. Chemical composition of raw and enzyme treated fractions and balance experiments with rats. *Animal Feed Science and Technology*, 52(1–2), 205–225. [https://doi.org/10.1016/0377-8401\(94\)00709-B](https://doi.org/10.1016/0377-8401(94)00709-B)

- Koli, D. K., Rudra, S. G., Bhowmik, A., & Pabbi, S. (2022). Nutritional, functional, textural and sensory evaluation of spirulina enriched green pasta: A potential dietary and health supplement. *Foods*, 11(7), 979. <https://doi.org/10.3390/foods11070979>
- Kubo, M. T. K., Augusto, P. E. D., & Cristianini, M. (2013). Effect of high pressure homogenization (HPH) on the physical stability of tomato juice. *Food Research International*, 51(1), 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2012.11.022>
- Laignelet, B. (1983). Lipids in pasta and pasta processing. In P. J. Barnes (Ed.), *Lipids in cereal technology* (pp. 269–286). Academic Press.
- Landi, A. (1995). Durum Wheat, Semolina and Pasta Quality Characteristics for an Italian Food Company. In *Durum Wheat Quality in the Mediterranean Region*, edited by N. Di Fonzo, F. Kaan, and M. Nachit, 22:33–42. Options Méditerranéennes: Série A. Séminaires Méditerranéens. Zaragoza : CIHEAM
- Laureati, M., Conte, A., Padalino, L., Del Nobile, M. A., & Pagliarini, E. (2016). Effect of fiber information on consumer's expectation and liking of wheat bran enriched pasta. *Journal of Sensory Studies*, 31(4), 348–359. <https://doi.org/10.1111/joss.12208>
- Lempereur, I., Rouau, X. and Abecassis, J. (1997b). Genetic and Agronomic Variation in Arabinoxylan and Ferulic Acid Contents of Durum Wheat (*Triticum durum*.) Grain and Its Milling Fractions. *Journal of Cereal Science* 25 (2): 103–10.
- Li, M., Luo, L.-J., Zhu, K.-X., Guo, X.-N., Peng, W., & Zhou, H.-M. (2012). Effect of vacuum mixing on the quality characteristics of fresh noodles. *Journal of Food Engineering*, 110(4), 525–531. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.01.007>
- Li, C., You, Y., Chen, D., Gu, Z., Zhang, Y., Holler, T. P., et al. (2021). A systematic review of rice noodles: Raw material, processing method and quality improvement. *Trends in Food SciDence & Technology*, 107, 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.11.009>
- Lierheimer, N. (2022). So many possibilities: A history of noodles & pasta. *Young Historians Conference*, 2022(1). <https://pdxscholar.library.pdx.edu/younghistorians/2022/papers/1>
- Lin-Liu, J. (2013). *On the noodle road: From Beijing to Rome, with love and pasta*. Riverhead Books.

- Lintas, C., & D'Appolonia, B. D. (1973). Effects of spaghetti processing on semolina carbohydrates. *Cereal Chemistry*, 50(5), 563–570.
- Liu, H., Zhou, L., & Hayakawa, K. I. (1997). Sensitivity analysis for hygrostress crack formation in cylindrical food during drying. *Journal of Food Science*, 62(2), 447–450. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1997.tb03902.x>
- Liu, J., Qi, Y., Hamadou, A. H., Ahmed, Z., Guo, Q., Zhang, J., & Xu, B. (2024). Effect of high-temperature drying at different moisture levels on texture of dried noodles: Insights into gluten aggregation and pore distribution. *Journal of Cereal Science*, 115, 103817. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103817>
- Lucisano, M., Pagani, M. A., Mariotti, M., & Locatelli, D. P. (2008). Influence of die material on pasta characteristics. *Food Research International*, 41(6), 646–652.
- Manthey, F. A., Schorno, A. L. (2002). Physical and cooking quality of spaghetti made from whole wheat durum. *Cereal Chemistry*, 79(4), 504–510. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2002.79.4.504>
- Manthey, F. A., Twombly, W. (2005). Extruding and drying of pasta. In Y. H. Hui (Ed.), *Handbook of Food Science, Technology, and Engineering* (Vol. 4, pp. 158–160). Taylor & Francis Group.
- Manthey, F. A., Yalla, S. R., Dick, T. J., & Badaruddin, M. (2004). Extrusion properties and cooking quality of spaghetti containing buckwheat bran flour. *Cereal Chemistry*, 81(2), 232–236. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.2004.81.2.232>
- Marchylo, B. A., & Dexter, J. E. (2001). Pasta production. In G. Owens (Ed.), *Cereal processing technology* (pp. 109–121). Woodhead Publishing Limited.
- Marti, A., D'Egidio, M. A., & Pagani, M. A. (2015). Pasta: Quality testing methods. In C. W. Wrigley, H. Corke, K. Seetharaman, & J. Faubion (Eds.), *Encyclopedia of food grains* (Vol. 3, pp. 161–165). Academic Press.
- Marti, A., D'Egidio, M. G., Dreisoerner, J., Seetharaman, K., & Pagani, M. A. (2014). Temperature-induced changes in dough elasticity as a useful tool in defining the firmness of cooked pasta. *European Food Research and Technology*, 238(2), 333–336. <https://doi.org/10.1007/s00217-013-2102-6>

- Marti, A., Fongaro, L., Rossi, M., Lucisano, M., & Pagani, M. A. (2011). Quality characteristics of dried pasta enriched with buckwheat flour. *International Journal of Food Science and Technology*, 46(11), 2393–2400. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02762.x>
- Marti, A., Seetharaman, K., & Pagani, M. A. (2013). Rheological approaches suitable for investigating starch and protein properties related to cooking quality of durum wheat pasta. *Journal of Food Quality*, 36(2), 133–138. <https://doi.org/10.1111/jfq.12021>
- Masato, O., Kentaro, M., Tatsuro, M., Akio, F., Yukako, H., & Yasuki, M. (2021). Effects of drying temperature on the properties of starch in pasta. *LWT*, 145, 111171. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111171>
- Matsuo, R. R., & Dexter, J. E. (1980). Comparison of experimentally milled durum wheat semolina to semolina produced by some Canadian commercial mills. *Cereal Chemistry*, 57(2), 117–122.
- Melini, V., Melini, F., & Acquistucci, R. (2020). Phenolic compounds and bioaccessibility thereof in functional pasta. *Antioxidants*, 9(4), 343. <https://doi.org/10.3390/antiox9040343>
- Mercier, S., Marcos, B., Moresoli, C., Mondor, M., & Villeneuve, S. (2014). Modeling of internal moisture transport during durum wheat pasta drying. *Journal of Food Engineering*, 124, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.10.006>
- Millar, K. A., Barry-Ryan, C., Burke, R., McCarthy, S., & Gallagher, E. (2019). Dough properties and baking characteristics of white bread, as affected by addition of raw, germinated and toasted pea flour. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 56, 102189. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2019.102189>
- Mishra, R., Garg, S. K., & Singh, M. (2023). Gluten-free pasta: A comprehensive review of alternative grains and formulation approaches. *Biological Forum – An International Journal*, 15(11), 349–354.
- Miskelly, D. (2017). Pasta. In M. A. Aganig (Ed.), *Pasta and noodle technology* (pp. 83–114). Academic Press.
- Mokhtar, A., Hussein, M. A., & Becker, T. (2011). Monitoring pasta production line using automated imaging technique. *Procedia Food Science*, 1, 1173–1180. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.174>

Mordor Intelligence. (2023). *Pasta market – Growth, trends, and forecasts (2023–2028)*. <https://www.mordorintelligence.com/>

Murray, J. C., Kiszonas, A. M., & Morris, C. F. (2017). Pasta production: Complexity in defining processing conditions for reference trials and quality assessment methods. *Cereal Chemistry*, 94(5), 791–797. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-01-17-0011-R>

Niu, M., Hou, G. G., Kindelspire, J., Krishnan, P., & Zhao, S. (2017). Microstructural, textural, and sensory properties of whole-wheat noodle modified by enzymes and emulsifiers. *Food Chemistry*, 223, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.12.012>

Obadi, M., & Xu, B. (2021). Review on the physicochemical properties, modifications, and applications of starches and its common modified forms used in noodle products. *Food Hydrocolloids*, 112, 106286. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106286>

Ogawa, T., & Adachi, S. (2017). Detection of cracks in dried spaghetti using transmission images. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 81(4), 750–754. <https://doi.org/10.1080/09168451.2016.1274641>

Ogawa, T., Chuma, A., Aimoto, U., & Adachi, S. (2017). Effects of drying temperature and relative humidity on spaghetti characteristics. *Drying Technology*, 35(10), 1214–1224. <https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1247214>

Ohmura, M., Matsumiya, K., Maeda, T., Fujita, A., Hayashi, Y., & Matsumura, Y. (2023). Effect of drying profiles on surface structure changes of durum wheat pasta during the boiling process. *LWT*, 173, 114175. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.114175>

Oliviero, T., & Fogliano, V. (2016). Food design strategies to increase vegetable intake: The case of vegetable enriched pasta. *Trends in Food Science & Technology*, 51, 58–64. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.03.006>

Osborne, T. B. (1907). *The proteins of the wheat kernel*. Carnegie Institute of Washington, Publication 84, Washington DC, USA.

Owens, G. (2001). *Cereals processing technology*. CRC Press.

Pagani, M. A. (2017). *Pasta and noodle technology*. Academic Press.

Pagani, M. A., Resmini, P., & Dalbon, G. (1989). Influence of the extrusion process on characteristics and structure of pasta. *Food Structure*, 8(2), Article 2.

PamaRoma. (n.d.). *Μηχανήματα μορφοποίησης της ζύμης με έλαση*. Retrieved September 3, 2025, from <https://www.pamaroma.com>

Pasqualone, A., Paradiso, V. M., Summo, C., Caponio, F., & Gomes, T. (2014). Influence of drying conditions on volatile compounds of pasta. *Food and Bioprocess Technology*, 7(3), 719–731. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1064-3>

Petitot, M., Abecassis, J., & Micard, V. (2009). Structuring of pasta components during processing: Impact on starch and protein digestibility and allergenicity. *Trends in Food Science & Technology*, 20(11–12), 521–532. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.06.005>

Petitot, M., Boyer, L., Minier, C., & Micard, V. (2009). Fortification of pasta with split pea and faba bean flours. *LWT - Food Science and Technology*, 43(8), 1373–1380. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.05.009>

Piwińska, M., Wyrwicz, J., Kurek, M. A., & Wierzbicka, A. (2016). Effect of drying methods on the physical properties of durum wheat pasta. *CyTA - Journal of Food*, 14(4), 523–528. <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1149557>

Prabhasankar, P., Ganesan, P., Bhaskar, N., & Sharma, V. (2009). Influence of whey protein concentrate on the rheological characteristics and quality of pasta. *Food Research International*, 42(5–6), 623–631. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.01.012>

Prakash, R., & Ravindra, M. R. (2021). Robotic engineering: A tool for quality and safety of foods. In *Handbook of research on food processing and preservation technologies: Volume 5: Emerging techniques for food processing, quality, and safety assurance* (pp. 311). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-8733-8.ch013>

Resmini, P., & Pagani, M. A. (1983). Pasta drying technology. *Cereal Chemistry*, 60(6), 433–437.

Romano, A., Di Luccia, A., Romano, R., Sarghini, F., & Masi, P. (2015). Microscopic and thermal characteristics of experimental models of starch, gliadins, glutenins and gluten from semolina. *Chemical Engineering Transactions*, 43, 163–168. <https://doi.org/10.3303/CET1543028>

Sabban, F., & Silvano, S. (2000). Pasta. In C. Z. Wilkins & R. Wilkins (Eds.), *Food: A culinary history from antiquity to the present* (pp. 24–34). Columbia University Press.

Sabban, F., & Silvano, S. (2000). Pasta. In C. Z. Wilkins & R. Wilkins (Eds.), *Food: A culinary history from antiquity to the present* (p. 64). Columbia University Press.

Sacchetti, G., Cocco, G., Cocco, D., Neri, L., & Mastrocola, D. (2011). Effect of semolina particle size on the cooking kinetics and quality of spaghetti. *Procedia Food Science*, 1, 1740–1745. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.256>

Samson, M.-F., Mabilie, F., Cheret, R., Abecassis, J. & Morel, M.-H. (2005). Mechanical and Physicochemical Characterization of Vitreous and Mealy Durum Wheat Endosperm. *Cereal Chemistry* 82 (1): 81–87.

Sarghini, F., Cavella, S., Torrieri, E., & Masi, P. (2005). Experimental analysis of mass transport and mixing in a single screw extruder for semolina dough. *Journal of Food engineering*, 68(4), 497-503.

Schober, T. J., & Bean, S. R. (2007). Gluten-free sorghum pasta: Influence of starch structure on pasta cooking quality. *Cereal Chemistry*, 84(1), 16–25. <https://doi.org/10.1094/CCHEM-84-1-0016>

Schober, T. J., & Bean, S. R. (2012). Sorghum and maize starches: The effects of gelatinization temperature on structural, thermal and rheological properties. *Starch*, 64(6), 436–445. <https://doi.org/10.1002/star.201100194>

Schofield, J. D., & Booth, M. R. (1983). Wheat proteins and their technological significance. In B. J. F. Hudson (Ed.), *Developments in food proteins* (Vol. 2, pp. 1–65). Applied Science Publishers.

Shelke, K. (2016). *Pasta and Noodles: a global history*. Reaktion Books.

Shewry, P. R., Halford, N. G., Tatham, A. S. (1992). High molecular weight subunits of wheat glutenin. *J. Cereal Sci.* (15), 105-120.

Seidemann, J. (1966). *Stärke und Stärkederivate*. Berlin: Springer.

Shelke, K. (2016). *Pasta and noodles: A global history*. Reaktion Books.

Sicignano, A., Di Monaco, R., Masi, P., & Cavella, S. (2015). From raw material to dish: Pasta quality step by step. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(13), 2579–2587. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7092>

Sissons, M.J, Egan, N. E., Gianbelli, M.C. (2005). New insights into the role of gluten on durum pasta quality using reconstitution method. *Cereal Chemistry* 82 (5): 627 601-608.

Sissons, M. (2008). Role of durum wheat composition on the quality of pasta and bread. *Food*, 2(2), 75–90.

Sissons, M., Abecassis, J., Marchylo, B., & Cubadda, R. (2012). Methods used to assess and predict quality of durum wheat, semolina, and pasta. In M. Sissons, J. Abecassis, B. Marchylo, & R. Cubadda (Eds.), *Durum wheat: Chemistry and technology* (2nd ed., pp. 213–234). AACC International. <https://doi.org/10.1016/B978-1-891127-65-6.50017-9>

Sozer, N., Dalgıç, A. C., & Kaya, A. (2007). Thermal, textural and cooking properties of spaghetti enriched with resistant starch. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 476–484. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.11.024>

Stevenson, S. G., Preston, K. R. (1996). Flow field-flow fractionation of wheat proteins. *J. Cereal Sci.* 23: 121-131.

Storci. (n.d.). *Products*. Storci. Retrieved September 3, 2025, from https://www.favastorci.com/Storci_Products.asp?lang=EN&gst=0&pid=7

Stuknytė, M., Cattaneo, S., Pagani, M. A., Marti, A., Micard, V., Hogenboom, J., & De Noni, I. (2014). Spaghetti from durum wheat: Effect of drying conditions on heat damage, ultrastructure and in vitro digestibility. *Food Chemistry*, 149, 40–46. doi:10.1016/j.foodchem.2013.10.071

Sung, W. C., & Stone, M. (2005). Microstructural studies of pasta and starch pasta. *Journal of Marine Science and Technology*, 13(2), 83–88.

Tagliasco, M., Fogliano, V., & Pellegrini, N. (2021). Pasta regrind: The effect of drying temperature on its functionality as a novel ingredient. *Food Structure*, 30, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2021.100230>

Taha, S. A., & Sági, F. (1987). Relationships between chemical composition of durum wheat semolina and macaroni quality. II. Ash, carotenoid pigments and oxidative enzymes. *Cereal Research Communications*, 15(2–3), 123–129.

Turnbull, K. (2001). Quality assurance in a dry pasta factory. In R. Kill & K. Turnbull (Eds.), *Pasta and semolina technology* (p. 217). Blackwell Science Ltd.

- Wasik, R. J. (1978). Relationship of protein composition of durum wheat with pasta quality and the effects of processing and cooking on these proteins. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 11(3), 129–133. [https://doi.org/10.1016/S0315-5463\(78\)73030-9](https://doi.org/10.1016/S0315-5463(78)73030-9)
- Webb, D. (2019). Pasta's history and role in healthful diets. *Nutrition Today*, 54(5), 213–220. <https://doi.org/10.1097/NT.0000000000000364>
- Wrigley, C. W. (1996). Giant proteins with flour power. *Nature*, 381(6585), 738–739. <https://doi.org/10.1038/381738a0>
- Wrigley, C. W., & Békés, F. (1999). Glutenin-protein formation during the continuum from anthesis to processing. *Cereal Foods World*, 44(8), 562–565.
- Xing, H., Takhar, P. S., Helms, G., & He, B. (2007). NMR imaging of continuous and intermittent drying of pasta. *Journal of Food Engineering*, 78(1), 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.09.028>
- Yalla, S. R., & Manthey, F. A. (2006). Effect of semolina and absorption level on extrusion of spaghetti containing non-traditional ingredients. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(5), 841–848. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2417>
- Yeasmen, N., Sharma, N., Bhuiyan, M. H. R., & Orsat, V. (2023). Ultrasound as a techno-functional modifier in food frying and bioactive compounds extraction. *Food Reviews International*. <https://doi.org/10.1080/87559129.2023.2204156>
- Yue, P., Rayas-Duarte, P., & Elias, E. (1999). Effect of drying temperature on physicochemical properties of starch isolated from pasta. *Cereal Chemistry*, 76(4), 541–547. <https://doi.org/10.1094/CCHEM.1999.76.4.541>
- Zardetto, S., & Dalla Rosa, M. (2009). Effect of extrusion process on properties of cooked, fresh egg pasta. *Journal of Food Engineering*, 92(1), 70–77. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.11.006>

