



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Χημικών Μηχανικών

Τομέας IV: ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

# ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΓΚΛΕΙΣΜΕΝΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΣΥΜΕΩΝΙΔΟΥ ΕΥΓΕΝΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ:  
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ ΤΖΙΑ, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΣΠΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2019

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη της Καθηγήτριας κας Κωνσταντίνας Τζιά. Ύστερα από την ολοκλήρωση της εργασίας νιώθω την ανάγκη να απευθύνω τις θερμές μου ευχαριστίες και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην κα Τζιά για την ανάθεση της εργασίας αλλά και για την υπομονή, την καθοδήγηση, την κατανόηση και την αμέριστη συμπαράστασή της. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τη Διδάκτορα Βιργινία Γιάννου για την πολύτιμη και ουσιαστική βοήθειά της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, για την προθυμία της και την ανεξάντλητη υπομονή της.

Επιπλέον, ευχαριστώ τους υποψήφιους διδάκτορες Μαρία Κατσούλη, Τρύφωνα Κεκέ, Παρασκευή Σιαμανδούρα και Γεωργία Φρακολάκη για την προθυμία τους να με βοηθήσουν ανά πάσα στιγμή και να με καθοδηγήσουν.

Ευχαριστώ όλο το προσωπικό, τους υποψήφιους διδάκτορες και τους υποψήφιους διπλωματούχους του εργαστηρίου Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων για τη φιλική ατμόσφαιρα που διαμόρφωσαν κατά τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων μου στο εργαστήριο. Επίσης, ευχαριστώ τους καθηγητές Δρ. Πέτρο Ταούκη και Δρ. Βασιλική Ωραιοπούλου για τις πολύτιμες και ουσιαστικές γνώσεις που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τις Διδάκτορες Θεοπίστη Λυμπεροπούλου και Καλλιόπη Μπαλτά για την παραχώρηση του εξοπλισμού του εργαστηρίου αλλά και την πολύτιμη βοήθειά τους και το φιλικό κλίμα κατά τη διεξαγωγή των αναλύσεων Φασματομετρίας Ατομικής Απορρόφησης.

Ευχαριστώ τη Δρ Αθανασία Κυρίτση από την εταιρεία Agrino για τη δωρεάν παραχώρηση των προϊόντων ρυζιού.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην οικογένειά μου και στους κοντινούς μου ανθρώπους για τη συμπαράσταση και την υποστήριξη που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα αλλά και όλα τα χρόνια της φοίτησής μου.

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2019

Ευγενία Συμεωνίδου

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b> .....	6
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	11
<b>1. ΡΥΖΙ</b> .....	13
1.1 ΡΥΖΙ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	13
1.1.1 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ .....	15
1.1.2 ΔΟΜΗ ΡΥΖΙΟΥ .....	17
1.1.2.1 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ ΤΟΥ ΡΥΖΙΟΥ .....	18
1.1.2.2 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΚΟΚΚΟΥ ΤΟΥ ΡΥΖΙΟΥ .....	20
1.1.3 ΤΥΠΟΙ ΡΥΖΙΟΥ .....	22
1.1.4 ΠΡΟΙΟΝΤΑ ΡΥΖΙΟΥ .....	24
1.1.5 ΣΥΣΤΑΣΗ .....	27
1.2 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΡΥΖΙΟΥ .....	34
<b>2. ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ</b> .....	39
2.1 ΣΙΔΗΡΟΣ .....	39
2.1.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ .....	40
2.1.1.1 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΣΙΔΗΡΟΥ – ΟΜΟΙΟΣΤΑΣΗ .....	41
2.1.1.2 ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑ ΣΙΔΗΡΟΥ .....	44
2.1.1.2.1 ΑΙΤΙΕΣ ΤΗΣ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΥ .....	45
2.1.1.2.2 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΥ .....	45
2.1.2 ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ .....	48
2.1.2.1 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ .....	49
2.1.2.2 ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ .....	50
2.1.3 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΥ .....	51
2.1.3.1 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΣΙΔΗΡΟ .....	51
2.1.3.1.1 ΠΡΟΣΘΕΤΑ – ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ ΣΙΔΗΡΟΥ .....	52
2.1.3.1.2 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΤΡΟΦΙΜΟ .....	53
2.1.3.1.3 ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ .....	54
2.2 ΘΕΙΑΜΙΝΗ .....	55
2.2.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ .....	56
2.2.1.1 ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ .....	56
2.2.1.2 ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ .....	57

2.2.1.2.1.	ΕΝΔΥΜΙΚΗ ΠΟΛΥΝΕΥΡΙΤΙΔΑ (BERI-BERI) .....	58
2.2.1.2.2.	ΚΛΙΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ.....	59
2.2.2	Η ΘΕΙΑΜΙΝΗ ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΟΦΗ.....	61
2.2.2.1	Η ΘΕΙΑΜΙΝΗ ΣΤΟ ΡΥΖΙ.....	62
2.2.2.2	ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΛΗΨΗΣ ΤΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ .....	63
2.2.3	ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΘΕΙΑΜΙΝΗ.....	65
2.3	ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΡΥΖΙΟΥ .....	66
<b>3.</b>	<b>ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΣ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ ΚΑΙ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ.....</b>	<b>70</b>
3.1	Ο ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΣ ΣΤΗΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ .....	72
3.2	ΕΓΚΛΕΙΣΤΙΚΑ ΜΕΣΑ.....	73
3.2.1	ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΕΣΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ.....	74
3.2.1.1	ΒΙΟ-ΥΛΙΚΑ ΩΣ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΗΤΡΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ.....	75
3.2.2	ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΦΟΡΕΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ .....	78
3.3.	ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ.....	79
3.4	ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΣ ΣΙΔΗΡΟΥ.....	84
3.5.	ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ .....	84
3.6.	ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΕΓΚΛΕΙΣΜΕΝΑ ΘΡΕΠΤΙΚΑ.....	85
<b>4.</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....</b>	<b>87</b>
4.1.	ΣΚΟΠΟΣ.....	87
4.2.	ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ .....	87
4.3.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ .....	90
4.3.1.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ.....	90
4.3.2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΡΥΖΙΟΥ ΚΑΙ ΡΥΖΑΛΕΥΡΟΥ.....	93
4.4.	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ .....	94
4.4.1.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ.....	94
4.4.2.	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ.....	95
4.5.	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ .....	96
4.5.1.	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ.....	96
4.5.1.1.	ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΜΕΣΩ ΦΑΣΜΑΤΟΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑΣ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ .....	96
4.5.1.2.	ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΓΚΛΕΙΣΟΥ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ ΜΕΣΩ ΥΓΡΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ .....	99
4.5.2.	ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΖΙΟΥ.....	101

4.5.2.1.	ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ .....	101
4.5.2.2.	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΣΤΟ ΡΥΖΙ .....	103
4.5.2.3.	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ ΣΤΟ ΡΥΖΙ.....	104
4.5.2.4.	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ .....	106
4.6.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ.....	108
4.6.1.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ.....	108
4.6.2.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ.....	108
4.6.3.	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ .....	109
<b>5.</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>	<b>110</b>
5.1.	ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ .....	110
5.1.1.	ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ .....	110
5.1.2.	ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ.....	112
5.2.	ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΕ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΡΥΖΙΟΥ.....	113
5.2.1.	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΙΡΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ.....	113
5.2.2.	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ .....	117
5.2.3.	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΧΡΩΜΑ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ .....	121
5.2.4.	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ .....	123
5.2.5.	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ .....	125
5.2.6.	ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ .....	126
<b>6.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....</b>	<b>128</b>
6.1.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	128
6.2.	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	130
	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....</b>	<b>131</b>
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>132</b>

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η έλλειψη βιταμινών και μετάλλων προκαλεί μία σημαντική διαταραχή στην υγεία, πλήττοντας μεγάλο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού. Συγκεκριμένα, οι ασθένειες που συνεπάγονται τόσο λόγω της έλλειψης σιδήρου όσο της έλλειψης θειαμίνης προσβάλλουν μεγάλες πληθυσμιακές ομάδες και έχουν δυσμενείς επιπτώσεις οδηγώντας πολλές φορές και στο θάνατο. Τα τελευταία χρόνια γίνεται μία προσπάθεια πρόληψης και αντιμετώπισης των ασθενειών αυτών, και έτσι επιχειρείται ο εμπλουτισμός βασικών τροφίμων με πηγές σιδήρου και θειαμίνης. Τα προϊόντα ρυζιού είναι μία ιδανική επιλογή για εμπλουτισμό με σίδηρο και θειαμίνη, καθώς αποτελούν το βασικό τρόφιμο σε πολλές περιοχές του πλανήτη. Επίσης, λόγω της επεξεργασίας στην οποία υποβάλλεται το ρύζι πριν την κατανάλωσή του, χάνει τα περισσότερα θρεπτικά συστατικά του και υποβαθμίζεται έτσι η ποιότητά του. Ενδείκνυται, επομένως, ο εμπλουτισμός των προϊόντων ρυζιού έτσι ώστε να ανακτηθούν ή και να ενισχυθούν οι αρχικά περιεχόμενες ποσότητες θρεπτικών συστατικών. Υπάρχουν, όμως, βασικοί περιορισμοί όσον αφορά τον εμπλουτισμό των προϊόντων ρυζιού με σίδηρο και θειαμίνη, όπως είναι οι ανεπιθύμητες μεταβολές στις οργανοληπτικές ιδιότητες που προκαλούνται στα τελικά προϊόντα και η μειωμένη βιοδιαθεσιμότητα των θρεπτικών. Οι περιορισμοί αυτοί μπορούν να αντιμετωπιστούν επιτυχώς, με την προσθήκη εγκλεισμένου σιδήρου και θειαμίνης έναντι των ελεύθερων μορφών, καθώς ο εγκλεισμός αποτελεί μία τεχνική η οποία αποδεδειγμένα αυξάνει τη βιοδιαθεσιμότητα της εγκλεισμένης ουσίας και προστατεύει τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά.

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε ο εγκλεισμός σιδήρου και θειαμίνης καθώς και η ενσωμάτωση των προϊόντων εγκλεισμού σε προϊόντα ρυζιού. Αρχικά, πραγματοποιείται ο εγκλεισμός θεικού σιδήρου ( $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ) και θειαμίνης σε ποικιλία φορέων εγκλεισμού με μία τροποποιημένη μέθοδο εξάτμισης διαλύτη. Τα εγκλειστικά μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται για τον εγκλεισμό του σιδήρου είναι: μαλτοδεξτρίνη, αραβικό κόμμι, τροποποιημένο άμυλο, πηκτίνη και ζελατίνη, καθώς και συνδυασμοί αυτών σε διάφορες αναλογίες. Για τον εγκλεισμό της θειαμίνης χρησιμοποιούνται τα εγκλειστικά μέσα αραβικό κόμμι και πηκτίνη σε αναλογία 1 : 2. Τα προϊόντα εγκλεισμού του σιδήρου αξιολογούνται και συγκρίνονται ως προς την ικανότητα συγκράτησης του σιδήρου μέσω Φασματοφωτομετρίας ορατού φωτός, ενώ το προϊόν εγκλεισμού θειαμίνης αξιολογείται ως προς την ικανότητα συγκράτησης θειαμίνης μέσω Υγρής Χρωματογραφίας Υψηλής Απόδοσης (HPLC).

Η μέθοδος εγκλεισμού του σιδήρου αποδεικνύεται αρκετά αποτελεσματική καθώς οι αποδόσεις εγκλεισμού κυμαίνονται από 73,87% (Αραβικό κόμμα) έως 98,84% (Πηκτίνη : Αραβικό κόμμα σε αναλογία 1 : 2). Ως φορείς με την υψηλότερη ικανότητα συγκράτησης σιδήρου αναδεικνύονται οι συνδυασμοί αραβικού κόμματος με πηκτίνη ή ζελατίνη. Η μέθοδος εγκλεισμού της θειαμίνης είναι σαφώς λιγότερο αποτελεσματική από αυτή του σιδήρου, καθώς η απόδοσή της έφτασε έως 58,84%.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η επιλογή των προϊόντων εγκλεισμού με τις καλύτερες ιδιότητες συγκράτησης σιδήρου και η ενσωμάτωσή τους σε προϊόντα ρυζιού καθώς και η ενσωμάτωση του προϊόντος εγκλεισμού θειαμίνης στα προϊόντα ρυζιού. Τα προϊόντα ρυζιού τα οποία χρησιμοποιήθηκαν είναι προσφορά της εταιρείας Agrino, και αποτελούνται από 2 τύπους ρυζιού Parboiled, καστανό ρύζι, λευκό ρύζι και λευκό ρυζάλευρο. Τα εγκλειστικά μέσα που επιλέχθηκαν είναι τα μίγματα Πηκτίνη : Αραβικό κόμμα (1:2), Μαλτοδεξτρίνη : Αραβικό κόμμα : Τροποποιημένο άμυλο (4:1:1) και Ζελατίνη : Αραβικό κόμμα (1:2). Το προϊόν εγκλεισμού Ζελατίνη : Αραβικό κόμμα δεν οδήγησε σε επιτυχή εμπλουτισμό στα ρύζια, καθώς η ζελατίνη μόλις έρθει σε επαφή με το νερό ζελατινοποιείται και το διάλυμα δεν μπορεί να διαλυτοποιηθεί ώστε να απορροφηθεί από το ρύζι. Έτσι, αυτό το προϊόν εγκλεισμού χρησιμοποιείται μόνο για τον εμπλουτισμό του ρυζάλευρου, καθώς δεν υπάρχει επαφή με νερό.

Όλα τα προϊόντα ρυζιού εμπλουτίζονται με 25 mg σιδήρου ή θειαμίνης ανά 100 g. Η μέθοδος εμπλουτισμού η οποία εφαρμόζεται τα ρύζια είναι η εμφάπτιση, ενώ στο ρυζάλευρο εφαρμόζεται η μέθοδος της ανάμιξης. Ακολουθεί το μαγείρεμα των ρυζιών με κατάλληλη ποσότητα νερού, η οποία βρέθηκε μετά από δοκιμές, ώστε όλο το νερό να απορροφάται από το ρύζι και έτσι να μην υπάρχουν απώλειες θρεπτικών. Στην περίπτωση του ρυζάλευρου, πραγματοποιήθηκε ξήρανση του μίγματος ρυζάλευρο – προϊόν εγκλεισμού.

Εν συνεχεία, εκτιμήθηκαν οι ιδιότητες του χρώματος, των χαρακτηριστικών υψής, της υγρασίας και της ενεργότητας νερού των μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού, εμπλουτισμένων με σίδηρο και θειαμίνη όπως και των μη εμπλουτισμένων προϊόντων. Επιπλέον ελέγχθηκε στα προϊόντα ρυζιού ο περιεχόμενος σίδηρος με Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης (AAS) και η περιεχόμενη θειαμίνη με Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Ανάλυσης (HPLC). Ο προσδιορισμός των θρεπτικών πραγματοποιήθηκε στα ξηρά και μαγειρεμένα προϊόντα ρυζιού, εμπλουτισμένα όπως και μη εμπλουτισμένα. Επίσης, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση συστήματος βιολογικής πέψης των προϊόντων ρυζιού με σκοπό την εύρεση του ποσοστού της βιοδιαθεσιμότητας του σιδήρου και της θειαμίνης.

Τα αποτελέσματα των προαναφερθεισών μετρήσεων έδειξαν ότι μετά τον εμπλουτισμό δεν υπάρχει κάποια σημαντική μεταβολή στο χρώμα, τη σκληρότητα και την ενεργότητα νερού των τελικών (εμπλουτισμένων) προϊόντων ρυζιού. Επίσης, βρέθηκε ότι ο εμπλουτισμός των προϊόντων ρυζιού με εγκλεισμένα θρεπτικά, παρέχει αυξημένες ποσότητες περιεχόμενου και βιοδιαθέσιμου σιδήρου και θειαμίνης.

Εξάγεται, λοιπόν, το συμπέρασμα ότι ο εμπλουτισμός προϊόντων ρυζιού με εγκλεισμένο σίδηρο και εγκλεισμένη θειαμίνη αποτελεί μία ελπιδοφόρα εναλλακτική εμπλουτισμού, με πολλά περιθώρια εξέλιξης.



## SUMMARY

The lack of vitamins and minerals is a major health disorder, affecting a large part of the world's population. In particular, diseases involving both the lack of iron and the lack of thiamine infect large populations and have adverse effects, often resulting in death. In recent years an attempt has been made to prevent and treat these diseases, so the fortification of basic foods with sources of iron and thiamine is attempted. Rice products are an ideal choice for enrichment with iron and thiamine, as they are the staple food in many areas of the planet. Also, due to the process it undergoes before consumption, most nutrients are lost, thus degrading its quality. It is therefore appropriate to fortify the rice products in order to recover or even enhance the initially contained nutrient quantities. There are, however, basic restrictions regarding the fortification of rice products with iron and thiamine, such as undesirable organoleptic changes in final products and the reduced bioavailability of nutrients. These restrictions can be successfully addressed by adding encapsulated iron and thiamine instead of free, as encapsulation is a technique that is proven to increase the bioavailability of the encapsulated substance and protects from organoleptic changes.

This thesis examined the encapsulation of iron and thiamine and the fortification of encapsulated products in rice products. Initially, iron sulfate ( $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ) and thiamine are encapsulated in a variety of carrier materials with freeze-drying method. The carrier materials used for the encapsulation of iron are: maltodextrin, arabic gum, modified starch, pectin and gelatin, as well as combinations of these in various proportions. For the encapsulation of thiamine, the carrier materials used are Arabic gum and Pectin at a ratio of 2 : 1. Iron encapsulated products are evaluated and compared according to their ability to restrain iron using Visible Spectroscopy, while the encapsulated product of thiamine is evaluated according to the ability to restrain thiamine using High – Performance Liquid Chromatography (HPLC).

The method of encapsulation of iron proves to be quite effective as the encapsulation yields range from 73.87% (Arabic gum) up to 98.84% (pectin: Arabic Gum in a ratio of 1 : 2). The carriers with the best iron retention capabilities, are the combination of Arabic Gum with pectin or gelatin. The method of encapsulation of thiamine is clearly less effective than that of iron, since its performance is 58.84%.

Subsequently, the products of encapsulation with the best qualities of iron retaining are selected and they are enriched into rice products. The selected carrier materials are the mixtures Pectin : Arabic Gum (1:2), Maltodextrin : Arabic Gum : Modified starch (4:1:1) and Gelatin: Arabic Gum (1:2). The encapsulated product Gelatin : Arabic Gum failed to be enriched in rice, as gelatin

becomes gelatinized and the solution cannot be solubilized to be absorbed by the rice. Thus, this encapsulated product is used only to enrich the rice flour, as there is no contact with water. The rice products that are used, are offered by Agrino, and consist of 2 types of parboiled rice, brown rice, white rice, and white rice flour.

All rice products are fortified with 25 mg of iron or thiamine per 100 g. The method of enrichment applied to rice is immersion, while in rice flour the mixing method is applied. The cooking of rice follows with a suitable amount of water, which it was found after testing so that all the water was absorbed from rice and thus there are no nutrient losses. In the case of rice flour, the mixture of rice flour and product of encapsulation was dried.

The color and texture characteristics, the water activity and the humidity of cooked rice products enriched with iron and thiamine and non-enriched products are measured. After that, the determination of the iron content with Spectrometry Atomic absorption (AAS) and the determination of thiamine content with high-performance liquid chromatography (HPLC) follow. The determination of nutrients was held in dry and cooked rice products, enriched and non-enriched. There was also a simulation of a biological digestion system in order to find the percentage of bioavailability of iron and thiamine.

The results of the aforementioned measurements showed that there is no significant change in color, hardness, humidity and water activity of the final enriched rice products. It was also found that the fortification of rice products with encapsulated nutrients provides increased amounts of bioavailable iron and thiamine. It is therefore concluded that the fortification of rice products with encapsulated iron and thiamine is a promising alternative way of enrichment, offering many possibilities for development.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

Το ρύζι ανήκει στην κατηγορία των δημητριακών και έχει παγκοσμίως μεγάλη σημασία, καθώς αποτελεί τη βασική τροφή για το μεγαλύτερο από το ήμισυ του πληθυσμού της γης ενώ παρέχει σε πολλές χώρες το μεγαλύτερο μέρος της απαραίτητης ενέργειας σε θερμίδες. Η παραγωγή ρυζιού μπορεί να χαρακτηριστεί ως μία από τις πιο σημαντικές οικονομικές δραστηριότητες, καθώς περισσότερο από 2 δισεκατομμύρια φτωχών ανθρώπων εξαρτώνται από αυτή για τις καθημερινές διατροφικές τους ανάγκες. Το ρύζι αποτελείται στο μεγαλύτερο ποσοστό του από άμυλο, αλλά και πρωτεΐνες, βιταμίνες (θειαμίνη, ριβοφλαβίνη, νιασίνη) και ιχνοστοιχεία (σίδηρο, μαγνήσιο, κάλιο, ψευδάργυρο). Επιπλέον, αφομοιώνεται εύκολα από τον οργανισμό και έτσι αποτελεί θαυμάσια τροφή για όλες τις πληθυσμιακές ομάδες. Ωστόσο, η επεξεργασία στην οποία υποβάλλεται πριν την κατανάλωση έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια των περισσότερων θρεπτικών του συστατικών.

Ο σίδηρος αποτελεί ένα απαραίτητο ανόργανο στοιχείο για όλους τους οργανισμούς, καθώς έχει σημαντικό ρόλο στο μεταβολισμό. Επιτελεί ποικίλες βιολογικές λειτουργίες, όπως η μεταφορά και αποθήκευση του οξυγόνου στους βιολογικούς ιστούς και άλλες βασικές κυτταρικές λειτουργίες οι οποίες σχετίζονται με τις αλλαγές στην οξειδωτική του κατάσταση και στη μεταφορά ηλεκτρονίων. Η ανεπάρκεια του σιδήρου μπορεί να προκαλέσει διάφορες δυσλειτουργίες και παθήσεις στον οργανισμό, με σημαντικότερη τη σιδηροπενική αναιμία. Ο σίδηρος που λαμβάνεται μέσω της διατροφής διακρίνεται στον σίδηρο ζωικής προέλευσης ή αιματικό σίδηρο και στο σίδηρο φυτικής προέλευσης ή αλλιώς μη αιματικό σίδηρο. Από τις δύο αυτές μορφές, ο αιματικός σίδηρος απορροφάται επαρκώς από τον οργανισμό, σε αντίθεση με τον μη αιματικό σίδηρο. Η απορρόφηση του μη αιματικού σιδήρου επηρεάζεται από διάφορους ενισχυτικούς ή κατασταλτικούς παράγοντες. Σε περίπτωση ανεπάρκειας σιδήρου προτείνεται η αντιμετώπιση μέσω κατανάλωσης τροφίμων που είναι πλούσια σε σίδηρο. Παρόλα αυτά, ο σίδηρος που παρέχεται από τα τρόφιμα στις περισσότερες περιπτώσεις είτε δεν είναι επαρκής είτε δεν απορροφάται από τον οργανισμό. Έτσι προτείνεται ο εμπλουτισμός των τροφίμων με προσθήκη σιδήρου.

Η θειαμίνη, ή αλλιώς βιταμίνη B1, αναγνωρίστηκε ως βιταμίνη το 1912 και η δομή της αποσαφηνίστηκε το 1936. Βρίσκεται σε μεγάλη περιεκτικότητα στους σπόρους των δημητριακών και στη μαγιά της μύρας, ενώ είναι μία από τις πιο ευαίσθητες στις περιβαλλοντικές συνθήκες βιταμίνες. Είναι υδατοδιαλυτή και καταστρέφεται με το

μαγείρεμα, την απόψυξη κατεψυγμένων φαγητών το φως αλλά και την ύπαρξη αλκαλικού περιβάλλοντος. Η θειαμίνη είναι παρούσα στο αίμα, κυρίως στα κόκκινα και τα λευκά αιμοσφαίρια. Η έλλειψη θειαμίνης μπορεί να προέλθει από κατανάλωση αποφλοιωμένου ρυζιού ή από βλάβη της εντερικής απορρόφησης εξαιτίας εντερικών παθήσεων, όπως οι χρόνιες κολίτιδες. Ακόμα ο αλκοολισμός είναι μια αιτία που μπορεί να οδηγήσει σε αβιταμίνωση Β1. Η έλλειψη της βιταμίνης Β1 προκαλεί την ασθένεια ενδυμική πολυνευρίτιδα ή μπέρι-μπέρι, η οποία χαρακτηρίζεται από αλλοιώσεις των νεύρων, ατονία και δυσκαμψία των μελών και, στη συνέχεια, μυϊκή ατροφία και καρδιακή ανεπάρκεια. Μέχρι σήμερα δεν έχει αναφερθεί υπερβιταμίνωση θειαμίνης καθώς ως υδατοδιαλυτή, οι επιπλέον ποσότητες της αποβάλλονται χωρίς να συσσωρεύονται στον οργανισμό. Όπως και στην περίπτωση του σιδήρου, έτσι και στη θειαμίνη προτείνεται ο εμπλουτισμός βασικών τροφίμων με προσθήκη θειαμίνης με σκοπό την πρόληψη και αντιμετώπιση της εν λόγω ανεπάρκειας.

Έχει παρατηρηθεί ότι ο εμπλουτισμός των τροφίμων με ελεύθερα θρεπτικά συστατικά έχει πολλές φορές δυσμενείς επιπτώσεις στα οργανοληπτικά τους χαρακτηριστικά. Γι' αυτό τα τελευταία χρόνια αυξάνεται το ενδιαφέρον για τον εμπλουτισμό των τροφίμων με εγκλεισμένα προϊόντα. Ο εγκλεισμός είναι μία τεχνική παγίδευσης των θρεπτικών εντός κάποιων φορέων εγκλεισμού, τα οποία στη συνέχεια προστίθενται στο τρόφιμο που πρέπει να εμπλουτιστεί. Σκοπός του εγκλεισμού είναι η αποφυγή της αλληλεπίδρασης των θρεπτικών με τα υπόλοιπα συστατικά του τροφίμου που θα έχει ως αποτέλεσμα αλλαγές στο χρώμα, τη γεύση ή το άρωμά του. Επίσης, ο εγκλεισμός έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της απορρόφησης των θρεπτικών από τον οργανισμό.

Ο εμπλουτισμός προϊόντων ρυζιού με εγκλεισμένα θρεπτικά και συγκεκριμένα σίδηρο και θειαμίνη που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική, αποτελεί ένα σχετικά ανεξερεύνητο πεδίο, παρά τη μακρόχρονη ιστορία του εγκλεισμού. Στόχος της εργασίας αυτής ήταν να διερευνηθεί εάν ο εγκλεισμός του σιδήρου και της θειαμίνης προστατεύει τα προϊόντα ρυζιού από την αλλοίωση των οργανοληπτικών τους χαρακτηριστικών και εάν συμβάλλει στην αύξηση της βιοδιαθεσιμότητας των θρεπτικών αυτών.

# 1. ΡΥΖΙ

---

## 1.1 ΡΥΖΙ – ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το ρύζι είναι η σημαντικότερη καλλιέργεια δημητριακών στον αναπτυσσόμενο κόσμο και αποτελεί το βασικό τρόφιμο για περισσότερο από το ήμισυ του παγκόσμιου πληθυσμού. Είναι ανθεκτικό σε ξηρασία, σε πλημμύρες, σε ζεστές, δροσερές, υγρές και ξηρές συνθήκες και αναπτύσσεται σε αλατούχα, αλκαλικά και όξινα εδάφη. Γενικά θεωρείται ένα ημι-υδρόβιο φυτό και καλλιεργείται μία φορά το έτος σε περισσότερες από 100 χώρες.

Το ρύζι ανήκει στην οικογένεια Gramineae και στο γένος Oryzae. Αναγνωρίζονται 23 διαφορετικά είδη Oryzae, εκ των οποίων μόνο δύο καλλιεργούνται: *Oryza sativa* L., που προέρχεται από την Ασία και το είδος *O. glaberrima*, από τη Δυτική Αφρική (Wopereis, Defoer, Idinoba, Diack, & Dugué, 2009).

Στο είδος *Oryza sativa* διακρίνονται τρεις οικότυποι με βάση οικογεωγραφικά κριτήρια. Το ασιατικό καλλιεργημένο ρύζι έχει εξελιχθεί σε τρεις γεωγραφικές φυλές τις: *indica*, *japonica* (ή *sinica*) και *javanica* (ή *bulu*), οι οποίες προέρχονται από την Ινδία, την Κίνα και την Ινδονησία αντίστοιχα. Το λεγόμενο "άγριο ρύζι" (*Zizania aquatica*), που καλλιεργείται στην περιοχή των Μεγάλων Λιμνών των Ηνωμένων Πολιτειών, έχει μεγαλύτερη συγγένεια με τη βρώμη παρά με το ρύζι.



Εικόνα 1.1 : *Oryza sativa*

Η ακριβής γεωγραφική θέση της προέλευσης του ρυζιού δεν είναι ακόμη γνωστή. Υπάρχουν ενδείξεις ότι το ρύζι καλλιεργήθηκε στην Ινδία μεταξύ του 1500 και του 2000 π.Χ. και στην Ινδονησία περίπου το 1648 π.Χ. Τα αρχαιολογικά ευρήματα έδειξαν ότι καλλιεργήθηκαν

τροπικά ή ινδικά ρύζια στο Ho-mu-tu, στην επαρχία Chekiang της Κίνας τουλάχιστον πριν από 7000 χρόνια. Πρόσφατα, στο Λουιζιά-Τζιόο και στην επαρχία Τσεκιάγκ βρέθηκαν υπολείμματα ρυζιού sinica (japonica) της ίδιας ηλικίας. Το ρύζι διαδόθηκε γρήγορα από τα τροπικά (νοτιοδυτικά και νοτιοανατολικά της Ασίας) και από τα υποτροπικά (νοτιοδυτικά και νοτιοανατολικά της Κίνας) περιβάλλοντα, σε πολύ υψηλότερα γεωγραφικά μήκη και πλάτη στην Ασία, φτάνοντας στην Ιαπωνία μόλις πριν από 2.300 χρόνια. Τους τελευταίους έξι αιώνες εισήχθη σε σημεία μέχρι τη Δυτική Αφρική, τη Βόρεια Αμερική και την Αυστραλία.

Η καλλιέργεια του ρυζιού καθιερώθηκε σταθερά στη Νότια Καρολίνα στις Ηνωμένες Πολιτείες γύρω στο 1690. Στην Ευρώπη καλλιεργήθηκε τον όγδοο αιώνα στην Πορτογαλία και την Ισπανία και από τον ένατο έως το δέκατο αιώνα στη νότια Ιταλία.

**Πίνακας 1.1 : Οι 10 χώρες με τη μεγαλύτερη παραγωγή στον κόσμο για το 2010** (Global Rice Science Partnership, 2013, pp. 272–273)

<b>ΧΩΡΑ</b>	<b>ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΥΖΙΟΥ (tn)</b>
<b>Κίνα</b>	197,212,010
<b>Ινδία</b>	143,963,000
<b>Ινδονησία</b>	66,469,400
<b>Μπαγκλαντές</b>	50,061,200
<b>Βιετνάμ</b>	39,988,900
<b>Μιανμάρ</b>	33,204,500
<b>Ταϊλάνδη</b>	31,597,200
<b>Φιλιππίνες</b>	15,771,700
<b>Βραζιλία</b>	11,236,000
<b>Ιαπωνία</b>	10,600,000

Λόγω της μακρόχρονης ιστορίας της καλλιέργειάς του σε διαφορετικά μέρη και κάτω από ποικίλες περιβαλλοντικές συνθήκες, το ρύζι έχει αποκτήσει την ικανότητα προσαρμογής και αντοχής, ώστε να μπορεί να καλλιεργηθεί σε ένα ευρύ φάσμα συστημάτων νερού / εδάφους από πλημμυρισμένη γη, σε ξηρές λοφώδεις πλαγιές. Στην Ασία έχουν αναπτυχθεί ποικιλίες με ανθεκτικότητα στην τοξικότητα του αργιλίου, με αντοχή ακόμη και κάτω από το νερό και ανθεκτικότητα σε υψηλή αλατότητα και ψυχρές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο στάδιο της σποράς ή της ωρίμανσης. Στην Αφρική αναπτύχθηκαν και καλλιεργήθηκαν ποικιλίες με ανοχή στην τοξικότητα του σιδήρου και σε θερμοκρασιακούς περιορισμούς. Το

ρύζι καλλιεργείται σήμερα σε περισσότερες από 100 χώρες σε κάθε ήπειρο, εκτός από την Ανταρκτική (<http://www.fao.org>; Juliano, 1993).

Τα παράσιτα και οι ασθένειες αποτελούν μεγάλα προβλήματα στις τροπικές περιοχές, ιδίως στις περιοχές με μονοκαλλιέργεια ρυζιού. Τα τρωκτικά, τα πουλιά και τα χρυσά σαλιγκάρια μειώνουν την απόδοση παραγωγής του ρυζιού. Τα μεγαλύτερα παρασιτικά έντομα είναι ο κίτρινος "τρυπητής" του στελέχους, το έντομο του πράσινου φύλλου, το οποίο είναι ο φορέας του ιού tungro και τα έντομα των καφέ φυτών, τα οποία προκαλούν καψίματα. Ο έλεγχος των εντόμων έχει επιχειρηθεί από ποικιλίες αναπαραγωγής με βελτιωμένη αντοχή στα παράσιτα. Η ολοκληρωμένη διαχείριση των επιβλαβών οργανισμών για το ρύζι, γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής όσον αφορά το πρόβλημα της υπερβολικής αύξησης των εντόμων από την υπερβολική χρήση εντομοκτόνων. Οι κύριες ασθένειες των φυτών ρυζιού στην τροπική Ασία παραμένουν η επιδημία του μύκητα του ρυζιού και η βακτηριακή ασθένεια των φύλλων. Η ύπαρξη πολλών ειδών επιδημίας των μυκήτων κάνει τον έλεγχο δύσκολο. Αυτό αποτελεί μεγάλο πρόβλημα για το ορεινό ρύζι. Τα μαμούνια του ρυζιού (σιταρόψειρες) και των λευκών φύλλων («hoja blanca») είναι τα κύρια προβλήματα στην Λατινική Αμερική, ενώ στην Αφρική κυριαρχεί ο κίτρινος ιός και η διόπωση. Η ενσωμάτωση της ανθεκτικότητας στις ποικιλίες ρυζιού περιπλέκεται από την παρουσία πολλών ειδών ασθενειών (Juliano, 1993).

### 1.1.1 ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

Το ρύζι, το σιτάρι και ο αραβόσιτος είναι οι τρεις κορυφαίες καλλιέργειες τροφίμων στον κόσμο. Μαζί παρέχουν περισσότερο από το 42% όλων των θερμίδων που καταναλώνονται από ολόκληρο τον ανθρώπινο πληθυσμό. Το σιτάρι έχει τη μεγαλύτερη παραγωγή, καθώς κάθε χρόνο διατίθενται για τη συγκομιδή του 225 εκατομμύρια εκτάρια γης (ha), και ακολούθως το ρύζι και ο αραβόσιτος με 159 εκατομμύρια εκτάρια γης. Η κατανάλωση του ρυζιού για το 2009 αντιπροσώπευε το 78% της συνολικής παραγωγής, σε σύγκριση με την 64% για το σιτάρι και 14% για τον αραβόσιτο.

Από τις τρεις αυτές μεγάλες καλλιέργειες, το ρύζι είναι με διαφορά το πιο σημαντικό όσον αφορά την ανθρώπινη κατανάλωση σε χώρες χαμηλού εισοδήματος. Συγκεκριμένα, το 2008, το 94% της συνολικής έκτασης ρυζιού βρισκόταν σε χώρες με χαμηλό εισόδημα σε σύγκριση με μόλις 52% για τον αραβόσιτο και 41% για το σιτάρι (Global Rice Science Partnership, 2013, pp. 10–11).

Το ρύζι αποτελεί τη βασική τροφή σε 39 χώρες. Η καλλιέργειά του παρουσιάζει σταθερά αυξητική τάση τα τελευταία χρόνια και η παραγωγή του έχει τριπλασιαστεί σε σχέση με την αντίστοιχη πριν από 30 έτη, λόγω βελτίωσης της απόδοσής του. Η αύξηση της συνολικής κατανάλωσης σχετίζεται στενά με την αύξηση του πληθυσμού και του εισοδήματος (FAO, 2016).

Με βάση τα στοιχεία για την ποσότητα της παραγωγής ρυζιού, για το 2016, που υπολογίζονται από τον Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO), περίπου 740 εκατομμύρια τόνοι ρυζιού συλλέγονται σε όλο τον κόσμο. Από αυτά, το 90% (περίπου 670 εκατομμύρια τόνοι) παράγονται και καταναλώνονται στην Ασία (Πίνακας 1), ιδιαίτερα στις ανατολικές, νότιες και νοτιοανατολικές περιοχές (Πίνακας 2) (FAO, 2016). Περίπου το 95 % της παγκόσμιας παραγωγής ρυζιού παράγεται σε αναπτυσσόμενες χώρες, σε αντίθεση με το ποσοστό της παραγωγής άλλων σιτηρών, όπου μόνο το 42% παράγεται στις αναπτυσσόμενες χώρες (Juliano, 1993, p. 3). Η ενεργειακή εξάρτηση από το ρύζι στη Νότια και Νοτιοανατολική Ασία είναι υψηλότερη από αυτή οποιουδήποτε άλλου κύριου προϊόντος σε άλλες περιοχές. Η Νότια Ασία έχει επίσης τη χαμηλότερη πρόσληψη ενέργειας. Το ρύζι παρέχει το 35 έως 59 % της ενέργειας σε 2.700 εκατομμύρια άτομα στην Ασία. Η Κίνα συγκεκριμένα, είναι η χώρα με την μεγαλύτερη παραγωγή και κατανάλωση ρυζιού, αντιπροσωπεύοντας το 31% της παγκόσμιας παραγωγής (Mew, Brar, Peng, Dawe, & Hardy, 2003). Ένας μέσος όρος 8% της ενεργειακής κατανάλωσης τροφοδοτείται από ρύζι για 1.000 εκατομμύρια ανθρώπους στην Αφρική και τη Λατινική Αμερική (Juliano, 1993, p. 17).

**Πίνακας 1.2 : Συνολική παραγωγή ρυζιού σε κάθε ήπειρο (FAO, 2016)**

<b>ΗΠΕΙΡΟΣ</b>	<b>ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΥΖΙΟΥ (tn)</b>
<b>Αφρική</b>	32,497,773
<b>Αμερική</b>	36,029,484
<b>Ασία</b>	667,932,238
<b>Ευρώπη</b>	4,219,382
<b>Ωκεανία</b>	282,567
<b>ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ</b>	<b>740,961,445</b>



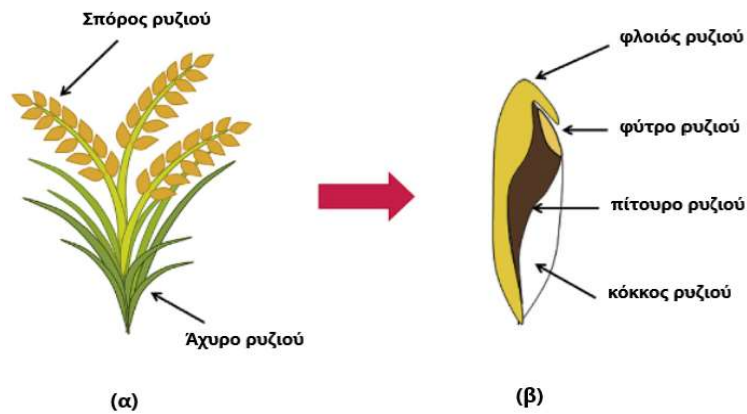
**Πίνακας 1.3 : Συνολική παραγωγή ρυζιού σε κάθε τμήμα της Ασίας (FAO, 2016)**

<b>ΠΕΡΙΟΧΗ</b>	<b>ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΡΥΖΙΟΥ (tn)</b>
<b>Κεντρική Ασία</b>	921,153
<b>Ανατολική Ασία</b>	227,295,820
<b>Νότια Ασία</b>	232,994,388
<b>Νατιοανατολική Ασία</b>	205,614,152
<b>Δυτική Ασία</b>	1,106,726

Μία επισκόπηση της κατανάλωσης ρυζιού στην Ευρώπη δείχνει ότι η Ελλάδα κατατάσσεται στις πρώτες χώρες, αποκλίνοντας σημαντικά από τον μέσο όρο της Ευρώπης. Η κατανάλωση ρυζιού στην Ελλάδα δεν έχει υποστεί ουσιαστικές αλλαγές, καθώς παραμένει στο ίδιο επίπεδο τα τελευταία χρόνια (περίπου 6,3 κιλά ανά κάτοικο ετησίως). Ωστόσο, υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι οι προτιμήσεις όσον αφορά την ποιότητα του ρυζιού έχουν παρουσιάσει σημαντικές αλλαγές. Πιο συγκεκριμένα, το ρύζι Japonica φαίνεται να είναι ο πλέον προτιμητέος τύπος από τους Έλληνες καταναλωτές. Ωστόσο, η κατανάλωση ρυζιού Indica αντιπροσωπεύει περίπου το 35% της συνολικής εγχώριας κατανάλωσης. Από το ρύζι τύπου Japonica, οι Έλληνες μάλλον προτιμούν να καταναλώνουν το μακύσπερμο από το μεσόσπερμο ρύζι (Ntanos, 2001).

### 1.1.2 ΔΟΜΗ ΡΥΖΙΟΥ

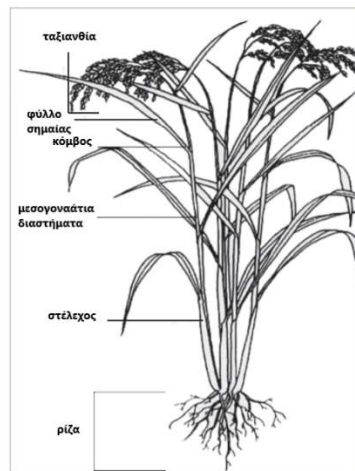
Τα φυτά ρυζιού αποτελούνται από τους σπόρους ρυζιού και το άχυρου ρυζιού. Ο σπόρος ρυζιού (Σχήμα 1β) χωρίζεται σε τέσσερα κλάσματα, το φλοιό, το φύτρο, το πίτουρο και τον κόκκο. Η εμπορική επεξεργασία του ρυζιού περιλαμβάνει δύο εργασίες, την αποφλοιώση και τη στίλβωση. Κατά τη διαδικασία της αποφλοιώσης, αφαιρείται ο φλοιός ρυζιού (ένα σκληρό κέλυφος που προστατεύει τον πυρήνα) και το υπόλοιπο προϊόν, γνωστό ως καστανό ρύζι, αποτελείται από το πίτουρο, το φύτρο και τον κόκκο. Κατά τη διαδικασία της στίλβωσης, το καστανό ρύζι διαχωρίζεται σε πίτουρο και σε κόκκους (λευκό ρύζι). Αυτή η εμπορική διαδικασία οδηγεί σε προϊόντα χαμηλής διατροφικής αξίας, όπως ο φλοιός, το πίτουρο και το φύτρο.



Εικόνα 1.2 : Δομή του φυτού του ρυζιού (α) και του κόκκου του ρυζιού (β)

#### 1.1.2.1. ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΦΥΤΟΥ ΤΟΥ ΡΥΖΙΟΥ

Το ρύζι είναι μονοκοτηλήδονο, ποώδες, ετήσιο φυτό, κυρίως αυτογονιμοποιούμενο με μικρό ποσοστό διασταυρούμενης γονιμοποίησης από 1 έως 4%. Το φυτό του ρυζιού έχει στρογγυλά και κοίλα στελέχη, επίπεδα φύλλα και άνθη στην κορυφή του. Είναι ένα πολύ ευέλικτο και προσαρμόσιμο φυτό που αναπτύσσεται καλά κάτω από τις πλημμυρισμένες και τις βροχερές συνθήκες. Το φυτό περιλαμβάνει τα βλαστικά όργανα, δηλαδή τη ρίζα, το στέλεχος, τα φύλλα και τα αναπαραγωγικά όργανα, δηλαδή τα άνθη και την ταξιανθία, η οποία περιλαμβάνει τα στάχια.



Εικόνα 1.3 : Παράδειγμα φυτού *Orzya sativa*

Οι **ρίζες** συγκρατούν το φυτό του ρυζιού στο έδαφος και απορροφούν το νερό και τα θρεπτικά συστατικά. Όπως και άλλα είδη της οικογένειας Gramineae, το ριζικό σύστημα του ρυζιού είναι σχετικά ρηχό, ειδικά κάτω από πλημμυρισμένες συνθήκες. Το 95% των ριζών βρίσκεται από 0 έως 0,2 m κάτω από το έδαφος.

Το **στέλεχος** αποτελείται από μία σειρά από κόμβους και μεσογονάτια διαστήματα. Τα μεσογονάτια διαστήματα είναι κοίλοι κόμβοι, με λεία επιφάνεια. Αυτοί που βρίσκονται χαμηλότερα είναι μικρότεροι από εκείνους που βρίσκονται πιο ψηλά. Όσο πιο μικρά είναι τα χαμηλότερα μεσογονάτια διαστήματα, τόσο πιο ανθεκτικό είναι το φυτό. Κάθε κόμβος έχει ένα φύλλο και ένα βλαστό που μπορεί να εξελιχθεί σε μίσχο. Η ευρωστία, η οποία συνδέεται με τη διάμετρο, και το ύψος των στελεχών είναι επίσης κριτήρια που επηρεάζουν την ανθεκτικότητα του φυτού. Από τους κόμβους του κύριου στελέχους, αναπτύσσονται και άλλοι μίσχοι, που ονομάζονται δευτερογενείς μίσχοι, και μπορούν με τη σειρά τους να παράγουν τριτογενείς μίσχους.

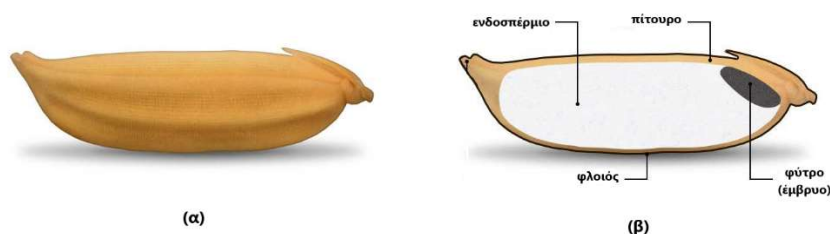
Τα **φύλλα** αναπτύσσονται εναλλάξ στον κορμό, με ένα φύλλο ανά κόμβο. Το τελευταίο φύλλο που περιβάλλει το άνθος ονομάζεται φύλλο άνθους ή φύλλο σημαίας. Τα φύλλα είναι η μηχανή ανάπτυξης του φυτού, καθώς συλλαμβάνουν την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν υδατάνθρακες. Το φυτό αναπνέει από τα φύλλα του. Η αρχιτεκτονική των φύλλων μπορεί να είναι όρθια, πλάγια ή φθίνουσα. Αυτό εξαρτάται από την ποικιλία και είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην ικανότητα δέσμευσης της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η **ταξιανθία** είναι το κορυφαίο μέρος του φυτού του ρυζιού, το οποίο βρίσκεται στον τελευταίο κόμβο. Αποτελείται από πρωτογενείς διακλαδώσεις (μικρά κλαδιά) που φέρουν τους μίσχους και αυτοί με τη σειρά τους φέρουν τα στάχια. Ο αριθμός των πρωτογενών και δευτερογενών διακλαδώσεων εξαρτάται από το είδος και την ποικιλία του ρυζιού. Μία μοναδική ταξιανθία μπορεί να φέρει από 50 έως 500 στάχια. Ωστόσο, στις περισσότερες καλλιεργούμενες ποικιλίες, ο αριθμός τους φθάνει τα 150 έως 350. Υπάρχουν ποικιλίες διαφορές ως προς το μήκος, το σχήμα και τη γωνία των ταξιανθών.

Το **άνθος** αποτελείται από ανδρικά αναπαραγωγικά όργανα, δηλαδή τους ανθήρες που περιέχουν γύρη και τα θηλυκά όργανα, δηλαδή την ωοθήκη. Το ρύζι είναι αυτογονιμοποιούμενο (αυτογαμικό) καθώς η γονιμοποίηση συμβαίνει από τη γύρη του ίδιου του άνθους. Αυτό διαφέρει από τα αλλογαμικά φυτά όπου η γονιμοποίηση γίνεται από τη γύρη ενός άλλου άνθους του ίδιου ή διαφορετικού φυτού, όπως συμβαίνει με τον αραβόσιτο (Wopereis et al., 2009).

### 1.1.2.2 ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΚΟΚΚΟΥ ΤΟΥ ΡΥΖΙΟΥ

Το μέγεθος του κόκκου του ρυζιού εξαρτάται από το μήκος του και διακρίνεται σε πολύ μακρύ όταν ξεπερνά τα 7,50 mm, μακρύ από 6,61 έως 7,50 mm, μεσαίο από 5,51 έως 6,60 mm και μικρό όταν είναι μικρότερο από 5,50 mm. Το σχήμα του κόκκου χαρακτηρίζεται με βάση την αναλογία του μήκους προς το πλάτος του κόκκου: λεπτό όταν η αναλογία είναι μικρότερη από 3,0, μεσαίο από 2,1 έως 3,0, κοντό από 1,1 έως 2,0, και στρογγυλό όταν η αναλογία είναι μικρότερη από 1,0.



Εικόνα 1.4 : Ο κόκκος του ρυζιού εξωτερικά (α) και εσωτερικά (β)

Ο κόκκος του ρυζιού (ακατέργαστο ρύζι ή "paddy") αποτελείται από ένα εξωτερικό προστατευτικό κάλυμμα, το φλοιό και ένα βρώσιμο κομμάτι, την καρύοψη ή «φρούτο». Η καρύοψη είναι ένα μονόσπορο και άκαμπτο (δεν ανοίγει όσο ωριμάζει) φρούτο, στο οποίο το περικάρπιο είναι συντηγμένο με το σπόρο και αποτελείται από το σπερμόδερμα ή τέστα, το νούκελλο, το ενδοσπέρμιο και το έμβρυο.

Ο φλοιός αποτελείται από δύο μέρη, το χιτώννα και τη λεπίδα (lemma και palea). Αυτά τα δύο κολλούν μεταξύ τους με μία δομή που μοιάζει με αγκίστρι. Το μέσο βάρος του φλοιού κυμαίνεται από 16 έως 28% του βάρους του ακατέργαστου ρυζιού. Ο φλοιός παρέχει προστασία στην καρύοψη του ρυζιού. Όσο πιο σφιχτός είναι ο φλοιός ή όσο καλύτερα κολλάνε μεταξύ τους ο χιτώννας και η λεπίδα, χωρίς να αφήνουν κενά, τόσο λιγότερες είναι οι πιθανότητες ο κόκκος του ρυζιού να προσβληθεί από έντομα κατά την αποθήκευση. Έχει, επίσης, την ιδιότητα να προστατεύει την καρύοψη από τους μύκητες, καθώς ο αποφλοιωμένος κόκκος μπορεί εύκολα να αποικηθεί από το μύκητα *Aspergillus spp.*

Στο εσωτερικό του φλοιού και γύρω από το ενδοσπέρμιο του κόκκου διακρίνονται τρεις στοιβάδες που συγκροτούν την καρύοψη, το περικάρπιο (10μm), την τέστα ή σπερμόδερμα (0,5μm) και το νούκελλο (2,5μm).

Το περικάρπιο είναι το ώριμο τοίχωμα των ωοθηκών, το οποίο υφίσταται εκτεταμένο εκφυλισμό κατά την ανάπτυξη της καρύωσης. Αποτελείται από πολλά στρώματα θρυμματισμένων κυττάρων που έχουν πάχος περίπου 10 μm και έχει μία μόνο αγγειακή δέσμη στην ραχιαία πλευρά. Η εξωτερική επιφάνεια του περικάρπιου έχει μία κυματοειδή εμφάνιση και μία λεπτή επιδερμίδα.

Δίπλα από το περικάρπιο υπάρχει ένα μόνο στρώμα θρυμματισμένων κυττάρων, το σπερμόδερμα ή τέστα. Η τέστα έχει μία παχιά επιδερμίδα (0,5 μm) η οποία βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά των θρυμματισμένων κυττάρων. Αντιστοιχεί στην εσωτερική στρώση του εσωτερικού περιβλήματος (Juliano & Tuahño, 2019). Στο περικάρπιο αλλά και στην τέστα περιέχονται οι διάφορες χρωστικές, όπως και το μεγαλύτερο ποσοστό των πρωτεϊνών, των λιπών, των βιταμινών και των μετάλλων.

Δίπλα από την τέστα είναι μία άλλη χοντρή επιδερμίδα (0,8 μm), αυτή των θρυμματισμένων κυττάρων του νούκελλου. Ο νούκελλος στο ώριμο ρύζι έχει πάχος περίπου 2,5 μm (συμπεριλαμβανομένης της επιδερμίδας). Ο δεσμός της τέστα και του νούκελλου είναι ασθενής, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα το διαχωρισμό τους κατά τη διάρκεια του χειρισμού και της παρασκευής ιστών (Juliano & Tuahño, 2019).

Μετά τις τρεις στοιβάδες εμφανίζεται το έμβρυο (ή φύτρο), το οποίο είναι πολύ μικρό και εντοπίζεται σε μία κοιλιακή περιοχή στη βάση του καρπού. Το έμβρυο είναι το πιο σημαντικό μέρος, διότι είναι απαραίτητο για την αναπαραγωγή. Αποτελείται από δύο μέρη, το κολεόπτιλο και τα εμβρυακά φύλλα. Εξωτερικά, περιορίζεται από μία απλή στοιβάδα της αλευρόνης από κύτταρα ενδοσπερμίου και από το προστατευτικό επίστρωμα της καρύωσης. Τα εμβρυακά φύλλα αποτελούνται από το περικότιλο, το μεσοκοτίλιο και το ριζίδιο (<http://www.fao.org>; Juliano, 2016; Ri et al., 2009).

Η στοιβάδα της αλευρόνης ποικίλει από ένα έως πέντε στρώματα κυττάρων. Είναι παχύτερη στη ραχιαία από ό,τι στην κοιλιακή πλευρά του κόκκου, καθώς επίσης και σε βραχείς κόκκους παρά σε μακρείς κόκκους. Τα κύτταρα της αλευρόνης και του εμβρύου είναι πλούσια σε πρωτεϊνικά σωματίδια, τα οποία περιέχουν σφαιροειδή ή φυτικά σωματίδια και σε λιπιδικά σώματα.

Η κατανομή του βάρους του καστανού ρυζιού είναι: το περικάρπιο 1 έως 2 %, η αλευρόνη, ο νούκελλος και το σπερμόδερμα 4 έως 6 %, το έμβρυο 1 %, ο σκούτελλος 2 % και το ενδοσπέρμιο 90 έως 91 % (<http://www.fao.org>).

### 1.1.3 ΤΥΠΟΙ ΡΥΖΙΟΥ

Η ταξινόμηση του ρυζιού μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, ανάλογα με τα χρησιμοποιούμενα κριτήρια, όπως βάσει των μορφολογικών χαρακτηριστικών (π.χ. μήκος προς πλάτος, ενδεικτικό της φύσης του ενδοσπερμίου και ιδιαίτερα του τύπου του περιεχομένου αμύλου), της αναλογίας αμυλόζης/αμυλοπηκτίνης, ή της επεξεργασίας. Έτσι, το ρύζι μπορεί να καταταχθεί ως εξής:

#### Με βάση το μέγεθος των κόκκων

- **Μακρύσπερμο**, με μακρείς και λεπτούς κόκκους, των οποίων το μήκος είναι 3 με 5 φορές μεγαλύτερο του πλάτους τους. Το τυπικό μήκος κυμαίνεται από 7 έως 9 mm. Μετά το μαγείρεμα, οι κόκκοι είναι φωτεινοί, αφράτοι και σπυρωτοί.
- **Μεσόσπερμο**, με κοντούς και πιο πλατείς κόκκους, των οποίων το μήκος (5-6 mm) είναι 2 με 3 φορές μεγαλύτερο του πλάτους τους. Η διάμετρός τους είναι περίπου 2 mm. Μετά το μαγείρεμα, οι κόκκοι είναι μαλακοί και έχουν τάση να κολλούν μεταξύ τους.
- **Κοντόσπερμο ή στρογγυλόσπερμο**, με κοντούς, παχείς και μερικές φορές σχεδόν στρογγυλούς κόκκους. Το μήκος τους (4-5 mm) είναι συνήθως λιγότερο από δύο φορές όσο είναι το πλάτος τους (2,5 mm). Μετά το μαγείρεμα, οι κόκκοι είναι μαλακοί και κολλούν αρκετά μεταξύ τους, ενώ είναι πλούσιοι σε άμυλο.
- «**Γλυκό**» **ρύζι** με κοντούς, παχείς και αδιαφανείς κόκκους. Μετά το μαγείρεμα, οι κόκκοι χάνουν το σχήμα τους και γίνονται κολλώδεις.

(Κυρίτση, 2009)

#### Με βάση την επεξεργασία των κόκκων

- **Έμφλοιο ή αναποφλοιώτο ρύζι**, δηλαδή το ρύζι μαζί με το φλοιό του, μετά τη συγκομιδή και την απομάκρυνση των χόρτων.
- **Καστανό ρύζι** (ή κάργκο ή καφέ ή ημιακατέργαστο), το οποίο προκύπτει με την απομάκρυνση του φλοιού, διατηρώντας, όμως, τη στοιβάδα του περικάρπιου που του προσδίνει το χαρακτηριστικό καφέ χρώμα, το άρωμα ξηρών καρπών και την τραχεία υφή. Το στρώμα πίτουρου παραμένει, διατηρώντας όλα τα θρεπτικά συστατικά, (θειαμίνη, ριβοφλαβίνη, νιασίνη, βιταμίνη E, ασβέστιο, φωσφόρο, κάλιο, πρωτεΐνες, ίνες και λίπη που προσφάτως έχει αποδειχθεί ότι μειώνει τη χοληστερόλη). Ο κόκκος έχει βάρος περίπου 25 mg. Διατηρείται καλύτερα και

περισσότερο όταν καταψύχεται, αφού έτσι αποφεύγεται η οξείδωση των λιπαρών του και απαιτεί αρκετά μεγαλύτερο χρόνο μαγειρέματος σε σχέση με το μυλευμένο ρύζι, περίπου 40 min.

- **Λευκό ρύζι ή μυλευμένο ή επεξεργασμένο**, το οποίο προκύπτει μετά τη διαδικασία της μύλευσης και την απομάκρυνση των εξωτερικών στοιβάδων του περικάρπιου, της τέστα και του νούκελλου. Η διαδικασία απομακρύνει πολλά από τα θρεπτικά συστατικά και το προκύπτον ρύζι αποκτά λευκό χρώμα. Ανάλογα με την επεξεργασία, μπορεί να επικαλυφθεί με πυριτικό μαγνήσιο ή οξείδιο του τιτανίου ή μίγμα γλυκόζης και πυριτικού μαγνησίου, με σκοπό τη βελτίωση της υφής και του χρώματός του. Το λευκό ρύζι χρειάζεται 15 min μαγείρεμα.
- **Parboiled ή κίτρινο ρύζι**, το οποίο προκύπτει από τη μύλευση έμφλοιου ρυζιού που έχει προηγουμένως εμβαπτιστεί σε ατμό ή θερμό νερό, υπό πίεση. Η υγροθερμική αυτή επεξεργασία του ρυζιού προκαλεί διάχυση των θρεπτικών συστατικών προς το ενδοσπέρμιο, και έτσι το κίτρινο ρύζι είναι πιο θρεπτικό από το λευκό. Οι κόκκοι του είναι πιο σφιχτοί και σπυρωτοί από κάθε άλλο είδος ρυζιού, λόγω ζελατινοποίησης του περιεχόμενου αμύλου. Έχει χρόνο μαγειρέματος λίγο μεγαλύτερο από ότι έχει το λευκό ρύζι, δηλαδή 16-25 min.
- **Κόκκινο ρύζι**, το οποίο έχει κόκκινο περικάρπιο λόγω ποικιλίας ή εσοδείας. Είναι πέντε φορές πιο πλούσιο σε αντιοξειδωτικά (τοκόλες, ορυζανόλη, φαινολικό οξύ με προανθοκυανιδίνες και πολυμερικές πολυφαινόλες) από ότι το λευκό μυλευμένο ρύζι.
- **Μαύρο**, το οποίο περικλείεται με μία λεπτή στοιβάδα μαύρου πίτουρου.
- **Αρωματικό ρύζι**, το οποίο είναι φυσικά αρωματισμένο από τα συστατικά του εδάφους στο οποίο καλλιεργείται.
- **Προμαγειρεμένο** είναι το μυλευμένο, μαγειρεμένο και ξηραμένο ρύζι. Το προμαγειρεμένο είναι περισσότερο πορώδες και βράζει σε λιγότερο χρόνο από το λευκό, λόγω της μεγαλύτερης ικανότητας απορρόφησης του νερού.

#### Με βάση την αναλογία αμυλόζης και αμυλοπηκτίνης

Η αναλογία αυτή επηρεάζει τις οργανοληπτικές ιδιότητες του ρυζιού μετά το βρασμό. Η αμυλόζη είναι η πιο σημαντική παράμετρος, η οποία προσδιορίζει το μαγείρεμα του ρυζιού και τη συμπεριφορά του κατά την επεξεργασία. Η περιεκτικότητα της αμυλόζης στο άμυλο του ρυζιού είναι ο σημαντικότερος παράγοντας ποιότητας. Συνδέεται άμεσα με την απορρόφηση νερού, τη διόγκωση, την αφρατότητα, και το διαχωρισμό των βρασμένων

κόκκων. Σχετίζεται αντιστρόφως με τη συνεκτικότητα, τη μαλακότητα (tenderness) και τη λαμπρότητα (glossiness) (Juliano, 1993).

- **Μη κολλώδες ρύζι:** Το άμυλό του αποτελείται από 15-35% αμυλόζη και 65-85% αμυλοπηκτίνη.
- **Κολλώδες ρύζι:** Το άμυλό του αποτελείται από 100% αμυλοπηκτίνη.

Σε σχέση με την περιεχόμενη αμυλόζη γίνεται η εξής ταξινόμηση:

- **Κηρώδες ρύζι** με 1-2% αμυλόζη.
- **Ρύζι πολύ χαμηλής αμυλόζης** με 2-9% αμυλόζη.
- **Ρύζι χαμηλής αμυλόζης** με 10-20% αμυλόζη. Οι κόκκοι του κολλούν μεταξύ τους μετά το μαγείρεμα.
- **Ρύζι μεσαίας αμυλόζης** με 20-25% αμυλόζη, το οποίο προτιμάται στις περισσότερες περιοχές καλλιέργειας ρυζιού.
- **Ρύζι υψηλής αμυλόζης** με 25-33% αμυλόζη. Οι κόκκοι του είναι λιγότερο μαλακοί και σκληραίνουν κατά την ψύξη μετά το μαγείρεμα.

Τα μακρύσπερμα ρύζια είναι αυτά συνήθως με την υψηλή αμυλόζη, τα μεσόσπερμα με τη μεσαία, κ.ο.κ. Τη μεγαλύτερη σκληρότητα έχουν τα μακρύσπερμα ρύζια, ακολουθούν τα μεσόσπερμα και κατόπιν τα κοντόσπερμα. Τη μεγαλύτερη λασπότητα παρουσιάζουν τα μεσόσπερμα ρύζια, τα κοντόσπερμα και κατόπιν τα μακρύσπερμα (Κυρίτση, 2009).

#### 1.1.4 ΠΡΟΙΟΝΤΑ ΡΥΖΙΟΥ

Τα κύρια υποπροϊόντα που λαμβάνονται από την καλλιέργεια ρυζιού και την εμπορική του επεξεργασία είναι το άχυρο, ο φλοιός και το πίτουρο (σε συνδυασμό με τη φύτρα). Τα υποπροϊόντα αυτά αποτελούνται από βιοδραστικές ενώσεις όπως αμινοξέα, φαινολικά οξέα, φλαβονοειδή, βιταμίνη Ε, γ-ορυζανόλη και χρωστικές ουσίες, συστατικά που λειτουργούν ευεργετικά για την ανθρώπινη υγεία. Παρόλα αυτά, η εμπορική επεξεργασία του ρυζιού παράγει προϊόντα χαμηλής αξίας, καθώς ο φλοιός αποτελεί το 20% του συνολικού βάρους ολόκληρου του ρυζιού και τα πίτουρα το 10% του συνολικού βάρους του ρυζιού.

Τα άχυρα, οι φλοιοί και τα πίτουρα ρυζιού περιέχουν κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη με μερικές ποσότητες πρωτεϊνών, αμύλου, εκχυλίσμων και ανόργανων στοιχείων. Η πιο συχνή χρήση του άχυρου και του φλοιού ρυζιού είναι ως πρόσθετο λιπάσματος και στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας ρυζιού για την παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας



μέσω ατμολεβήτων. Συνολικά, αυτά τα προϊόντα δεν είναι θρεπτικά και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας σε ζωοτροφές. Η αύξηση της αγροτικής βιομάζας που παράγεται παγκοσμίως και η αύξηση της ζήτησης ενέργειας και καυσίμων ενθαρρύνει την ανάπτυξη ερευνών για τη χρήση της λιγνοκυτταρικής βιομάζας ως βιώσιμης πηγής βιολογικών προϊόντων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Abaide, Tres, Zobot, & Mazutti, 2019; Ryan, 2011).

Το **άχυρο** ρυζιού είναι ένα από τα πιο άφθονα και λιγότερο πολύτιμα λιγνοκυτταρινικά υλικά από την καλλιέργεια ρυζιού, φτάνοντας περίπου τα 283 εκατομμύρια τόνους ετησίως σε όλο τον κόσμο. Παρά την αφθονία του, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως είναι η χαμηλή θρεπτική αξία και η υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά συστατικά, η οποία περιορίζει τη χρήση του. Χρησιμοποιείται συνήθως ως ζωοτροφή, οικιακό καύσιμο και καυστήρας καυσαερίων. Κάθε κιλό κόκκων ρυζιού συνοδεύεται από την παραγωγή 1-1,5 κιλών άχυρου και ένα μεγάλο μέρος αυτού απορρίπτεται κάθε χρόνο ως απόβλητο. Μία συνηθισμένη πρακτική για τη απόρριψη του άχυρου είναι η καύση του στην ύπαιθρο, με στόχο την ανανέωση του εδάφους και τον έλεγχο των ζιζανίων, έτσι ώστε να προετοιμαστεί το έδαφος για την επόμενη καλλιέργεια. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή συμβάλλει στην εκπομπή αρωματικών υδρογονανθράκων και διοξινών επιβλαβών για το περιβάλλον και για την ανθρώπινη υγεία (Abaide et al., 2019; Peanparkdee & Iwamoto, 2019).

Το άχυρο του ρυζιού έχει χαμηλότερη τιμή θέρμανσης (15,2 MJ/kg) σε σύγκριση με τον ξυλάνθρακα (23,1 MJ/kg). Επιπλέον, το άχυρο ρυζιού παρουσιάζει προβλήματα όταν υποβάλλεται σε ανάκτηση καύσης, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε αλκαλικά μέταλλα (Fe: 269 μg/g, Al: 99 μg/g) και μέταλλα αλκαλικών γαιών. Οι ουσίες αυτές προκαλούν προβλήματα στη λειτουργία του λέβητα, όπως η διαμόρφωση των κοιτασμάτων, η διόγκωση και η διάβρωση, οι οποίες περιορίζουν τη χρήση του φρέσκου άχυρου ως άμεσης πηγής ενέργειας (Abaide et al., 2019).

Ο **φλοιός** ρυζιού είναι ένα σημαντικό απόβλητο που παράγεται κατά τη διαδικασία μύλευσης του ρυζιού. Αποτελεί περίπου το 23% του συνολικού βάρους ολόκληρου του ρυζιού, δηλαδή παράγονται περίπου 149 εκατομμύρια τόνοι σε όλο τον κόσμο ετησίως. Ωστόσο, η εκμετάλλευση του φλοιού ρυζιού και το εμπορικό του ενδιαφέρον είναι εξαιρετικά χαμηλές λόγω των ανεπιθύμητων ιδιοτήτων του, όπως η αντοχή στην υποβάθμιση, η υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα και λιγνίνη και το γεγονός ότι δεν είναι βρώσιμο. Για τους λόγους αυτούς, συχνά απορρίπτεται με τη χρήση μεθόδων ανοικτής καύσης, η οποία προκαλεί ρύπανση του περιβάλλοντος. Ωστόσο, ο φλοιός ρυζιού έχει ένα πολύτιμο διατροφικό

πλεονέκτημα. Παρέχει αντιοξειδωτικές επιδράσεις που προστατεύουν τους σπόρους του ρυζιού από το οξειδωτικό στρες (Peaparkdee & Iwamoto, 2019).

Η τιμή της θέρμανσης (16 MJ/kg) είναι παρόμοια με αυτήν του άχυρου. Οι εκπομπές των εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος SO<sub>2</sub> και NO<sub>xin</sub> είναι χαμηλότερες από τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα και πετρελαίου, αλλά υψηλότερες από τις μονάδες φυσικού αερίου. Επιπλέον, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> από την καύση του είναι χαμηλές, καθώς οι φλοιοί του ρυζιού δεν συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη, ενώ το CO<sub>2</sub> που παράγεται κατά την καύση καταναλώνεται από την καλλιέργεια ρυζιού. Οι φλοιοί ρυζιού χρησιμοποιούνται επίσης για την παραγωγή χαλαζία (Abaide et al., 2019).

Το **πίτουρο** ρυζιού, ένα υποπροϊόν που προέρχεται από την επεξεργασία του ρυζιού, λαμβάνεται από την εξωτερική στρώση του καστανού ρυζιού (αποφλοιωμένο), και αποτελεί περίπου το 10% του συνολικού βάρους του ρυζιού, δηλαδή παράγονται περίπου 60 εκατομμύρια τόνοι. Γενικά, το εμπορικό πίτουρο ρυζιού είναι ένα μίγμα στρώματος πίτουρου ρυζιού και φύτρου ρυζιού. Το πίτουρο ρυζιού είναι μία πλούσια πηγή βιοδραστικών ενώσεων, συμπεριλαμβανομένων των φαινολικών οξέων, των φλαβονοειδών, της βιταμίνης E και της ουρσαζανόλης, στοιχεία που έχουν αντιοξειδωτικές ιδιότητες και είναι ευεργετικά για την υγεία. Ωστόσο, δεν χρησιμοποιείται επαρκώς ως ανθρώπινη τροφή.

Η τιμή θέρμανσης (20 MJ/kg) είναι μεγαλύτερη από αυτήν του άχυρου και των φλοιών του ρυζιού. Αντίθετα από το άχυρο και το φλοιό του ρυζιού, το πίτουρο ρυζιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ζωοτροφές. Επιπλέον, το πίτουρο ρυζιού έχει χρησιμοποιηθεί και στη βιομηχανία τροφίμων για την εξαγωγή λαδιού (Abaide et al., 2019; Peaparkdee & Iwamoto, 2019).

Άλλα υποπροϊόντα του ρυζιού είναι τα ακόλουθα:

**Θραυσμένο ρύζι:** Τα κομμάτια των κόκκων ρυζιού το οποία είναι μικρότερα από  $\frac{3}{4}$  ενός πλήρους κόκκου, χρησιμοποιούνται για την παρασκευή διαφόρων προϊόντων, όπως το ρυζάλευρο, αλλά και ως τροφή για κατοικίδια ζώα.

**Ρυζάλευρο:** Παράγεται είτε από άσπρο είτε από καστανό ρύζι. Είναι ελεύθερο γλουτένης, πράγμα που το καθιστά μη αλλεργικό. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή ζυμαρικών από ρύζι, πατατάκια, δημητριακά και σνακ.

**Ρυζέλαιο:** Εκχυλίζεται από το εξωτερικό στρώμα του πυρήνα του καστανού ρυζιού. Είναι ένα υψηλής ποιότητας, γευστικά απαλό μαγειρικό έλαιο. Μελέτες έχουν δείξει ότι είναι αποτελεσματικό στη μείωση των επιπέδων χοληστερόλης στο αίμα.

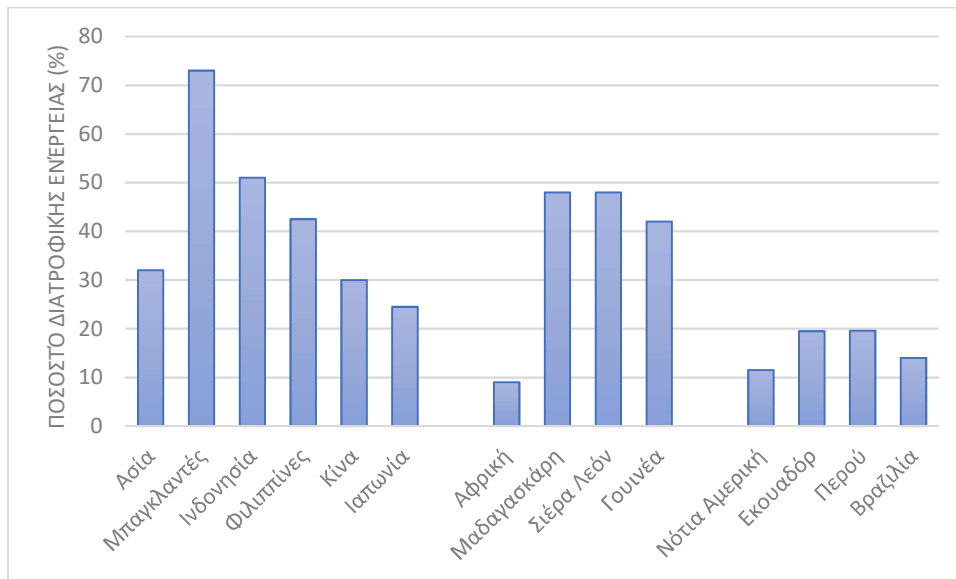
**Άμυλο ρυζιού:** Παράγεται από το ενδοσπέρμιο των κόκκων ρυζιού, που αποτελεί το 90-93% του ξηρού βάρους του μυλευμένου ρυζιού. Χρησιμοποιείται ως πηκτική ουσία για την παρασκευή σαλτσών και επιδόρπιων, αλλά και για την παραγωγή σιροπιού από ρύζι. Το σιρόπι αυτό, παράγεται μέσω της διαδικασίας της υδρόλυσης και είναι ένα φυσικό γλυκαντικό, λιγότερο έντονο από τα παραδοσιακά σιρόπια ζάχαρης και από το μέλι.

**Τέφρα από το φλοιό:** Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθαρισμό των αποχρωματισμένων δοντιών και μπορεί να μετατραπεί σε προϊόν κυτταρίνης, παραδείγματος χάριν τεχνητό μετάξι και καύσιμο ρυζιού.

**Αλκοολούχα ποτά:** Τα αλκοολούχα ποτά που παρασκευάζονται από ρύζι βρίσκονται σε όλες τις περιοχές του κόσμου όπου υπάρχει παραγωγή ρυζιού. Το πιο κοινό είναι η μπύρα ρυζιού η οποία παράγεται με βρασμό του αποφλοιωμένου ρυζιού, εμβολιάζοντας το μίγμα με λίγο "κέικ" ζύμης, και αφήνοντας σε ηρεμία το μίγμα για μικρό χρονικό διάστημα, ώστε να πραγματοποιηθεί η ζύμωση (Global Rice Science Partnership, 2013, p. 14).

### 1.1.5 ΣΥΣΤΑΣΗ

Το ρύζι αποτελεί τη βασική τροφή για 17 χώρες στην Ασία και τον Ειρηνικό, εννέα χώρες της Βόρειας και Νότιας Αμερικής και οκτώ χώρες της Αφρικής. Παρέχει το 20% της παγκόσμιας διατροφικής ενέργειας, ενώ το σιτάρι αποτελεί το 19% και ο αραβόσιτος (καλαμπόκι) το 5%. Το σχήμα απεικονίζει τη συμβολή του ρυζιού στη διατροφή σε διάφορες περιοχές του κόσμου.



Διάγραμμα 1.1: Ποσοστό διατροφικής ενέργειας που προέρχεται από το ρύζι σε περιοχές του κόσμου

Σε μία μέση διατροφή, το 30% των θερμίδων προέρχεται από το ρύζι και αυτό μπορεί να αυξηθεί σε περισσότερο από 70% σε ορισμένες χώρες χαμηλού εισοδήματος, γεγονός που καθιστά το ρύζι ένα πολύ καλό μέσο για τη μεταφορά μικροθρεπτικών συστατικών σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό ανθρώπων.

Εκτός από την πλούσια πηγή της διατροφικής ενέργειας, το ρύζι αποτελεί καλή πηγή θειαμίνης, ριβοφλαβίνης και νιασίνης. Το ρύζι είναι μία πλούσια πηγή μακροθρεπτικών και μικροθρεπτικών συστατικών στην ακατέργαστη μορφή του. Κατά την άλεση του ρυζιού, το λίπος καθώς και τα πλούσια σε μικροθρεπτικά στρώματα πίτουρου απομακρύνονται και έτσι παράγεται το άσπρο ρύζι πλούσιο σε άμυλο, αφαιρώντας το 75-90% των βιταμινών της ομάδας Β, θειαμίνη, νιασίνη και βιταμίνη Β6,1 και της βιταμίνης Ε.

Το μη επεξεργασμένο ρύζι περιέχει σημαντικό ποσό διαιτητικών ινών. Το προφίλ αμινοξέων του ρυζιού δείχνει ότι είναι υψηλό σε γλουταμινικό και ασπαραγινικό οξύ, ενώ η λυσίνη είναι το περιοριστικό αμινοξύ. Μόνο του το ρύζι δεν μπορεί να προμηθεύσει όλα τα απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την επαρκή διατροφή (<http://www.fao.org>; WHO, 2018).

Μεταξύ των κλασμάτων που προέρχονται από την άλεση του ρυζιού, το πίτουρο έχει την υψηλότερη περιεκτικότητα σε ενέργεια και σε πρωτεΐνες, ενώ ο φλοιός έχει τη χαμηλότερη περιεκτικότητα. Μόνο το καστανό κλάσμα του ρυζιού είναι βρώσιμο. Η διαδικασία της λείανσης ή της τριβής για την απομάκρυνση του περικάρπιου, της τέστα, της στρώσης της αλευρόνης και του εμβρύου ώστε να αποδοθεί το αλεσμένο ρύζι, έχει ως αποτέλεσμα την απώλεια λίπους, πρωτεΐνης, ακατέργαστης και ουδέτερης απορρυπαντικής ίνας, τέφρας,

θειαμίνης, ριβοφλαβίνης, νιασίνης και α-τοκοφερόλης (Βιταμίνη Ε). Οι διαθέσιμοι υδατάνθρακες, κυρίως το άμυλο, είναι υψηλότεροι στο λευκασμένο ρύζι σε σχέση με το καστανό ρύζι. Οι φυτικές ίνες είναι υψηλότερες στο στρώμα πίτουρου (και στο φλοιό) και χαμηλότερες στο λευκασμένο ρύζι. Η πυκνότητα και η ολική πυκνότητα είναι χαμηλότερες στο φλοιό, λιγότερο χαμηλές στο πίτουρο και υψηλότερες στο λευκασμένο ρύζι λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε λίπος (Juliano, 1993).

Το πίτουρο ρυζιού διακρίνεται από τους άλλους κόκκους σιτηρών όσον αφορά την περιεκτικότητά του σε τοκοτριενόλες-τοκοφερόλες, γ-ορυζανόλη, και β-σιτοστερόλη. Αυτό είναι σημαντικό καθώς έρχονται στο φως όλο και περισσότερα στοιχεία που δείχνουν ότι αυτά τα συστατικά μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της συγκέντρωσης της συνολικής χοληστερόλης του πλάσματος, των τριγλυκεριδίων και των λιποπρωτεϊνών χαμηλής πυκνότητας καθώς και στην αύξηση της συγκέντρωσης των λιποπρωτεϊνών υψηλής πυκνότητας (Ryan, 2011).

Παρόλα αυτά, το λευκό ρύζι με μακρούς κόκκους θεωρείται μία σχετικά καλή πηγή ενέργειας, καθώς σε αντίθεση με τον αραβόσιτο, το σιτάρι και τις πατάτες, περιέχει υδατάνθρακες, ασβέστιο, σίδηρο, παντοθενικό οξύ, φολλικό οξύ και βιταμίνη Ε. Τα κόκκινα ρύζια είναι γνωστό ότι είναι πλούσια σε σίδηρο και ψευδάργυρο, ενώ τα μαύρα και τα μοβ ρύζια είναι ιδιαίτερα υψηλά σε πρωτεΐνες, λίπη και ακατέργαστες ίνες. Το κόκκινο, το μαύρο και το μοβ ρύζι παίρνουν το χρώμα τους από τις χρωστικές ανθοκυανίνης, οι οποίες είναι γνωστό ότι έχουν αντιοξειδωτικές ιδιότητες, καθώς και άλλα οφέλη για την υγεία.

Τα μέταλλα (τέφρα) συγκεντρώνονται επίσης στις εξωτερικές στρώσεις του καστανού ρυζιού ή στο κλάσμα του πίτουρου. Ένα σημαντικό ποσοστό (90%) του φωσφόρου στο πίτουρο είναι φωσφόρος φυτίνης. Το κάλιο και το μαγνήσιο είναι τα κύρια άλατα της φυτίνης. Η κατανομή τέφρας στο καστανό ρύζι είναι 51% στο πίτουρο, 10% στο στέλεχος, 10% στα κλάσματα της στίλβωσης και 28% στο κλάσμα του λευκασμένου ρυζιού. Ο σίδηρος, ο φωσφόρος και το κάλιο ακολουθούν μία παρόμοια κατανομή. Ωστόσο, μερικά μέταλλα εμφανίζουν μία σχετικά πιο ομοιόμορφη κατανομή στους κόκκους. Έτσι, το λευκασμένο ρύζι διατηρεί το 63% του νατρίου, το 74% του ασβεστίου και το 83% της περιεκτικότητας αζώτου κατά Kjeldahl του καστανού ρυζιού (Juliano, 1993).

Μεταξύ των βασικών προϊόντων, το ρύζι έχει τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε διαιτητικές ίνες, πράγμα που εξηγεί και την υψηλή αφομοιωσιμότητα της ενέργειας, αλλά και τη μεγαλύτερη αφομοίωση των πρωτεϊνών. Το ρύζι με υγρασία 12% περιέχει περίπου 80% άμυλο και 7% πρωτεΐνη. Το άμυλο εμφανίζεται στο ενδοσπέρμιο ως μικρά πολύπλευρα

κοκκία, ενώ η πρωτεΐνη υπάρχει ως σωματίδια που βρίσκονται μεταξύ των κόκκων αμύλου (IRRI).

Η περιεκτικότητα σε θερμίδες ενός φλιτζανιού μαγειρεμένου ρυζιού κυμαίνεται από 241,8 kcal για μεσαίο ή βραχύ λευκό ρύζι έως 218,4 kcal για καστανό ρύζι μεσαίου κόκκου, 216,5 kcal για μακρόκοκκο καστανό ρύζι, 205,4 kcal για κανονικό μακρύ λευκό ρύζι και τέλος σε 165,6 kcal για το «άγριο ρύζι».

Ο παρακάτω πίνακας περιέχει λεπτομερείς πληροφορίες για όλα τα θρεπτικά συστατικά που περιέχονται σε 100 g διάφορων ειδών ρυζιού.

**Πίνακας 1.4 : Σύσταση διάφορων τύπων μαγειρεμένου ρυζιού (στα 100g) (Schenker, 2012a)**

	Μακρόσπερμο λευκό ρύζι	Καστανό ρύζι	Λευκό ρύζι basmati	Ρύζι basmati ολικής άλεσης	Βραχύσπερμο κολλώδες ρύζι
<b>Ενέργεια (kj)</b>	577	590	502	611	272
<b>Ενέργεια (kcal)</b>	138	141	120	146	65
<b>Πρωτεΐνη (g)</b>	2,6	2,6	3,4	4,3	1,7
<b>Λιπαρά (g)</b>	1,3	1,1	1,2	1,8	0,3
<b>Υδατάνθρακες (g)</b>	30,9	32,1	29,8	29,1	14,7
<b>Φυτικές ίνες (g)</b>	0,1	0,8	0,6	1,0	-
<b>Άμυλο (g)</b>	30,9	31,6	29,2	27,4	-
<b>Ασβέστιο (mg)</b>	18	4	10,4	18,7	3
<b>Κάλιο (mg)</b>	54	99	80	80	55
<b>Φωσφόρος (mg)</b>	54	120	106,2	186,1	26
<b>Νάτριο (mg)</b>	1	1	1	1	1
<b>Σίδηρος (mg)</b>	0,2	0,5	1,1	1,3	0,2
<b>Ψευδάργυρος (mg)</b>	0,7	0,7	0,7	1,5	0,4
<b>Ιώδιο (μg)</b>	5	-	-	-	-
<b>Σελήνιο (μg)</b>	5	4	5	5	-
<b>Χαλκός (mg)</b>	0,13	0,33	0,14	0,17	0,05
<b>Μαγγάνιο (mg)</b>	0,2	0,9	0,6	0,9	0,22
<b>Μαγνήσιο (mg)</b>	11	43	12,3	58,9	3
<b>Θειαμίνη (mg)</b>	0,01	0,14	0,06	0,14	0,02
<b>Νιασίνη (mg)</b>	1,5	1,9	6	3,2	0,7
<b>Βιταμίνη Β6 (mg)</b>	0,07	-	0,04	0,12	-
<b>Φολικό οξύ (μg)</b>	7	10	3	5	-
<b>Βιταμίνη Ε (mg)</b>	-	0,3	0,02	0,04	-

Αναλυτικότερα, το ρύζι αποτελείται από:

#### **Υδατάνθρακες:**

Το ρύζι αποτελείται κυρίως από υδατάνθρακες. Οι υδατάνθρακες του ρυζιού έχουν κυρίως τη μορφή αμύλου, αντιπροσωπεύοντας μέχρι και το 90% του συνολικού ξηρού βάρους και το 87% της συνολικής περιεκτικότητας σε θερμίδες. Το άμυλο είναι η πιο κοινή μορφή υδατανθράκων σε τρόφιμα, αποτελούμενη από μεγάλες αλυσίδες γλυκόζης γνωστές ως αμυλόζη και αμυλοπηκτίνη. Η αμυλόζη και η αμυλοπηκτίνη έχουν διαφορετικές ιδιότητες που μπορούν να συμβάλουν τόσο στην υφή όσο και στην αφομοίωση του ρυζιού. Το ρύζι που έχει υψηλή περιεκτικότητα σε αμυλόζη, όπως το ρύζι basmati, δεν κολλάει μετά το μαγείρεμα. Η αμυλόζη επιβραδύνει επίσης την πέψη του αμύλου και συσχετίζεται συχνά με το λεγόμενο ανθεκτικό άμυλο, έναν τύπο υγιεινών ινών. Από την άλλη πλευρά, το ρύζι που έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε αμυλόζη και υψηλή σε αμυλοπηκτίνη είναι κολλώδες μετά το μαγείρεμα (γλουτινώδες ρύζι). Είναι ιδανικό για ριζότο και προτιμάται ιδιαίτερα στο ασιατικό μαγείρεμα, καθώς είναι εύκολο να φαγωθεί με ξυλάκια. Ένα από τα μειονεκτήματα των υδατανθράκων στα κολλώδη ρύζια, είναι η υψηλή ικανότητα πέψης. Για μία τροφή με υψηλή περιεκτικότητα σε υδατάνθρακες, η καλή πεπτικότητα δεν είναι πάντα ευνοϊκή επειδή μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στο σάκχαρο του αίματος, ειδικά όσον αφορά τους διαβητικούς (Schenker, 2012b; Thorne, Thompson, & Jenkins, 1983; Zhu, Liu, Wilson, Gu, & Shi, 2011).

#### **Πρωτεΐνες:**

Οι πρωτεΐνες είναι το δεύτερο σε ποσότητα συστατικό του ρυζιού. Αποτελούνται κυρίως από γλουτελίνες, οι οποίες υπάρχουν σε ολόκληρο τον κόκκο καθώς επίσης στο αποφλοιωμένο ρύζι και στα κλάσματα της στίλβωσης. Η συγκέντρωσή τους στον κόκκο μετά τη συγκομιδή εξαρτάται περισσότερο από το γονότυπο του ρυζιού και λιγότερο από το περιβάλλον και τον τρόπο καλλιέργειας. Επίσης, η λίπανση, η οποία αυξάνει το ποσοστό των πρωτεϊνών, η περίοδος ανάπτυξης, η τοποθεσία της καλλιέργειας, η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία μειώνει το ποσοστό των πρωτεϊνών και η θερμοκρασία κατά την περίοδο της ανάπτυξης παίζουν μεγάλο ρόλο στη συγκέντρωση των πρωτεϊνών. Οι πρωτεΐνες μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με την ποικιλία, ακόμη και αν καλλιεργούνται στο ίδιο μέρος. Οι πρωτεΐνες του ρυζιού, αν και σε μικρή περιεκτικότητα, θεωρούνται οι καλύτερες ποιοτικά από τις αντίστοιχες των υπολοίπων δημητριακών. Περιέχουν το πιο σημαντικό αμινοξύ, τη λυσίνη, σε ποσοστό περίπου 4%, υψηλή περιεκτικότητα σε προλαμίνη, τουλάχιστον 80% γλουτελίνη, που έχει την πλησιέστερη σύνθεση αμινοξέων με την αντίστοιχη του μυλευμένου ρυζιού και έχουν υψηλή χρησιμοποιήσιμη πρωτεΐνη (υψηλή βιολογική αξία).

Η χρησιμοποιήσιμη πρωτεΐνη του ρυζιού, είναι συγκρίσιμη με εκείνη του σίτου, είναι καλύτερη από του άσπρου καλαμποκιού και του σόργου. Οι πρωτεΐνες στο ρύζι είναι καλά ισορροπημένες, επειδή και τα οκτώ απαραίτητα αμινοξέα υπάρχουν σε κατάλληλες αναλογίες. Το ενεργειακό περιεχόμενο του ρυζιού είναι 4.04 cal/g. Οι αναλογίες των πρωτεϊνών στο καστανό και λευκό ρύζι διαφέρουν σημαντικά: αλβουμίνη: γλοβουλίνη: προλαμίνη είναι 6:10:3 στο καστανό ρύζι και 5:9:3 στο λευκό, αντίστοιχα. Οι περιεχόμενες πρωτεΐνες σχετίζονται αντιστρόφως με την κολλητικότητα των κόκκων (Prakash, 2016; Κυρίτση, 2009).

### **Λιπαρά:**

Το ρύζι έχει πολύ μικρή περιεκτικότητα σε λιπαρά (0,9 και 0,2 g λιπαρών σε μισό φλιτζάνι μαγειρεμένο καστανό ρύζι και μισό φλυτζάνι μαγειρεμένο λευκό ρύζι αντίστοιχα), τα οποία βρίσκονται κυρίως στο κλάσμα του πίτουρου (20 % σε ξηρή βάση). Συγκεκριμένα, βρίσκονται με τη μορφή λιπιδικών σωμάτων ή σφαιροειδών στο στρώμα της αλευρόνης και στο πίτουρο. Εν τούτοις, περίπου το 1,5 έως 1,7 % υπάρχει στο αλεσμένο ρύζι, κυρίως ως μη αμυλούχα λιπαρά τα οποία εκχυλίζονται με αιθέρα, χλωροφόρμιο-μεθανόλη και κορεσμένη με κρύο νερό βουτανόλη. Τα πρωτεϊνικά σώματα, ιδιαίτερα ο πυρήνας, είναι πλούσια σε λιπίδια. Τα κύρια λιπαρά οξέα αυτών των λιπιδίων είναι τα λινελαϊκό, ελαϊκό και παλμιτικό οξύ. Τα απαραίτητα λιπαρά οξέα στο έλαιο ρυζιού είναι περίπου 29 έως 42 % λινελαϊκό οξύ και 0,8 έως 1,0 % λινολενικό οξύ. Η περιεκτικότητα των βασικών λιπαρών οξέων μπορεί να αυξηθεί με τη θερμοκρασία κατά την ανάπτυξη των σιτηρών, αλλά σε βάρος της μείωσης της συνολικής περιεκτικότητας σε έλαιο. Το ρύζι είναι ένα υγιεινό τρόφιμο επειδή δεν περιέχει χοληστερόλη, αλλά περιέχει λινελαϊκό οξύ, το οποίο αντιπροσωπεύει το 30% των ολικών λιπαρών του ρυζιού τα οποία δεν μπορούν να μετατραπούν από υδατάνθρακες, πρωτεΐνες ή άλλα λίπη (<http://www.fao.org>; <https://www.encyclopedia.com>, 2019).

### **Ίνες:**

Το καστανό ρύζι έχει σχετικά καλή περιεκτικότητα σε ίνες (1,8%), ενώ το άσπρο ρύζι έχει πολύ χαμηλή περιεκτικότητα (0,3%). Ένα φλιτζάνι βρασμένο καστανό ρύζι (195 g) περιέχει περίπου 3,5 g ινών. Οι ίνες συγκεντρώνονται στα πίτουρα, τα οποία έχουν αφαιρεθεί από το λευκό ρύζι. Το πίτουρο αποτελείται κυρίως από αδιάλυτες ίνες, όπως η κυτταρίνη και η ημικυτταρίνη, και ουσιαστικά δεν περιέχει καθόλου διαλυτές ίνες. Ποικίλες ποσότητες ανθεκτικού αμύλου βρίσκονται επίσης τόσο στο λευκό όσο και στο καστανό ρύζι. Το



ανθεκτικό άμυλο βοηθά στην τροφοδοσία των ευεργετικών βακτηρίων στο έντερο, διεγείροντας την ανάπτυξή τους. Στο παχύ έντερο, το ανθεκτικό άμυλο οδηγεί στο σχηματισμό λιπαρών οξέων βραχείας αλυσίδας, όπως το βουτυρικό, το οποίο μπορεί να βελτιώσει την υγεία του παχέος εντέρου και να μειώσει τον κίνδυνο καρκίνου (Fung, Cosgrove, Lockett, Head, & Topping, 2012; Topping & Clifton, 2017).

### **Βιταμίνες και μεταλλικά στοιχεία:**

Η θρεπτική αξία του ρυζιού εξαρτάται από την ποικιλία και τη μέθοδο μαγειρέματος. Πολλές βιταμίνες και μέταλλα συγκεντρώνονται στο πίτουρο και το φύτρο, τα οποία αποτελούν συστατικά του καστανού ρυζιού και όχι του λευκού. Παρακάτω αναφέρονται τα βασικά χαρακτηριστικά μερικών από αυτά:

Μαγγάνιο: Είναι ένα ορυκτό ιχνοστοιχείο που βρίσκεται στα περισσότερα τρόφιμα, ειδικά στα δημητριακά ολικής άλεσης. Είναι απαραίτητο για το μεταβολισμό, την ανάπτυξη και το αντιοξειδωτικό σύστημα του σώματος.

Σελήνιο: Είναι ένα μέταλλο που αποτελεί συστατικό των σεληνοπρωτεϊνών, οι οποίες καταλύουν διάφορες σημαντικές λειτουργίες στο σώμα (Rayman, 2012).

Θειαμίνη: Επίσης γνωστή ως βιταμίνη Β1, η θειαμίνη είναι απαραίτητη για το μεταβολισμό και τη λειτουργία της καρδιάς, των μυών και του νευρικού συστήματος.

Νιασίνη: Επίσης γνωστή ως βιταμίνη Β3, η νιασίνη εμφανίζεται στο ρύζι ως επί το πλείστον με τη μορφή νικοτινικού οξέος. Η ενυδάτωση (μούλιασμα) του ρυζιού στο νερό πριν από το μαγείρεμα μπορεί να αυξήσει την απορρόφησή της (Schenker, 2012a).

Μαγνήσιο: Βρίσκεται στο καστανό ρύζι και αποτελεί ένα σημαντικό διατροφικό μέταλλο. Είναι πιθανό, τα χαμηλά επίπεδα μαγνησίου να συμβάλλουν σε μία σειρά χρόνιων ασθενειών (Rosanoff, Weaver, & Rude, 2012).

Χαλκός: Συνήθως βρίσκεται σε δημητριακά ολικής άλεσης. Η πρόσληψή του στη δυτική διατροφή είναι αρκετά χαμηλή, πράγμα που μπορεί να έχει αρνητικές επιπτώσεις στην υγεία της καρδιάς (Health, Sandstead, & Klevay, 2000).

### **Άλλες φυτικές ενώσεις:**

Το ρύζι αποτελείται από ένα πλήθος φυτικών ενώσεων, μερικές από τις οποίες συνδέονται με πιθανά οφέλη για την υγεία. Το ρύζι με χρωστικές ουσίες, όπως είναι οι κόκκινες ποικιλίες, έχει βρεθεί ότι είναι ιδιαίτερα πλούσιο σε αντιοξειδωτικά (Gunaratne et al., 2013).

Φυτικό οξύ: Ένα αντιοξειδωτικό που βρίσκεται στο καστανό ρύζι, το φυτικό οξύ, μειώνει την απορρόφηση των διατροφικών μετάλλων, όπως ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος. Μπορεί να μειωθεί με διαβροχή και αναβρασμό του ρυζιού πριν από το μαγείρεμα (Schlemmer, Frølich, Prieto, & Grases, 2009).

Λιγνίνη: Βρίσκεται στο πίτουρο του ρυζιού και μετατρέπεται σε εντερολακτόνη από τα βακτήρια του εντέρου. Η εντερολακτόνη είναι μία ισοφλαβόνη (φυτοοιστρογόνο) που μπορεί να έχει πολλά οφέλη για την υγεία (Adlercreutz, 2007; Peterson et al., 2010).

Φερουλικό οξύ: Είναι ένα ισχυρό αντιοξειδωτικό που βρίσκεται στο πίτουρο ρυζιού. Μπορεί να προστατεύει από διάφορες χρόνιες ασθένειες, όπως ο καρκίνος, ο διαβήτης και οι καρδιαγγειακές παθήσεις (Min, McClung, & Chen, 2011; Srinivasan, Sudheer, & Menon, 2007).

2-ακετυλ 1-πυρρολίνη (2AP): Είναι μία αρωματική ουσία, υπεύθυνη για τη γεύση και τη μυρωδιά του αρωματισμένου ρυζιού, όπως το ρύζι jasmine και basmati (Bourgis et al., 2008).

## **1.2. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΡΥΖΙΟΥ**

Μέσα στα χρόνια, έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές για την αποφλοιώση του ρυζιού. Παραδοσιακά, χρησιμοποιείτο κάποια μορφή γουδιού, με το οποίο χτυπούσαν το ρύζι. Ένα πρώιμο απλό μηχάνημα για να γίνει αυτό είναι ο "κοπανιστής" ρυζιού. Αργότερα, αναπτύχθηκαν ακόμη πιο αποδοτικά μηχανήματα για την αποφλοιώση και τη στίλβωση του ρυζιού. Σήμερα, ο αποφλοιωτής ρυζιού είναι ένα γεωργικό μηχάνημα το οποίο έχει σχεδιαστεί για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας της απομάκρυνσης των εξωτερικών φλοιών των κόκκων ρυζιού.

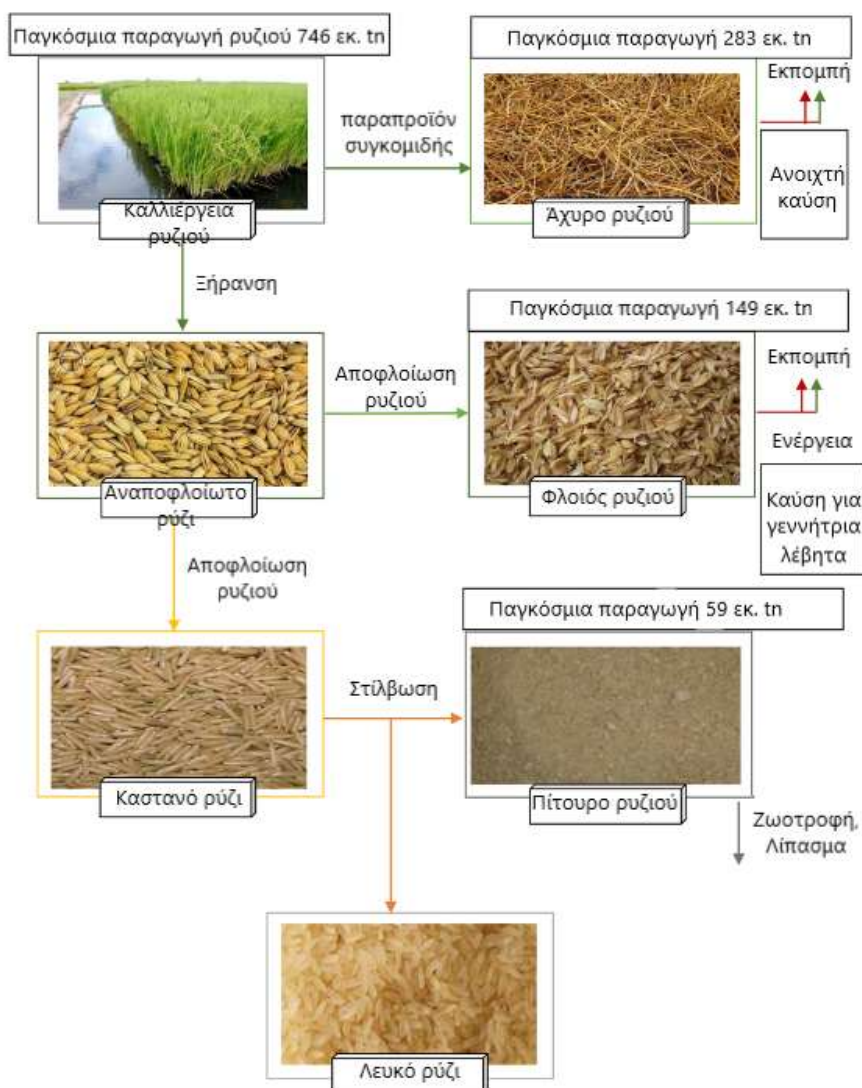
Μύλευση είναι η διαδικασία κατά την οποία ο κόκκος ρυζιού μετασχηματίζεται σε μορφή κατάλληλη για κατανάλωση από τον άνθρωπο. Συνεπώς, η διαδικασία αυτή πρέπει να γίνει με μεγάλη προσοχή, ώστε να αποφευχθεί η θραύση του πυρήνα και να βελτιωθεί η ανάκτηση. Το ρύζι συλλέγεται από τα χωράφια με τη μορφή του αναποφλοιώτου ρυζιού όπου κάθε πυρήνας περιβάλλεται από ένα σκληρό, ινώδη φλοιό. Αφού το ρύζι ξηραίνεται, το πρώτο στάδιο της διαδικασίας της μύλευσης είναι η αφαίρεση του φλοιού. Με αυτή τη

διαδικασία λαμβάνεται το καστανό ρύζι. Το καστανό ρύζι επεξεργάζεται περαιτέρω, με σκοπό να δημιουργηθεί ένα ελκυστικότερο, οπτικά, λευκό ρύζι. Μετά τη συγκομιδή και την ξήρανση, το αναποφλοιώτο ρύζι υποβάλλεται στην κύρια διαδικασία της επεξεργασίας, η οποία περιλαμβάνει την αποφλοίωση καθώς και την αφαίρεση των στρωμάτων πίτουρου (στίλβωση) πριν καταναλωθεί. Η απόδοση της μύλευσης και η ποιότητα του ρυζιού εξαρτώνται από την ποιότητα του ρυζιού, τον εξοπλισμό μύλευσης που χρησιμοποιείται και την ικανότητα του χειριστή.

Η μύλευση του ρυζιού μπορεί να πραγματοποιηθεί ως εξής:

- Μία διαδικασία ενός σταδίου, όπου ο φλοιός και το πίτουρο αφαιρούνται σε ένα πέρασμα και το λευκό ρύζι παράγεται απευθείας από το αναποφλοιώτο ρύζι.
- Μία διαδικασία δύο σταδίων, όπου αφαιρούνται χωριστά ο φλοιός και το πίτουρο και το καστανό ρύζι παράγεται ως ενδιάμεσο προϊόν.
- Μία διαδικασία πολλαπλών σταδίων όπου το αναποφλοιώτο ρύζι περνά από διάφορες λειτουργίες και μηχανήματα, καταλήγοντας στο λευκό ρύζι (IRRI; Caringal, Rosa, Maan, & Camello, 2016; Ryan, 2011).

Το συνολικό διάγραμμα ροής της επεξεργασίας του ρυζιού δίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1.5 : Βήματα της επεξεργασίας του ρυζιού και των παραπροϊόντων που προέρχονται από την ετήσια παραγωγή του 2014, σύμφωνα με τον FAO (2016) (Abaide et al., 2019)

Η διαδικασία της επεξεργασίας του ρυζιού ακολουθεί τα εξής βήματα:

**Καθαρισμός:** Ο καθαρισμός του ρυζιού βασίζεται σε διαφορετικές φυσικές ιδιότητες, όπως το βάρος, το μέγεθος, η πυκνότητα και οι ιδιότητες των ξένων υλών. Οι ξένες ύλες που είναι ελαφρύτερες από το ρύζι, αφαιρούνται από τους αναρροφητήρες.

**Υγροθερμική επεξεργασία:** Η υγροθερμική επεξεργασία είναι μία προαιρετική διαδικασία, η οποία εφαρμόζεται στην περίπτωση του κίτρινου ρυζιού (parboiled) και περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Εμβάπτιση του ρυζιού σε νερό έως ότου αυξηθεί η υγρασία σε 25-30%, για περίπου 3-3.5h στους 70°C.
2. Βρασμό του ενυδατωμένου ρυζιού σε ατμό υπό πίεση ή μη για 20 min περίπου.
3. Προξήρανση και ξήρανση του έμφλοιου ρυζιού σε ασφαλή επίπεδα υγρασίας (14%).

Κατά τη διάρκεια του βρασμού τα ένζυμα απενεργοποιούνται. Το ενδοσπέρμιο καθίσταται συμπαγές, ημιδιαφανές και παχύρευστο λόγω της ζελατινοποίησης και πιθανές ρωγμές στην καρύοψη σφραγίζονται.

**Ξήρανση:** Το αναποφλοιώτο ρύζι το οποίο έχει υποστεί υγροθερμική επεξεργασία πρέπει να ξηρανθεί μέχρι τελική υγρασία 14-16%, ώστε να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες μύλευσης και αποθήκευσης. Παραδοσιακά, η ξήρανση πραγματοποιείται έξω στον ήλιο και η διαδικασία συνήθως διαρκεί έως και 5 ημέρες ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Στους σύγχρονους μύλους ρυζιού, συστήματα συνεχούς ξήρανσης με θερμό αέρα χρησιμοποιούνται για να κάνουν τη διαδικασία σύντομη και υγιεινή.

**Αποφλοιώση:** Ο διαχωρισμός του φλοιού από τον κόκκο ρυζιού πραγματοποιείται σε αυτό το στάδιο μηχανικά. Πολλά μηχανήματα έχουν εφευρεθεί με διαφορετικές αρχές εργασίας για να καταστήσουν αποτελεσματικότερη τη διαδικασία αποφλοιώσης. Ο φλοιός απομακρύνεται από το αλεσμένο προϊόν με χρήση αέρα, ενώ εκείνο που παραμένει είναι το καστανό ρύζι, με τα στρώματα πίτουρου να περιβάλλουν ακόμη τον κόκκο. Η ευκολία του σταδίου αυτού εξαρτάται από την ποικιλία του ρυζιού. Ο φλοιός αποτελεί περίπου το 20% του βάρους της πρώτης ύλης ρυζιού.

**Διαχωρισμός:** Το υλικό που παραλαμβάνεται στην έξοδο της μηχανής αποφλοιώσης είναι ένα μίγμα αποφλοιωμένου ρυζιού (καστανό ρύζι), φλοιού και αναποφλοιωτών κόκκων. Προκειμένου να μειωθεί το ποσοστό θραυσμένων κόκκων χρησιμοποιείται διαλογέας ο οποίος λειτουργεί με βάση τη διαφορά του ειδικού βάρους των κόκκων και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ταχύτητα παραγωγής ενός ορυζόμυλου. Έτσι, διαχωρίζεται ο μη αποφλοιωμένος κόκκος από το καστανό ρύζι, ενώ οι μη αποφλοιωμένοι κόκκοι επιστρέφουν στην αποφλοιωτική μηχανή.

**Μύλευση ή επιφανειακή επεξεργασία:** Η μύλευση είναι μία φυσική διεργασία, κατά την οποία, αφαιρώντας τα εξωτερικά στρώματα των κόκκων ρυζιού (περικάρπιο, μέρος του ενδοσπερμίου και το έμβρυο), παράγεται το λευκό μυλευμένο ρύζι, ενώ παράλληλα προκύπτουν ως υποπροϊόντα αλεσμένο πίτουρο και θραυσμένο ρύζι. Στο στάδιο λαμβάνει χώρα τριβή των κόκκων ρυζιού μεταξύ τους με χρήση κυλίνδρου και απλής πίεσης αέρα. Η μύλευση επιτυγχάνεται μέσω 2-3 επαναλήψεων σε διαφορετικούς κυλίνδρους και με

διαφορετικές ρυθμίσεις, ανάλογα με τον απαιτούμενο βαθμό μύλευσης. Η προσθήκη ελαίου προστατεύει το άρωμα του ρυζιού, καθώς το έλαιο δρώντας ως διαλύτης πτητικών καρβονυλίων βοηθά στη διατήρησή τους στο προϊόν.

**Διαχωρισμός:** Το μυλευμένο ρύζι διαλέγεται κατά μέγεθος και διαχωρίζεται από διαφορετικούς σπόρους, αλλά ακόμη και από ίδιου μεγέθους ή θραυσμένους κόκκους ρυζιού, με τη βοήθεια σειράς οριζόντιων ή περιστροφικών αυτοκαθαριζόμενων δονούμενων κοσκίνων. Τα προϊόντα διαφορετικού μεγέθους αποθηκεύονται χωριστά.

**Στίλβωση:** Τα υπολείμματα της μύλευσης απομακρύνονται με τη βοήθεια κυλίνδρου, ο οποίος περιστρέφεται με υψηλή ταχύτητα.

Κατά τη μύλευση αφαιρείται περίπου το 9-13% του βάρους του καστανού ρυζιού. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από την ποικιλία του ρυζιού (μακρύσπερμο ρύζι, μεσόσπερμο, στρογγυλόσπερμο, κτλ.), την περιοχή της καλλιέργειας και την υγρασία του κόκκου. Το μυλευμένο ρύζι είναι μικρότερο σε μέγεθος από το καστανό ρύζι. Η πυκνότητα του μυλευμένου ρυζιού κυμαίνεται από 1,43-1,46 g/mL και το φαινόμενο ειδικό βάρος του από 0,78-0,85. Η απομάκρυνση του 1% του εξωτερικού στρώματος πίτουρου του κόκκου του ρυζιού αυξάνει την απορροφητικότητα νερού κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος, και μάλιστα την καθιστά ίδια με εκείνη του έντονα μυλευμένου ρυζιού (Nambi, Manickavasagan, & Sultan, 2017; Κυρίτση, 2009).

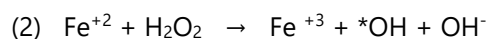
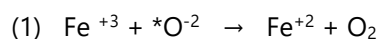
## 2. ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

---

Ο εμπλουτισμός των τροφίμων έχει μακρά ιστορία χρήσης σε βιομηχανικές χώρες, συμβάλλοντας στην επιτυχή αντιμετώπιση των ανεπαρκειών των βιταμινών A και D, αρκετών βιταμινών B, όπως η θειαμίνη, η ριβοφλαβίνη και η νιασίνη, του ιωδίου και του σιδήρου. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1940, ο εμπλουτισμός των προϊόντων δημητριακών με θειαμίνη, ριβοφλαβίνη και νιασίνη έγινε κοινή πρακτική. Τα τρόφιμα για μικρά παιδιά ενισχύθηκαν με σίδηρο, μία πρακτική που έχει μειώσει σημαντικά τον κίνδυνο εμφάνισης ανεπάρκειας σιδήρου ή σιδηροπενικής αναιμίας σε αυτήν την ηλικιακή ομάδα. Στις λιγότερο βιομηχανικές χώρες, ο εμπλουτισμός έχει γίνει μία όλο και περισσότερο χρησιμοποιούμενη τεχνική τα τελευταία χρόνια, τόσο πολύ ώστε τα προγράμματα έχουν ξεκινήσει να υλοποιούνται πιο γρήγορα από ότι θεωρείτο παλαιότερα πιθανό (Allen, De Benoist, Dary, & Hurrell, 2006, p. 14).

### 2.1 ΣΙΔΗΡΟΣ

Ο σίδηρος (Fe) αποτελεί ένα στοιχείο ύψιστης βιολογικής σημασίας για κάθε ζωντανό οργανισμό. Ο σπουδαίος ρόλος του έγκειται στη χημεία του. Η ύπαρξη του σιδήρου τόσο ως δισθενούς (ferrous) όσο και ως τρισθενούς (ferric) του επιτρέπει να λαμβάνει και να προσφέρει ηλεκτρόνια. Ο σίδηρος παίρνει μέρος στις οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις, γνωστές ως αντιδράσεις Fenton:



(Lieu, Heiskala, & Peterson, 2001)

Αυτή η βιολογική ευελιξία του σιδήρου βασίζεται στην ικανότητά του να συντονίζεται με τις πρωτεΐνες και να δρα ως δότης και δέκτης ηλεκτρονίων. Έτσι, ο σίδηρος μπορεί εύκολα να εναλλάσσεται μεταξύ των δύο καταστάσεων οξείδωσης  $\text{Fe}^{2+}$  (δισθενής) και  $\text{Fe}^{3+}$  (τρισθενής) αποβάλλοντας ή προσλαμβάνοντας ένα ηλεκτρόνιο (Papanikolaou & Pantopoulos, 2017). Αυτές οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις είναι απαραίτητες για τις βιοχημικές λειτουργίες του σιδήρου που παίρνουν μέρος σε ποικίλες κυτταρικές μεταβολικές διεργασίες. Τα επίπεδα του

σιδήρου στα κύτταρα πρέπει να διατηρούνται σταθερά, καθώς η υπερσυσσώρευση είναι τοξική (Lieu et al., 2001).

### 2.1.1. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Από την αρχαιότητα, ο άνθρωπος έχει αναγνωρίσει τον ιδιαίτερο ρόλο του σιδήρου στην υγεία και τις ασθένειες. Ο σίδηρος είχε πρώιμες φαρμακευτικές χρήσεις από τους Αιγυπτίους, τους Ινδουιστές, τους Έλληνες και τους Ρωμαίους. Κατά το 17ο αιώνα, χρησιμοποιήθηκε για τη θεραπεία της χλωρόζης (πράσινη νόσος), μία ασθένεια που συχνά οφείλεται στην ανεπάρκεια σιδήρου. Ωστόσο, μέχρι το 1932 η σημασία του σιδήρου αναγνωρίστηκε τελικά με την πειστική απόδειξη ότι χρειάζεται ανόργανος σίδηρος για τη σύνθεση αιμοσφαιρίνης. Για πολλά χρόνια, το ενδιαφέρον για τη θρεπτικότητα του σιδήρου επικεντρώθηκε στο ρόλο του στο σχηματισμό αιμοσφαιρίνης και στη μεταφορά οξυγόνου. Σήμερα, αν και είναι υπεύθυνες για τα μεγάλα ποσοστά αναιμίας στις βιομηχανικές χώρες η χαμηλή πρόσληψη σιδήρου και η βιοδιαθεσιμότητά του, στις αναπτυσσόμενες χώρες ευθύνονται μόνο περίπου για το ήμισυ του ποσοστού της αναιμίας, όπου οι μολυσματικές και φλεγμονώδεις ασθένειες (ιδιαίτερα η ελονοσία), η απώλεια αίματος από παρασιτικές λοιμώξεις και άλλες ανεπάρκειες θρεπτικών ουσιών (βιταμίνης A, ριβοφλαβίνης, φολικού οξέος και βιταμίνης B<sub>12</sub>) είναι επίσης σημαντικές αιτίες (Abbaspour, Hurrell, & Kelishadi, 2014).

Ο σίδηρος, ποσοτικά, αντιστοιχεί περίπου σε 35 mg/kg του βάρους μίας ενήλικης γυναίκας και σε 45 mg/Kg του βάρους ενός ενήλικα άνδρα. Η μεγαλύτερη ποσότητα του σιδήρου στο σώμα, περίπου το 60-70% βρίσκεται δεσμευμένο στην αιμοσφαιρίνη. Ένα 10% του απαραίτητου σιδήρου του σώματος βρίσκεται στην μυοσφαιρίνη, τα κυτοχρώματα και σε ένζυμα που περιέχουν σίδηρο, σε ποσότητα που ανέρχεται στα 4-8 g σιδήρου. Σε έναν υγιή οργανισμό, το υπόλοιπο 20-30% πλεόνασμα σιδήρου αποθηκεύεται ως φερριτίνη και αιμοσιδηρίνη στα ηπατοκύτταρα και στα δικτυοενδοθηλιακά μακροφάγα (Lieu et al., 2001).

Εκτός από τις απώλειες σιδήρου που οφείλονται σε κάποια αιμορραγία, όπως η εμμηνόρροια, ή σε εγκυμοσύνη, ο σίδηρος διατηρείται εξαιρετικά και δεν χάνεται εύκολα από το σώμα. Υπάρχουν ορισμένες υποχρεωτικές απώλειες σιδήρου από το σώμα οι οποίες προκύπτουν από τη φυσιολογική απολέπιση των κυττάρων από τις επιθηλιακές επιφάνειες, συμπεριλαμβανομένων του δέρματος, της ουρογεννητικής οδού και του γαστρεντερικού σωλήνα. Ωστόσο, οι απώλειες αυτές εκτιμάται ότι είναι πολύ περιορισμένες, περίπου 1 mg ανά ημέρα. Οι απώλειες σιδήρου μέσω αιμορραγίας μπορεί να είναι σημαντικές και η



υπερβολική απώλεια αίματος από την εμμηνόρροια είναι η πιο συνηθισμένη αιτία έλλειψης σιδήρου στις γυναίκες (Abbaspour et al., 2014).

#### 2.1.1.1. ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΣΙΔΗΡΟΥ – ΟΜΟΙΟΣΤΑΣΗ

Όπως έχει ήδη γίνει σαφές, ο σίδηρος είναι απαραίτητος για τη ζωή, αλλά η ικανότητά του να κερδίζει ή να χάνει εύκολα ηλεκτρόνια διευκολύνει τη δημιουργία ιδιαίτερα δραστικών οξειδίων, τα οποία βλάπτουν απαραίτητες βιολογικές ενώσεις όπως τα λιπίδια, οι πρωτεΐνες και το DNA. Πιο συγκεκριμένα, η υπερβολική συσσώρευση σιδήρου στον οργανισμό έχει συνδεθεί με την πρόκληση διάφορων ασθενειών όπως κίρρωση, καρδιαγγειακές νόσοι, διαβήτης τύπου 2 και καρκίνος (από την υπερβολική κατανάλωση κόκκινου κρέατος). Επομένως, απαιτείται μία πολύπλοκη ρύθμιση η οποία να καλύπτει τις απαιτήσεις του σώματος, αλλά συγχρόνως να αποτρέπει την υπερβολική συσσώρευση σιδήρου.

Ομοιόσταση σιδήρου ονομάζεται η ικανότητα του οργανισμού να διατηρεί σταθερές συγκεντρώσεις σιδήρου στο εσωτερικό του, παρά τις εξωγενείς μεταβολές. Η κατάσταση του σιδήρου στο σώμα διατηρείται με μία περίπλοκη διαδικασία που ρυθμίζει την ισορροπία μεταξύ της απορρόφησης του σιδήρου στο δωδεκαδάκτυλο, της ανακύκλωσης του σιδήρου με τα μακροφάγα και της αποθήκευσης του σιδήρου, κυρίως στο ήπαρ, καθώς δεν υπάρχει φυσιολογική οδός για την απέκκριση σιδήρου. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η εψιδίνη έχει κυρίαρχο ρόλο. Η εψιδίνη, είναι μία ορμόνη, η οποία έχει αρνητική επίδραση στην ομοιόσταση του σιδήρου, αναστέλλοντας την απορρόφησή του και την κινητοποίησή του από τους ιστούς όπου αποθηκεύεται. Η εψιδίνη δρα δεσμεύοντας και υποβιβάζοντας την δράση της φεροπορτίνης, μίας διαμεμβρανικής πρωτεΐνης-εξαγωγέα, εμποδίζοντας έτσι την απελευθέρωση σιδήρου από συγκεκριμένα κύτταρα (μακροφάγα, ηπατικά, εντερικά κύτταρα). Επιπλέον, πρόσφατες αναλύσεις καταδεικνύουν ότι η εψιδίνη ελέγχει τα ποσά σιδήρου, μειώνοντας την έκφραση των γονιδίων που εμπλέκονται στην απορρόφηση.

Ο σίδηρος υπάρχει στο ανθρώπινο σώμα κυρίως με τη μορφή συμπλόκων, ενωμένος με πρωτεΐνες ή ένζυμα, απαρτίζοντας δύο ευρείες κατηγορίες ενώσεων: τις αιματικές (heme) και τις μη αιματικές (non heme). Το κλάσμα του σιδήρου που απορροφάται από την τροφή που λαμβάνεται είναι συνήθως χαμηλό, αλλά μπορεί να κυμαίνεται από 5% έως 35% ανάλογα με τις περιστάσεις και τον τύπο του σιδήρου. Ο σίδηρος απορροφάται κυρίως από το δωδεκαδάκτυλο, αλλά οι μηχανισμοί απορρόφησης αυτών των μορφών είναι διαφορετικοί (Abbaspour et al., 2014; Blanco-rojo & Vaquero, 2019; Lieu et al., 2001).

#### Απορρόφηση του μη αιματικού σιδήρου:

Τα μη αιματικά σύμπλοκα σιδήρου, που περιλαμβάνονται στις τροφές, αποσυντίθενται κατά τη διάρκεια της πέψης στη γαστρεντερική οδό λόγω της δράσης της πεψίνης και του υδροχλωρικού οξέος. Εφόσον απελευθερωθεί από τα συστατικά των τροφίμων, ο μη αιματικός σίδηρος υφίσταται ως επί το πλείστον στην τρισθενή μορφή του ( $\text{Fe}^{+3}$ ), η οποία παρουσιάζει χαμηλή διαλυτότητα και βιοδιαθεσιμότητα. Ωστόσο, υπάρχουν αρκετά συστατικά τροφών, συμπεριλαμβανομένων του ασκορβικού οξέος και αμινοξέων όπως η κυστεΐνη και η ιστιδίνη, τα οποία είναι ικανά να ανάγουν τον τρισθενή ( $\text{Fe}^{+3}$ ) σε δισθενή ( $\text{Fe}^{+2}$ ) σίδηρο. Επιπλέον, η κύρια αναγωγική δράση διεξάγεται από την αναγωγή του κυττοχρώματος β του δωδεκαδάκτυλου, μία αιματική πρωτεΐνη η οποία βρίσκεται στην εξωτερική μεμβράνη των εντερικών κυττάρων και χρησιμοποιεί ασκορβικό για να διευκολύνει την αναγωγή του σιδήρου.

#### Απορρόφηση του αιματικού σιδήρου:

Όσον αφορά την οδό απορρόφησης του αιματικού σιδήρου, υπάρχει μία ειδική πρωτεΐνη-μεταφορέας (HCP-1: HaemCarrierProtein-1), γεγονός που εξηγεί γιατί η απορρόφηση της συγκεκριμένης μορφής σιδήρου παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστη από τους υπόλοιπους διατροφικούς παράγοντες. Μόλις εισέλθει, ο σίδηρος απελευθερώνεται από την αιματική οξυγενάση (HO: Haem Oxygenase) και στη συνέχεια ακολουθεί τις ίδιες οδούς με το μη αιματικό σίδηρο ή, όπως προτάθηκε πρόσφατα, εξάγεται άθικτος διαμέσου της βασοπλευρικής (basolateral) μεμβράνης με τη βοήθεια της πρωτεΐνης FLVCR1 στο πλάσμα, όπου αιχμαλωτίζεται από την αιμοπηξίνη (haemopexin) και μεταφέρεται στη μορφή της αιματικής αιμοπηξίνης (haem-haemopexin). Αυτός ο δεύτερος μηχανισμός εξαγωγής περιλαμβάνει τον υποδοχέα CD91 του συμπλέγματος αιματικής αιμοπηξίνης.

Διαφοροποίηση στο μηχανισμό απορρόφησης παρουσιάζουν, επίσης, οι μορφές του σιδήρου στις δύο διαφορετικές καταστάσεις οξείδωσης, ο δισθενής ( $\text{Fe}^{+2}$ ) και ο τρισθενής ( $\text{Fe}^{+3}$ ) σίδηρος:

#### Απορρόφηση του δισθενούς σιδήρου (ferrous):

Η ευδιάλυτη μορφή του δισθενούς σιδήρου ( $\text{Fe}^{+2}$ ) μεταφέρεται στα εντερικά κύτταρα μέσω του μεταφορέα-1 δισθενών μετάλλων (DMT-1: Divalent Metal Transporter-1). Ο DMT-1 είναι ένας συμμεταφορέας πρωτονίων, δηλαδή μία ενσωματωμένη πρωτεΐνη μεμβράνης που απαιτεί χαμηλές τιμές pH για να μεταφέρει ταυτόχρονα διαφορετικούς τύπους μορίων διαμέσου της κυτταρικής μεμβράνης προς την ίδια κατεύθυνση. Αυτός ο μεταφορέας δεν

είναι επιλεκτικός ως προς το σίδηρο, με αποτέλεσμα να υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ του σιδήρου και άλλων δισθενών μετάλλων όπως το ασβέστιο και ο ψευδάργυρος.

#### Απορρόφηση του τρισθενούς σιδήρου (ferric):

Έχει προταθεί ότι ο τρισθενής σίδηρος ( $Fe^{+3}$ ) μπορεί να απορροφάται από τα εντερικά κύτταρα μέσω ενός μηχανισμού, ο οποίος διαφέρει από το μηχανισμό του DMT-1, αλλά δεν έχει ακόμη εξακριβωθεί. Υποστηρίζεται ότι ο τρισθενής σίδηρος (luminal $Fe^{+3}$ ), μέσω αλληλεπίδρασης με βλεννογόνα και επακόλουθης συσχέτισης με τις  $\beta 3$ -ιντεγκρίνη ( $\beta 3$ -integrin) και κινητοφερίνη (mobilferin) διασχίζει την εσωτερική εντερική μεμβράνη (luminal membrane) και εισέρχεται. Στη συνέχεια, αυτό το σύμπλεγμα  $Fe^{+3}$ -πρωτεϊνών συνδέεται με φλαβίνη-μονοοξυγενάση (flavin-MO) και  $\beta 2$ -μικροσφαιρίνη σχηματίζοντας ένα σύμπλοκο παραφερριτίνης, όπου ο τρισθενής σίδηρος ( $Fe^{+3}$ ) μπορεί να αναχθεί σε δισθενή ( $Fe^{+2}$ ), ο οποίος τελικά εξάγεται στο κυτταρόπλασμα μέσω του DMT-1.

#### Φερριτίνη:

Η φερριτίνη είναι ένα μακρομόριο, στο οποίο αποθηκεύεται μεγάλη ποσότητα σιδήρου τόσο στους ζωικούς όσο και στους φυτικούς οργανισμούς. Η συγκέντρωση της φερριτίνης μαζί με αυτή της αιμοσιδηρίνης αντανακλά τα αποθέματα σιδήρου στο σώμα. Διατηρούν το σίδηρο στην αδιάλυτη μορφή του και υπάρχουν κυρίως στο ήπαρ, την σπλήνα και το μυελό των οστών. Η αιμοσιδηρίνη, είναι ένα συγκρότημα αποθήκευσης σιδήρου που απελευθερώνει δυσκολότερα σίδηρο για τις σωματικές ανάγκες. Υπό συνθήκες σταθερής κατάστασης, οι συγκεντρώσεις φερριτίνης στον ορό συσχετίζονται καλά με τα συνολικά αποθέματα σιδήρου στο σώμα. Επομένως, η φερριτίνη ορού είναι η πιο κατάλληλη εργαστηριακή δοκιμασία για την εκτίμηση των αποθεμάτων σιδήρου. Έχουν προταθεί τρεις μηχανισμοί για την απορρόφηση της:

1. Η φερριτίνη η οποία λαμβάνεται από έναν ειδικό υποδοχέα στην εσωτερική κυτταρική εντερική μεμβράνη (luminal membrane)
2. Η φερριτίνη που απορροφάται μέσω ενός μηχανισμού ενδοκυττάρωσης.
3. Η φερριτίνη η οποία παρέχει τρισθενή σίδηρο μετά από την υδρόλυση πρωτεάσης.

(Abbaspour et al., 2014; Blanco-rojo & Vaquero, 2019)

#### 2.1.1.2. ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑ ΣΙΔΗΡΟΥ

Παρά το γεγονός ότι ο σίδηρος είναι ένα από τα πιο άφθονα στοιχεία στη γη, η έλλειψη σιδήρου είναι ένα από τα πιο κοινά διατροφικά προβλήματα στον κόσμο και παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις για τη δημόσια υγεία. Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO), εκτιμά ότι πάνω από 2 δισεκατομμύρια άνθρωποι, περίπου το ένα τρίτο του πληθυσμού του κόσμου, έχουν έλλειψη σιδήρου και επηρεάζονται περισσότερο οι γυναίκες και τα παιδιά. Από αυτούς το 1 δισεκατομμύριο υποφέρουν από αναιμία. Έχει αναγνωριστεί, επίσης, ως ένας από τους 10 μεγαλύτερους παράγοντες κινδύνου της ανθρώπινης υγείας, με συνολικά 0,8 εκατομμύρια θανάτους να σχετίζονται με την έλλειψη σιδήρου.

Η έλλειψη σιδήρου προκαλείται όταν οι φορείς αποθήκευσης του σιδήρου, η φερριτίνη και η αιμοσιδηρίνη αδειάζουν και δεν είναι πλέον ικανές να καλύψουν τις ανάγκες του οργανισμού. Η έλλειψη σιδήρου αναπαριστά ένα φάσμα καταστάσεων, από την απλή εξάντληση σιδήρου μέχρι τη σιδηροπενική αναιμία. Τα στάδια της ανεπάρκειας σιδήρου μπορούν να χαρακτηριστούν ως:

- Εξάντληση σιδήρου: Είναι μία ήπια ανεπάρκεια σιδήρου, όπου τα αποθέματα σιδήρου εξαντλούνται. Σε αυτό το αρχικό στάδιο, αν και δεν παρατηρούνται ουσιαστικά άμεσες επιπτώσεις στον οργανισμό, η κατάσταση θεωρείται ανησυχητική και εν δυνάμει απειλητική για την υγεία.
- Σιδηροπενική ερυθροποίηση: Είναι μία οριακή έλλειψη σιδήρου, όπου η παραγωγή πολλών πρωτεϊνών που εξαρτώνται από το σίδηρο, όπως η τρανσφερίνη, υποβαθμίζεται, αλλά τα επίπεδα αιμοσφαιρίνης είναι φυσιολογικά.
- Σιδηροπενική αναιμία (IDA: Iron Deficiency Anemia): Σε αυτό το στάδιο, το οποίο είναι και το πιο σοβαρό, μειώνεται η σύνθεση της αιμοσφαιρίνης και η μεταφορά οξυγόνου στους ιστούς.

(Ezcaray, 2014, p. 11; Percy, Mansour, & Fraser, 2017)

Το δίλημμα της σωστής διάγνωσης της ανεπάρκειας σιδήρου προέρχεται από τη διάκριση μεταξύ αποθηκευμένου και κυκλοφορούντος σιδήρου και από τη διαφορά ανάμεσα στον κινητό και στον αδρανή σίδηρο (Anker, 2019).

#### **Σιδηροπενική αναιμία**

Η σιδηροπενική αναιμία συνήθως αξιολογείται με τη μέτρηση των επιπέδων της αιμοσφαιρίνης, αλλά αυτή η προσέγγιση στερείται εξειδίκευσης και ευαισθησίας. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO), η αναιμία μπορεί να οριστεί από συγκέντρωση

αιμοσφαιρίνης μικρότερη των 120 mg/L στις γυναίκες και 130 mg/L στους άντρες (Dickson & Brookes, 2019; Percy et al., 2017).

Πολλές μελέτες συνδέουν τη σιδηροπενική αναιμία με την καθυστερημένη ανάπτυξη. Οι μελέτες, αυτές, επισημαίνουν επίσης τη δυσκολία διαχωρισμού των επιπτώσεων της αναιμίας με αυτές που προκύπτουν με παράγοντες όπως ο υποσιτισμός και η κοινωνικοοικονομική κατάσταση (Wong, 2017).

#### *2.1.1.2.1. ΑΙΤΙΕΣ ΤΗΣ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΥ*

Η έλλειψη σιδήρου προκύπτει από την εξάντληση των αποθεμάτων σιδήρου και συμβαίνει όταν η απορρόφηση σιδήρου δεν μπορεί να κρατήσει το ρυθμό, σε μία παρατεταμένη περίοδο, με τις μεταβολικές απαιτήσεις για το σίδηρο, ώστε να διατηρήσει την ανάπτυξη και να αναπληρώσει την απώλεια σιδήρου που σχετίζεται κυρίως με την απώλεια αίματος. Οι κύριες αιτίες της ανεπάρκειας σιδήρου είναι η χαμηλή πρόσληψη βιοδιαθέσιμου σιδήρου, οι αυξημένες ανάγκες σε σίδηρο ως αποτέλεσμα της ταχείας ανάπτυξης, της εγκυμοσύνης, της έμμηνης ρύσης και της υπερβολικής απώλειας αίματος που προκαλείται από παθολογικές λοιμώξεις, προκαλώντας γαστρεντερική απώλεια αίματος και μειωμένη απορρόφηση του σιδήρου. Η συχνότητα εμφάνισης ανεπάρκειας σιδήρου είναι αυξημένη στα έφηβα κορίτσια, καθώς οι απώλειες του σιδήρου στην εμμηνόρροια υπερτερούν των αναγκών για ταχεία ανάπτυξη. Άλλος ένας παράγοντας κινδύνου για την ανεπάρκεια σιδήρου στις νεαρές γυναίκες είναι οι χορτοφαγικές δίαιτες.

Η ανεπάρκεια διατροφικού σιδήρου προκύπτει, όταν οι φυσιολογικές απαιτήσεις δεν μπορούν να καλυφθούν από την απορρόφηση σιδήρου από τη διατροφή. Η διατροφική βιοδιαθεσιμότητα σιδήρου είναι χαμηλή σε πληθυσμούς που καταναλώνουν μονοτονικές φυτικές τροφές με λίγες ποσότητες κρέατος. Σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, τα φυτικά τρόφιμα σπάνια εμπλουτίζονται με σίδηρο και η συχνότητα αναιμίας υπερβαίνει το 50% στα παιδιά ηλικίας κάτω των 4 ετών. Όταν τα αποθέματα σιδήρου εξαντληθούν και δεν υπάρχει επαρκής σίδηρος διαθέσιμος για ερυθροποίηση, η σύνθεση αιμοσφαιρίνης σε πρόδρομες ουσίες ερυθροκυττάρων μειώνεται και εμφανίζονται αιματολογικά σημάδια αναιμίας από έλλειψη σιδήρου (Abbaspour et al., 2014).

#### *2.1.1.2.2. ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΥ*

Εξαιτίας των διάφορων λειτουργιών του σιδήρου στο σώμα, είναι γεγονός ότι ακόμη και αν δεν αναπτυχθεί σιδηροπενική αναιμία, η ήπια με μέτρια μορφή έλλειψης σιδήρου μπορεί να

έχει δυσμενείς λειτουργικές συνέπειες. Λόγω του σπουδαίου ρόλου του σιδήρου σε πολλά ένζυμα, τα άτομα με έλλειψη σιδήρου παρουσιάζουν γαστρεντερικές δυσλειτουργίες, τροποποιημένο μεταβολισμό και πρότυπα παραγωγής ορμονών. Όσον αφορά το τελευταίο, φαίνεται να επηρεάζεται η παραγωγή νευροδιαβιβαστών και ορμονών του θυρεοειδούς, ουσίες οι οποίες σχετίζονται με νευρολογικές και μυϊκές λειτουργίες καθώς και με το σύστημα ρύθμισης της θερμοκρασίας του σώματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη ικανότητα του ατόμου που εκτίθεται στο κρύο να διατηρεί τη θερμοκρασία του. Επιπλέον, η σύνθεση και η επιδιόρθωση του DNA συμπεριλαμβάνει ένζυμα τα οποία εξαρτώνται από το σίδηρο.

Επίσης, φαίνεται να υπάρχει αυξημένος κίνδυνος δηλητηρίασης των παιδιών από βαρέα μέταλλα, εξαιτίας της ενισχυμένης ικανότητας απορρόφησης δισθενών μεταλλικών ιόντων. Επιπλέον, τα άτομα με έλλειψη σιδήρου εμφανίζουν δυσκολία στο μεταβολισμό του ιωδίου και της βιταμίνης Α.

Εκτός όλων των προαναφερθεισών συνεπειών, η έλλειψη σιδήρου συνδέεται με την κόπωση, την ατονία και μία γενικότερη αίσθηση κούρασης. Επίσης συνδέεται με συμπτώματα κατάθλιψης και άγχους σε γυναίκες της προ-αναπαραγωγικής ηλικίας, αλλά και με όρεξη για κατανάλωση μη θρεπτικών ουσιών. Τέλος, ορισμένοι ερευνητές σχετίζουν την έλλειψη σιδήρου με την καρδιακή ανεπάρκεια και την οστεοπόρωση.

Άλλες επιπτώσεις της ανεπάρκειας σιδήρου είναι:

#### Πνευματικές επιδόσεις:

Ο σίδηρος αποτελεί κομβικής σημασίας ιχνοστοιχείο για την πνευματική και γνωστική λειτουργία, καθώς συναντάται σε πολλά τμήματα του εγκεφάλου. Έχει παρατηρηθεί ότι η σιδηροπενική αναιμία επηρεάζει αρκετά τη νοητική επιβράδυνση και την ψυχοκινητική ανάπτυξη των παιδιών. Υπάρχει η διαφορούμενη, βέβαια, άποψη ότι η έλλειψη σιδήρου μπορεί να έχει ουσιαστική μακροχρόνια αρνητική επίδραση στη λειτουργία του εγκεφάλου, με πιθανή μη αναστρέψιμη εγκεφαλική βλάβη σε κυτταρικό και νευρωνικό επίπεδο.

#### Ευαιρθησία σε μολύνσεις:

Η συχνότητα εμφάνισης μολυσματικών ασθενειών είναι αυξημένη σε πληθυσμούς που πλήττονται από έλλειψη σιδήρου, εξαιτίας της δυσμενούς επίδρασης της ανεπάρκειας σιδήρου στο ανοσοποιητικό σύστημα. Χαρακτηριστικά, έχει παρατηρηθεί ότι οι μολύνσεις του άνω αναπνευστικού συστήματος συμβαίνουν συχνότερα και με μεγαλύτερη διάρκεια σε αναιμικά παιδιά από ότι σε υγιή. Ωστόσο, φαίνεται ότι λόγω της επίδρασης του σιδήρου στη λειτουργία του ανοσοποιητικού συστήματος, οι μεταβολές της ομοιόστασης του σιδήρου

μπορεί να επηρεάσουν την απόκριση του ανοσοποιητικού συστήματος με ποικίλους τρόπους. Αφ' ενός, σε άτομα με σιδηροπενία η βακτηριοκτόνα δράση των μακροφάγων εξασθενεί καθώς επίσης ο αριθμός και η δραστικότητα των T-λεμφοκυττάρων μειώνεται. Αφ' ετέρου, όμως, έχει παρατηρηθεί ότι η απομάκρυνση των παθογόνων παραγόντων από το σίδηρο αποτελεί μία σημαντική αντιμικροβιακή άμυνα. Αυτή η τελευταία άποψη βασιζέται στο ότι κατά τη χορήγηση σιδήρου σε ενδημικές ζώνες ελονοσίας, ο παθογόνος παράγοντας μπορούσε να ευνοηθεί από το χορηγούμενο σίδηρο. Αξίζει, επίσης, να παρατηρηθεί, ότι η χρόνια ανοσοποιητική ενεργοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολές της ομοιόστασης του σιδήρου, προκαλώντας βλάβες στην ερυθροποίηση και συμβάλλοντας στην ανοσοπαθολογία.

#### Ικανότητα εργασίας και παραγωγικότητα:

Η προφανής σύνδεση μεταξύ της έλλειψης σιδήρου και της ικανότητας για χειρωνακτική εργασία σχετίζεται με τη μειωμένη μεταφορά οξυγόνου στο αίμα. Η ανεπάρκεια σιδήρου στους ιστούς μπορεί επίσης να παίζει κάποιο ρόλο μέσω της κυτταρικής οξειδωτικής ικανότητας, μειώνοντας έτσι την ενεργειακή απόδοση. Για παράδειγμα, αρκετές μελέτες έχουν εξαγάγει μία γραμμική σχέση ανάμεσα στην έλλειψη σιδήρου και τη μειωμένη απόδοση εργασίας στην περίπτωση γεωργικών εργατών στην Κολομβία, τη Γουατεμάλα και την Ινδονησία. Ωστόσο, η απόδοση των εργατών επανήλθε ταχέως στα φυσιολογικά επίπεδα με την χορήγηση σιδήρου. Επιπροσθέτως, η έλλειψη σιδήρου συσχετίζεται με μειωμένες σωματικές επιδόσεις των αθλητών καθώς και των γυναικών που αποτελούν προσωπικό του στρατού.

#### Εγκυμοσύνη:

Η έλλειψη του σιδήρου στις γυναίκες της αναπαραγωγικής ηλικίας μπορεί να συμβάλλει στη μητρική νοσηρότητα, εξαιτίας της αύξησης της επιδεκτικότητάς τους σε μολύνσεις με σοβαρότερα συμπτώματα. Στην πραγματικότητα, το 40% όλων των περιγεννητικών μητρικών θανάτων συνδέεται με την αναιμία. Παρ' όλα αυτά, στο έμβρυο παρέχεται μία σχετική προστασία από την έλλειψη σιδήρου, χάρις στη ρυθμιστική λειτουργία των πρωτεϊνών μεταφοράς σιδήρου του πλακούντα. Ταυτόχρονα, ωστόσο, ενισχύεται ο κίνδυνος εξάντλησης των αποθεμάτων σιδήρου της μητέρας καθώς και ο κίνδυνος το νεογέννητο να υποφέρει από ανεπάρκεια σιδήρου κατά τους τρεις πρώτους μήνες της ζωής του. Τα βρέφη των μητέρων με έλλειψη σιδήρου έχουν ανάγκη από περισσότερο σίδηρο στην πρώιμη ηλικία από εκείνον που τους παρέχεται μέσω του γάλακτος θηλασμού. Εκτός αυτού, φαίνεται να υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ της μητρικής έλλειψης σιδήρου και του πρόωρου τοκετού. Εν κατακλείδι, αν η έλλειψη σιδήρου δεν διορθωθεί κατά την εγκυμοσύνη, η μητέρα

και το βρέφος είναι καταδικασμένοι να υποφέρουν όλες τις προαναφερθείσες συνέπειες (Ezcaray, 2014).

### 2.1.2. ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ

Ο όρος βιοδιαθεσιμότητα των συστατικών των τροφίμων προέκυψε από το φαινόμενο της εμφάνισης, στο πλάσμα, των από του στόματος χορηγούμενων φαρμάκων που χρησιμοποιούνται στη φαρμακολογία. Στην περίπτωση της βιοδιαθεσιμότητας των ανόργανων ουσιών και συγκεκριμένα του σιδήρου, η βιοδιαθεσιμότητα ήταν αρχικά συνώνυμη με την απορρόφηση και προσδιορίστηκε με *in vitro* διαλυτότητα. Όσο πιο διαλυτή είναι η ένωση σιδήρου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανή απορρόφησή της και έτσι η βιοδιαθεσιμότητα. Αυτή η προσέγγιση διαλυτότητας σχετίζεται με τον ορισμό της διαθεσιμότητας σιδήρου ή της διαλυτότητας, εφόσον η διαδικασία πέψης προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας ημιπερατή μεμβράνη και μετριέται η μεταφορά μέσω αυτής.

Παράλληλα με την ανάπτυξη νέων τεχνικών, είτε *in vitro* είτε *in vivo*, αναπτύχθηκε η έννοια της βιοδιαθεσιμότητας. Ως εκ τούτου, η βιοδιαθεσιμότητα σιδήρου ορίζεται σήμερα ως η αναλογία του προσλαμβανόμενου σιδήρου που απορροφάται από το έντερο και χρησιμοποιείται μέσω κανονικών μεταβολικών οδών ή αποθηκεύεται. Εκφράζεται ως το ποσοστό της πρόσληψης και είναι γνωστό ότι επηρεάζεται από τους παράγοντες της διατροφής και του ξενιστή. Αυτή η ευρύτερη προσέγγιση της βιοδιαθεσιμότητας σιδήρου περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα: απελευθέρωση από τη μήτρα του, απορρόφηση στο σύστημα κυκλοφορίας, διανομή στους ιστούς, μεταβολική χρήση ή αποθήκευση στο σώμα (Blanco-rojo & Vaquero, 2019).

Ο αιματικός σίδηρος παρουσιάζει υψηλά επίπεδα βιοδιαθεσιμότητας (15% - 35%) και οι διατροφικοί παράγοντες έχουν μικρή επίδραση στην απορρόφησή του, ενώ η απορρόφηση μη αιματικού σιδήρου είναι πολύ χαμηλότερη (2% - 20%) και επηρεάζεται έντονα από την παρουσία άλλων συστατικών τροφίμων. Η ποσότητα, όμως, του μη αιματικού σιδήρου στη διατροφή είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη του αιματικού σιδήρου στα περισσότερα γεύματα. Έτσι, παρά τη χαμηλότερη βιοδιαθεσιμότητά του, ο μη αιματικός σίδηρος συμβάλλει περισσότερο στη θρέψη σε σχέση με τον αιματικό σίδηρο (Abbaspour et al., 2014).



### 2.1.2.1. ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ

Οι πρωταρχικές πηγές αιματικού σιδήρου είναι η αιμοσφαιρίνη και η μυοσφαιρίνη από την κατανάλωση κρέατος, πουλερικών και ψαριών, ενώ ο μη αιματικός σίδηρος προσλαμβάνεται από δημητριακά, όσπρια, φρούτα και λαχανικά. Οι ενισχυτές της απορρόφησης του σιδήρου είναι το ασκορβικό οξύ και ο μυϊκός ιστός ο οποίος έχει την ικανότητα να ανάγει τον τρισθενή σίδηρο σε δισθενή και να τον συνδέει σε διαλυτά σύμπλοκα τα οποία είναι διαθέσιμα για απορρόφηση.

Η απορρόφηση του σιδήρου επηρεάζεται από έναν αριθμό διατροφικών παραγόντων. Το ασκορβικό οξύ και το κιτρικό άλας αυξάνουν εν μέρει την πρόσληψη σιδήρου, δρώντας ως αδύναμοι χηλικοί παράγοντες για να βοηθήσουν στη διαλυτοποίηση του μετάλλου στο δωδεκαδάκτυλο. Οι χηλικοί παράγοντες είναι εξειδικευμένα μόρια τα οποία δεσμεύουν τα μέταλλα με χαλαρούς δεσμούς σχηματίζοντας ενώσεις οι οποίες ουσιαστικά προστατεύουν το μέταλλο από εξωτερικές επιρροές. Συνήθως είναι οργανικά μόρια. Ο σίδηρος μεταφέρεται εύκολα μέσω αυτών των ενώσεων στα εσωτερικά κύτταρα των βλεννογόνων. Έχει αποδειχθεί από ερευνητές ότι το φυσικό ή προστιθέμενο ασκορβικό οξύ επιδρά ενισχυτικά στην απορρόφηση του σιδήρου. Η ενισχυτική αυτή επίδραση οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ικανότητά του να ανάγει τον τρισθενή σε δισθενή σίδηρο. Το ασκορβικό οξύ μπορεί να υπερνικήσει την αρνητική επίδραση στην απορρόφηση σιδήρου όλων των αναστολέων, στους οποίους συμπεριλαμβάνονται το φυτικό, οι πολυφαινόλες, το ασβέστιο και οι πρωτεΐνες στα γαλακτοκομικά προϊόντα, αυξάνοντας την απορρόφηση τόσο του φυσικού σιδήρου όσο και του προστιθέμενου. Στα φρούτα και τα λαχανικά, η ενισχυτική επίδραση του ασκορβικού οξέος συχνά ακυρώνεται από την ανασταλτική επίδραση των πολυφαινολών. Το ασκορβικό οξύ είναι ο μόνος ενισχυτής απορρόφησης στις χορτοφαγικές δίαιτες. Έτσι, η απορρόφηση σιδήρου μέσω των χορτοφαγικών και των βίγκαν γευμάτων μπορούν να βελτιστοποιηθούν καλύτερα με την προσθήκη λαχανικών που περιέχουν ασκορβικό οξύ. Το μαγείρεμα, η βιομηχανική επεξεργασία και η αποθήκευση αποικοδομούν το ασκορβικό οξύ και απομακρύνουν την ενισχυτική του επίδραση στην απορρόφηση του σιδήρου (Abbaspour et al., 2014).

Η ενισχυτική επίδραση του κρέατος, των ψαριών ή των πουλερικών στην απορρόφηση σιδήρου έχει αποδειχθεί, αν και ο ακριβής μηχανισμός της δράσης διερευνάται ακόμα. Μία ποσότητα 30 g μυϊκού ιστού θεωρείται ισοδύναμη με 25 mg ασκορβικού οξέος. Η προσθήκη κοτόπουλου, βοδιού ή ψαριών σε ένα γεύμα αυξάνει την απορρόφηση μη αιματικού σιδήρου 2-3 φορές χωρίς να επηρεάζεται από άλλα τρόφιμα. Στα βρέφη, η απορρόφηση του μη

αιματικού σιδήρου αυξάνεται με την προσθήκη 25 g άπαχου βοδινού κρέατος σε έναν πουρέ λαχανικών των 80 g. Όπως και με το ασκορβικό οξύ, ήταν δύσκολο να αποδειχθεί η ενισχυτική επίδραση του κρέατος σε πολλαπλά γεύματα και μελέτες πλήρους διατροφής. Έρευνες αναφέρουν ότι υπάρχει μία μικρή βελτίωση στην απορρόφηση του σιδήρου, της τάξης του 35%, όταν σε μία διαίτα των 5 ημερών προστίθενται ημερησίως 300 g μυϊκού ιστού. Σε μία παρόμοια μελέτη διάρκειας 5 ημερών, αποδείχθηκε ότι 60 g χοιρινού κρέατος που προστέθηκαν σε μία χορτοφαγική διατροφή αύξησαν την απορρόφηση σιδήρου κατά 50%. Η θερμοκρασία μαγειρέματος δεν επηρεάζει την ενισχυτική δράση του ζωικού ιστού, αν και μπορεί ο αιματικός σίδηρος να υποβαθμιστεί σε μη αιματικό, επηρεάζοντας πιθανώς την απορρόφηση του σιδήρου (Abbaspour et al., 2014; Blanco-rojo & Vaquero, 2019).

#### 2.1.2.2. ΑΝΑΣΤΟΛΗ ΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ

Οι κύριοι αναστολείς της απορρόφησης σιδήρου είναι το φυτικό οξύ, οι πολυφαινόλες, το ασβέστιο και τα πεπτιδία από μερικώς αφομοιωμένες πρωτεΐνες.

Στις δίαιτες οι οποίες είναι βασισμένες σε φυτικές τροφές, ο φυτικός εστέρας (εξα-φωσφορικός μυο-ινοσιτόλης) είναι ο κύριος αναστολέας της απορρόφησης σιδήρου. Η αρνητική επίδρασή του στην απορρόφηση του σιδήρου έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται από τη δόση και ξεκινά σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις, 2-10 mg ανά γεύμα. Η γραμμομοριακή αναλογία φυτικού προς σίδηρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της επίδρασης στην απορρόφηση. Η αναλογία θα πρέπει να είναι 1 : 1 ή κατά προτίμηση 0,4 : 1, ώστε να βελτιωθεί σημαντικά η απορρόφηση σιδήρου σε απλά δημητριακά ή λαχανικά που δεν περιέχουν ενισχυτές απορρόφησης σιδήρου ή 6 : 1 σε σύνθετα γεύματα με ορισμένα λαχανικά που περιέχουν ασκορβικό οξύ και κρέας ως ενισχυτικά.

Οι πολυφαινόλες εμφανίζονται σε διάφορες ποσότητες σε φυτικά τρόφιμα και ποτά, όπως λαχανικά, φρούτα, μερικά δημητριακά και όσπρια, τσάι, καφέ και κρασί. Η ανασταλτική επίδραση των πολυφαινολών στην απορρόφηση σιδήρου έχει αποδειχθεί με το μαύρο τσάι και σε μικρότερο βαθμό με το τσάι βοτάνων. Στα δημητριακά και τα όσπρια, οι πολυφαινόλες επιβαρύνουν την ανασταλτική δράση του φυτικού, όπως αποδείχθηκε σε μία μελέτη που συγκρίνει υψηλό και χαμηλό σόργο πολυφαινόλης.

Το ασβέστιο έχει αποδειχθεί ότι έχει αρνητική επίδραση στην απορρόφηση του μη αιματικού και του αιματικού σιδήρου, γεγονός που το διαφοροποιεί από τους άλλους αναστολείς που επηρεάζουν μόνο την απορρόφηση του μη αιματικού σιδήρου. Τα εξαρτώμενα από τη δόση

ανασταλτικά αποτελέσματα αποδείχθηκαν σε δόσεις των 75-300 mg, όταν προστέθηκε ασβέστιο σε ρολά ψωμιού και σε δόσεις 165 mg ασβεστίου από γαλακτοκομικά προϊόντα. Οι μελέτες ενός γεύματος φαίνεται να παρουσιάζουν αρνητικές επιδράσεις του ασβεστίου στην απορρόφηση σιδήρου, ενώ οι μελέτες πολλαπλών γευμάτων, με μεγάλη ποικιλία τροφών και διάφορες συγκεντρώσεις άλλων αναστολέων και ενισχυτών, δείχνουν ότι το ασβέστιο έχει περιορισμένη μόνο επίδραση στην απορρόφηση σιδήρου.

Οι ζωικές πρωτεΐνες όπως οι πρωτεΐνες του γάλακτος, οι πρωτεΐνες των αυγών και η αλβουμίνη έχει αποδειχθεί ότι αναστέλλουν την απορρόφηση σιδήρου. Τα δύο μείζονα κλάσματα πρωτεΐνης γάλακτος βοοειδών, η καζεΐνη και ο ορός γάλακτος και το ασπράδι αυγού αποδείχθηκε ότι αναστέλλουν την απορρόφηση σιδήρου στους ανθρώπους. Οι πρωτεΐνες από σόγια μειώνουν επίσης την απορρόφηση σιδήρου (Abbaspour et al., 2014).

### 2.1.3. ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΣΙΔΗΡΟΥ

Οι βασικές στρατηγικές για τη διόρθωση της ανεπάρκειας σιδήρου είναι τέσσερις και μπορούν να εφαρμοστούν είτε μόνες είτε σε συνδυασμό:

- Τροποποίηση της διατροφής, με σκοπό τη βελτίωση της πρόσληψης σιδήρου και της βιοδιαθεσιμότητας
- Συμπληρώματα σιδήρου (παροχή σιδήρου, συνήθως σε υψηλότερες δόσεις, χωρίς τροφή)
- Εμπλουτισμός των τροφίμων με σίδηρο
- Μία νέα προσέγγιση βιοεμπλουτισμού

Ωστόσο, υπάρχουν κάποιες δυσκολίες στην εφαρμογή ορισμένων από αυτές τις στρατηγικές που έχουν να κάνουν με τον σίδηρο (Abbaspour et al., 2014).

#### 2.1.3.1. ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΣΙΔΗΡΟ

Ο εμπλουτισμός των τροφίμων με σίδηρο είναι πιο δύσκολος από τον εμπλουτισμό με θρεπτικά συστατικά, όπως ο ψευδάργυρος σε αλεύρι, το ιώδιο σε αλάτι και η βιταμίνη Α στο μαγειρικό έλαιο. Οι πιο βιοδιαθέσιμες ενώσεις σιδήρου είναι διαλυτές στο νερό ή σε αραιό οξύ, αλλά συχνά αντιδρούν με άλλα συστατικά τροφίμων και προκαλούνται αλλαγές στο άρωμα, στο χρώμα ή οξειδωση λίπους. Έτσι, οι λιγότερο διαλυτές μορφές σιδήρου, αν και είναι λιγότερο καλά απορροφούμενες, επιλέγονται συχνά για τον εμπλουτισμό, με σκοπό την

αποφυγή ανεπιθύμητων αισθητικών αλλαγών. Ο εμπλουτισμός γίνεται συνήθως με πολύ χαμηλότερες δόσεις σιδήρου σε σχέση με τα συμπληρώματα.

#### *2.1.3.1.1. ΠΡΟΣΘΕΤΑ – ΕΝΙΣΧΥΤΙΚΑ ΣΙΔΗΡΟΥ*

Ο σίδηρος είναι το πιο δύσκολα προστιθέμενο μικροθρεπτικό συστατικό για την παραγωγή εμπλουτισμένων τροφίμων. Έχουν δοκιμαστεί πολυάριθμες ενώσεις σιδήρου και έχουν ενσωματωθεί σε διαφορετικές διατροφικές μήτρες με σκοπό την παραγωγή τροφίμων εμπλουτισμένων με σίδηρο σύμφωνα με τις ανάγκες του πληθυσμού-στόχου. Τα κριτήρια επιλογής του κατάλληλου ενισχυτικού είναι η διαλυτότητά του, το ποσοστό απορρόφησής του από τον οργανισμό, η σταθερότητά του, το κόστος του, και η επίδρασή του στα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά του τροφίμου στο οποίο προστίθεται. Οι ενώσεις σιδήρου που συνιστώνται για τον εμπλουτισμό των τροφίμων από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (WHO), περιλαμβάνουν το θειικό σίδηρο, το φουμαρικό σίδηρο, τον πυροφωσφορικό σίδηρο και τη σκόνη ηλεκτρολυτικού σιδήρου. Ο θειικός και ο φουμαρικός σίδηρος είναι κατάλληλοι για το εξευγενισμένο αλεύρι σίτου με χαμηλά επίπεδα αναστολέων σιδήρου. Ο στοιχειακός σίδηρος, παρά το γεγονός ότι είναι πολύ συμβατό με τα περισσότερα τρόφιμα, έχει πολύ χαμηλή απορρόφηση και επομένως δεν είναι χρήσιμο ακόμη και σε υψηλά επίπεδα εμπλουτισμού. Το αλεύρι σίτου είναι το συνηθέστερο εμπλουτισμένο με σίδηρο τρόφιμο και συνήθως εμπλουτίζεται με σκόνες στοιχειακού σιδήρου που δεν συνιστώνται από τον WHO. Εξαιρεση αποτελεί ο ηλεκτρολυτικός σίδηρος, ο οποίος έχει την καλύτερη απορρόφηση και χρησιμοποιείται ευρέως σε δημητριακά για βρέφη (Abbaspour et al., 2014; Hurrell, 2002).

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι ο θειικός σίδηρος χρησιμοποιείται ως άλας αναφοράς στις μελέτες βιοδιαθεσιμότητας. Στα πλεονεκτήματά αυτής της ένωσης συμπεριλαμβάνεται η χαμηλή της τιμή και η αποτελεσματικότητα όσον αφορά την απορρόφηση. Τα βασικά μειονεκτήματά της είναι η έλλειψη σταθερότητας, η οξειδωσή της ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και έκθεσης στο οξυγόνο και οι συνεπαγόμενες οργανοληπτικές αλλαγές που προκαλούνται στα τρόφιμα. Η οξειδωση μπορεί να μεταβάλει άλλα συστατικά του τροφίμου και να τροποποιήσει το χρώμα του, με αποτέλεσμα τη χαμηλότερη ποιότητα του προϊόντος, τις δυσμενείς αισθητικές ιδιότητες και κατά συνέπεια τη μικρή αποδοχή.

Η τεχνολογική πρόκληση είναι η επίτευξη μίας μορφής σιδήρου, η οποία όταν προστεθεί σε επαρκή ποσότητα, να παρέχει την απαραίτητη βιοδιαθεσιμότητα για τη βελτίωση της κατάστασης του σιδήρου χωρίς να απορρίπτεται λόγω αισθητικών αλλαγών ή δυσμενών γαστρεντερικών επιδράσεων. Επιπλέον, αν και ο εμπλουτισμός του σιδήρου είναι μία

στρατηγική περισσότερο αποδοτική ως προς το κόστος σε σχέση τα συμπληρώματα, όπως ο φαρμακευτικός σίδηρος, για την πρόληψη της αναιμίας από έλλειψη σιδήρου σε πληθυσμούς που κινδυνεύουν, το κόστος μπορεί να μην είναι προσβάσιμο για ευάλωτα άτομα (Abbaspour et al., 2014; Blanco-rojo & Vaquero, 2019).

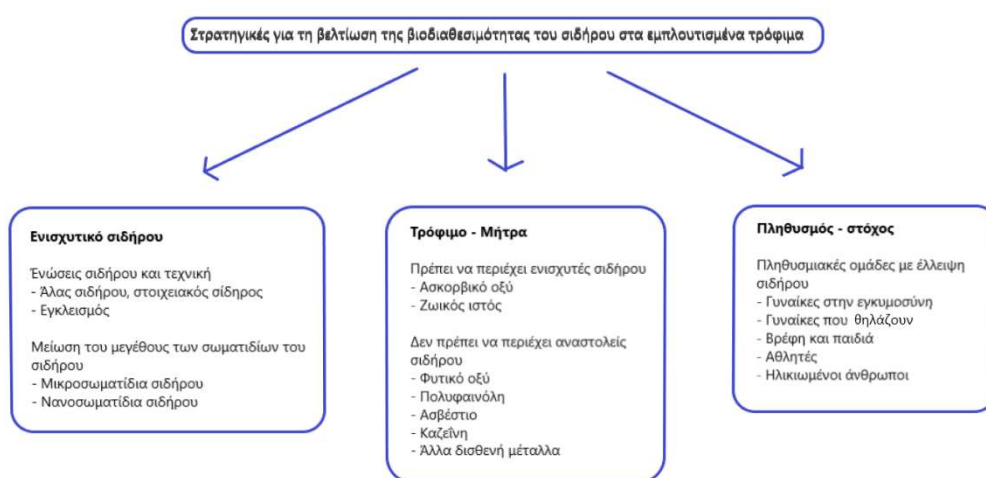
#### *2.1.3.1.2. ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΕΝΟ ΤΡΟΦΙΜΟ*

Αν και από τις αρχές της δεκαετίας του 1940 έχει προστεθεί σίδηρος σε διάφορα είδη διατροφής, η προσθήκη του σε συσκευασμένα προϊόντα τροφίμων εξακολουθεί να δημιουργεί τεχνικές προκλήσεις. Εξαιτίας της οξειδωσης και αναγωγής του σιδήρου, μπορεί να δημιουργηθεί χημική αστάθεια στη μήτρα των τροφίμων, προκαλώντας οργανοληπτικές αλλαγές που είναι συχνά μη αποδεκτές από τον καταναλωτή. Για να ξεπεραστεί αυτό το τεχνικό εμπόδιο, η βιομηχανία χρησιμοποιεί αδιάλυτο, ελάχιστα διαλυτό ή έντονα χηλικές ενώσεις σιδήρου, οι οποίες έχουν περιορισμένη χημική δράση. Ωστόσο, τόσο η διαλυτότητα όσο και η χημική διαθεσιμότητα είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική απορρόφηση (βιοδιαθεσιμότητα) του μη αιματικού σιδήρου. Οι προτιμώμενοι φορείς σιδήρου πρέπει να προσφέρουν ισορροπία μεταξύ αυτών των ιδιοτήτων. Αυτοί οι φορείς πρέπει να είναι προσαρμοσμένοι στο συγκεκριμένο προϊόν διατροφής. Για παράδειγμα, περισσότερο διαλυτές ενώσεις σιδήρου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σκούρα χρωματισμένα προϊόντα (όπως σάλτσες σόγιας και ψαριών), τα οποία επηρεάζονται λιγότερο από τις αλλαγές χρώματος, αλλά εξακολουθούν να είναι επιρρεπείς σε αλλοιώσεις της γεύσης. Ο σίδηρος μπορεί να αντιδράσει με άλλα συστατικά των τροφίμων (όπως ακόρεστα λιπαρά οξέα, πολυφαινόλες, βιταμίνες, κλπ.), επηρεάζοντας έτσι τη διάρκεια ζωής και / ή της θρεπτικής τους αξίας (Prentice et al., 2017).

Κατά το σχεδιασμό ενός εμπλουτισμένου τροφίμου με σίδηρο, είναι απαραίτητο να επιλεγεί ο κατάλληλος συνδυασμός ενισχυτικού/τροφίμου (ή μήτρας), λαμβάνοντας υπόψη τα άτομα τα οποία θα επωφεληθούν από την κατανάλωσή του. Από αυτήν την άποψη, τα παρασκευάσματα για βρέφη σε σκόνη αποτελούν ένα επιτυχημένο παράδειγμα. Γενικά, περιέχουν θειικό σίδηρο, ο οποίος είναι 100% διαλυτός, και ασκορβικό οξύ, το οποίο εγγυάται επαρκή βιοδιαθεσιμότητα σιδήρου. Τα δημητριακά είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο τρόφιμο για τον εμπλουτισμό του σιδήρου, καθώς αποτελούν βασικό τρόφιμο σε πολλούς πληθυσμούς σε ολόκληρο τον κόσμο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε στερεή μορφή για να παρασκευαστούν τα τρόφιμα με βάση τα δημητριακά εμπλουτισμένα

με σίδηρο. Με επιτυχία, επίσης, έχουν εμπλουτιστεί πολλά άλλα τρόφιμα, όπως τα γαλακτοκομικά προϊόντα, η ζάχαρη, η σκόνη κάρι, η σάλτσα σόγιας και τα μπισκότα.

Η σύνθεση του τροφίμου (μήτρας) αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διασφάλιση της απόδοσης του εμπλουτισμού, καθώς μπορεί να περιέχει είτε ενισχυτές είτε αναστολείς της απορρόφησης σιδήρου. Άρα, ανεξάρτητα από το πόσο καλό είναι το ενισχυτικό σιδήρου, η πρόσληψή του σε συνδυασμό με τους ενισχυτές και τους αναστολείς καθορίζει το τελικό αποτέλεσμα (Blanco-rojo & Vaquero, 2019).



Εικόνα 2.1 : Στρατηγικές για την βελτίωση της βιοδιαθεσιμότητας του σιδήρου στα εμπλουτισμένα τρόφιμα

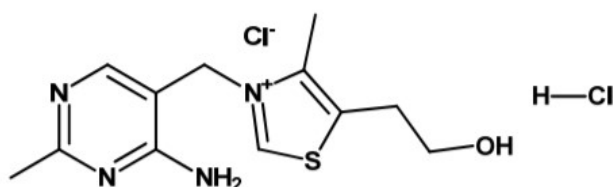
#### 2.1.3.1.3. ΝΟΜΟΘΕΣΙΑ

Οι κατασκευαστές εμπλουτισμένων τροφίμων συνήθως ενημερώνουν τους καταναλωτές για τη διατροφική ποιότητα των προϊόντων τους μέσω των ετικετών. Προκειμένου να εγγυηθούν τα σημαντικά οφέλη για τους καταναλωτές, οι ρυθμιστικοί φορείς και οι υγειονομικές αρχές καθορίζουν τις ελάχιστες ποσότητες μικροθρεπτικών συστατικών που πρέπει να επιτευχθούν πριν υπάρξουν ισχυρισμοί περί διατροφής και υγείας. Οι οργανισμοί WHO και FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) διευκρινίζουν ότι για να μπορεί να χαρακτηριστεί ένα τρόφιμο "εμπλουτισμένο με σίδηρο", πρέπει να περιέχει τουλάχιστον το 15% της Συνιστώμενης Ημερήσιας Δόσης (NRV) σιδήρου, ανά μερίδα προϊόντος. Ο χαρακτηρισμός ενός τροφίμου ως "πηγή σιδήρου" απαιτεί ότι στο προϊόν

περιέχεται τουλάχιστον το 15% της Συνιστώμενης Ημερήσιας Δόσης του σιδήρου (14 mg ανά ημέρα), δηλαδή 2,1 mg ανά μερίδα. Ο χαρακτηρισμός "πλούσιος σε σίδηρο" απαιτεί το προϊόν να περιέχει το 30% του NRV, δηλαδή 4,2 mg ανά μερίδα (Prentice et al., 2017).

## 2.2. ΘΕΙΑΜΙΝΗ

Η θειαμίνη (Σχήμα 1), γνωστή ως βιταμίνη B1 και ανευρίνη, ήταν η πρώτη βιταμίνη B που αναγνωρίστηκε. Είναι μία υδατοδιαλυτή βιταμίνη η οποία αποτελεί μία φυσική θρεπτική ουσία που υπάρχει σε πολλά τρόφιμα ή προστίθεται σε διάφορα προϊόντα διατροφής. Χημικά, η θειαμίνη αποτελείται από έναν υποκατεστημένο δακτύλιο πυριμιδίνης και έναν θειαζόλης, συνδεδεμένους με μία γέφυρα μεθυλενίου (Blumberg, 1999, p. 58; Mohammed & Ahmary, 2014).



Εικόνα 2.2 : Χημική δομή της θειαμίνης

Η θειαμίνη είναι ένα βασικό μικροθρεπτικό συστατικό, το οποίο παίρνει τέσσερις μορφές στο ανθρώπινο σώμα, ανάλογα με την κατάσταση φωσφορυλίωσής του: μη φωσφορυλιωμένο, μονο-, δι- και τρι- φωσφορικό. Εμπλέκεται, επίσης, σε πολλές αντιδράσεις οξειδωσης και αναγωγής του μεταβολισμού της γλυκόζης και των διακλαδισμένων αμινοξέων.

Όπως όλες οι βιταμίνες B, έτσι και η θειαμίνη είναι ένα πρωταρχικό δομικό στοιχείο για ορισμένους απαραίτητους ενζυμικούς συμπαράγοντες και εμπλέκεται τόσο στο μεταβολισμό των υδατανθράκων όσο και στη νευρική λειτουργία. Ο κύριος συμπαράγοντας που προέρχεται από τη θειαμίνη είναι η κο-καρβοξυλάση, ή αλλιώς πυροφωσφορική θειαμίνη, η οποία είναι απαραίτητη για τη λειτουργία πολλών αποκαρβοξυλασών και τρανσφερασών, όπως η πυροσταφυλική δεκαρβοξυλάση, η 2-οξο-γλουταρική δεκαρβοξυλάση και η τρανσκετολάση. Στον κύκλο του Krebs, η θειαμίνη είναι απαραίτητη για την οξειδωτική αποκαρβοξυλίωση, η οποία συμβαίνει εντός των μιτοχονδρίων, για την παραγωγή τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP) (Allen et al., 2006, p. 68; Bates, 1997; Eshak & Arafa, 2018).

### 2.2.1 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗ ΥΓΕΙΑ

Όπως και οι περισσότερες βιταμίνες Β, η θειαμίνη φαίνεται να είναι μη τοξική, ακόμη και σε υψηλές δόσεις. Η θειαμίνη είναι παρούσα στο αίμα, κυρίως στα κόκκινα και τα λευκά αιμοσφαίρια. Ωστόσο, υπάρχουν περισσότερα διαθέσιμα δεδομένα, επί του παρόντος, όσον αφορά την δράση του ενζύμου τρανσκετολάση στα ερυθρά αιμοσφαίρια και το συντελεστή ενεργοποίησης. Ο συντελεστής ενεργοποίησης αντιπροσωπεύει το βαθμό υπερκορεσμού του συμπαράγοντα του αποενζύμου της τρανσκετολάσης που ενεργοποιείται εκ νέου με *in vitro* προσθήκη πυροφωσφορικής θειαμίνης. Παλαιότερες μελέτες για την κατάσταση της θειαμίνης έχουν χρησιμοποιήσει τις ουρικές απεκκρίσεις της θειαμίνης, η οποία αυξάνεται απότομα όταν οι ιστοί είναι κορεσμένοι, δηλαδή μόλις το νεφρικό όριο ξεπεραστεί.

Η θειαμίνη χρησιμοποιείται για την πρόληψη και τη θεραπεία της πολυνευρίτιδας, της νευραλγίας και άλλων ασθενειών. Προστίθεται επίσης σε ιατρικές δόσεις ή εμπλουτίζεται σε τρόφιμα και ποτά. Είναι απαραίτητη για το μεταβολισμό των υδατανθράκων και για τη διατήρηση της ουδέτερης δραστηριότητας. Μπορεί να προκύψει ανεπάρκεια σε θειαμίνη από δίαιτες στις οποίες η πρόσληψη θερμίδων είναι πολύ χαμηλή και οι οποίες είναι βασισμένες στο κατεργασμένο ρύζι ή τη σακχαρόζη. Η πλέον γνωστή ασθένεια που οφείλεται στην ανεπάρκεια θειαμίνης είναι η υγρή ή ξηρή ενδημική μορφή πολυνευρίτιδας, γνωστή ως *beri-beri* (Bates, 1997; Mohammed & Ahmary, 2014).

#### 2.2.1.1. ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΤΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Η θειαμίνη απορροφάται ταχέως από τη νήστιδα, το μεσαίο τμήμα του λεπτού εντέρου, και τον ειλέο, το τελικό τμήμα του λεπτού εντέρου, μέσω μίας ενεργής, μεσολαβούμενης από το φορέα και περιορισμένου ρυθμού διαδικασίας. Σε υψηλότερες συγκεντρώσεις, η πρόσληψη γίνεται με παθητική διάχυση. Ωστόσο, η κλινική σχέση της παθητικής διάχυσης είναι αμφισβητήσιμη.

Το έντερο εκτίθεται σε 2 πηγές θειαμίνης: μία διατροφική πηγή και μία βακτηριακή πηγή στην οποία η βιταμίνη παράγεται από τα φυσιολογικά εντερικά μικρόβια. Μετά την υδρόλυση των φωσφορυλιωμένων μορφών της θειαμίνης στον εντερικό σωλήνα, η ελεύθερη θειαμίνη εισέρχεται στα απορροφητικά κύτταρα μέσω ενός εξειδικευμένου μηχανισμού που δεν εξαρτάται από το νάτριο, αλλά από το pH και είναι ευαίσθητος στο άμυλο. Έχουν εντοπιστεί δύο εντερικοί μεταφορείς της θειαμίνης: ο ανθρώπινος μεταφορέας θειαμίνης-1 (hTHTTR-1, προϊόν των SLC19A2 μεταφορέων) και ο ανθρώπινος μεταφορέας θειαμίνης-2



(hTHTR-2, προϊόν SLC19A3). Τόσο το hTHTR-1 όσο και το hTHTR-2 εκφράζονται στο λεπτό και το παχύ έντερο. Ωστόσο, το hTHTR-1 εμφανίζει τη μέγιστη έκφρασή του στο ήπαρ, ακολουθούμενη από το στομάχι, το δωδεκαδάκτυλο, τη νήστιδα, το κόλον και τον ειλέο (τμήματα του λεπτού και του παχέος εντέρου).

Η διαδικασία απορρόφησης της εντερικής θειαμίνης φαίνεται να ρυθμίζεται μέσω ενός ενδοκυτταρικού διαύλου ασβεστίου / καλμοδουλίνης. Επίσης, η απορρόφηση της θειαμίνης ρυθμίζεται προσαρμοστικά από το επίπεδο της εξωκυτταρικής θειαμίνης. Στην πραγματικότητα, η ανεπάρκεια της θειαμίνης βρέθηκε ότι οδηγεί σε επαγωγή του εντερικού μεταφορέα πρόσληψης. Αυτό το αποτέλεσμα συσχετίστηκε με μία σημαντική επαγωγή στο επίπεδο έκφρασης της THTR-2 (αλλά όχι της THTR-1).

Επιπλέον, η χρόνια χρήση αλκοόλ οδηγεί σε έλλειψη θειαμίνης και σε αναστολή της απορρόφησης της εντερικής θειαμίνης. Αυτή η αναστολή συσχετίστηκε με μία αξιοσημείωτη μείωση στο επίπεδο έκφρασης της THTR-1 (αλλά όχι της THTR-2). Επιπροσθέτως, αποδείχθηκε ένας παρόμοιος μηχανισμός αναστολής στην πρόσληψη θειαμίνης στα νεφρά. Έτσι, ο χρόνιος αλκοολισμός φαίνεται να οδηγεί σε αναστολή της εντερικής απορρόφησης και στην επαναπορρόφηση από τα νεφρά, πράγμα που καταδεικνύει μία αρνητική επίδραση στην ισορροπία της θειαμίνης στο σώμα (Sriram, Manzanares, & Joseph, 2012).

#### 2.2.1.2. ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Είναι γνωστό ότι η ανεπάρκεια θειαμίνης, στην κλινική της μορφή, αποτελεί μία σημαντική απειλή της δημόσιας υγείας σε πολλά μέρη του κόσμου. Εμφανίζεται λόγω της ανεπαρκούς χορήγησης από το στόμα, της ανεπαρκούς παροχής θειαμίνης στην εντερική ή παρεντερική διατροφική θεραπεία, της μειωμένης γαστρεντερικής απορρόφησης λόγω ασθένειας ή χειρουργικής επέμβασης ή λόγω της αύξησης των μεταβολικών απαιτήσεων. Αυξημένες γαστρεντερικές ή νεφρικές απώλειες θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη. Συχνά, υπάρχουν πολλαπλοί παράγοντες, οι οποίοι προϋποθέτουν τον ασθενή για την έλλειψη θειαμίνης. Ασθενείς με ιστορικό αλκοολισμού, AIDS και κακοήθειες αποτελούν μία σημαντική ομάδα ασθενών στους οποίους θα πρέπει να υπάρχει η υποψία για ανεπάρκεια θειαμίνης. Αν και η έλλειψη θειαμίνης συχνά συνδέεται με την κατάχρηση αλκοόλ, αναγνωρίζεται ολοένα και περισσότερο ότι μπορεί να συμβεί σε ασθενείς χωρίς αυτό το ιστορικό. Η εγκυμοσύνη, ο υπερθυρεοειδισμός, η νεφρική ανεπάρκεια, οι συστηματικές λοιμώξεις, η προχωρημένη ηλικία, ο σακχαρώδης διαβήτης και οποιαδήποτε κρίσιμη ασθένεια είναι άλλοι σημαντικοί παράγοντες κινδύνου. Οι παχύσαρκοι ασθενείς, οι υποψήφιοι για βαριατρική επέμβαση και

οι ασθενείς μετά από βαριατρική επέμβαση έχουν δεδομένη την ανάπτυξη ανεπάρκειας θειαμίνης, ακόμη και αν λαμβάνονται συμπληρώματα πολυβιταμινών. Λόγω του μικρού χρόνου ημιζωής και των φτωχών αποθηκευτικών χώρων, απαιτείται συνεχής παροχή θειαμίνης για το βέλτιστο μεταβολισμό (Sriram et al., 2012).

Η σοβαρή μορφή της ανεπάρκειας θειαμίνης προκαλεί το beri-beri, μία ασθένεια που ήταν κάποτε συνηθισμένη μεταξύ των πληθυσμών με υψηλή πρόσληψη υδατανθράκων, ειδικά με τη μορφή λευκού ρυζιού (Allen et al., 2006, p. 68).

#### 2.2.1.2.1. ΕΝΔΗΜΙΚΗ ΠΟΛΥΝΕΥΡΙΤΙΔΑ (BERI-BERI)

Η ανεπάρκεια της θειαμίνης έχει έντονη εμφάνιση σε πολλές περιοχές της Ασίας. Η ενδημική πολυνευρίτιδα ή beri-beri, είναι μία χαρακτηριστική ασθένεια των πληθυσμών, των οποίων η διατροφή βασίζεται στο ρύζι, και συγκεκριμένα στο κατεργασμένο ρύζι. Αντίθετα, σε πληθυσμούς που καταναλώνουν ακατέργαστο ρύζι ή ρύζι που έχει υποστεί υγροθερμική επεξεργασία, η εμφάνιση του beri-beri είναι πιο σπάνια. Η αντικατάσταση της χειρωνακτικής επεξεργασίας του ρυζιού από μηχανές μύλωσης στις αγροτικές περιοχές έχουν επιδεινώσει το πρόβλημα. Το beri-beri έχει εξαλειφθεί σε μεγάλο βαθμό στις περισσότερες βιομηχανικές χώρες, ενώ τα κρούσματα αναφέρονται τακτικά σε περιοχές που υποφέρουν από κοινωνικές και οικονομικές κρίσεις που προκλήθηκαν από πόλεμο, λιμό και άλλες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης (Allen et al., 2006, p. 68; Juliano, 1993, pp. 33–34).

Κλινικές και πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι η ανάπτυξη και η εκδήλωση του beri-beri απαιτούν πρόσληψη θειαμίνης κάτω από 0,2 mg ανά 1000 kcal γεύματος. Μπορεί να υπάρχουν βιοχημικές ενδείξεις ακόμη και σε πρόσληψη 0,3 mg ανά 1000 kcal.

Με τα χρόνια, η beri-beri τείνει να εξαφανίζεται καθώς οι οικονομικές συνθήκες έχουν βελτιωθεί και υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία στη διατροφή. Αν και η επικράτηση των κλινικών περιπτώσεων εμφανών ασθενειών beri-beri σε ενήλικες έχει μειωθεί, σε πολλά μέρη παρατηρείται σποραδικά η beri-beri σε βρέφη τα οποία θηλάζουν. Για παράδειγμα, κάποιες αγρότισσες θηλάζουσες μητέρες της Ταϊλάνδης που τρέφονται μόνο με ρύζι και αλάτι μετά τον τοκετό και περιορίζουν τα θρεπτικά τρόφιμα στη διατροφή τους, είναι περισσότερο επιρρεπείς στην ανάπτυξη ανεπάρκειας θειαμίνης. Η χαμηλή συγκέντρωση θειαμίνης στο μητρικό γάλα προδιαθέτει το βρέφος να αναπτύξει beri-beri (Juliano, 1993, pp. 33–34).

#### 2.2.1.2.2. ΚΛΙΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΑΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Η κλινική εικόνα της ανεπάρκειας της θειαμίνης, συνήθως περιλαμβάνει προβλήματα στο καρδιαγγειακό σύστημα (υγρό beri-beri) και στο νευρικό σύστημα (ξηρό beri-beri). Η ασθένεια beri-beri είναι υγρή ή ξηρή ανάλογα με την ποσότητα του υγρού που συσσωρεύεται στο σώμα λόγω παραγόντων όπως η καρδιακή λειτουργία, οι αλλοιώσεις των νεφρών κλπ., παρόλο που η ακριβής αιτία για αυτό δεν εξηγήθηκε ποτέ επιτυχώς. Πολλές περιπτώσεις ανεπάρκειας θειαμίνης εμφανίζουν ένα μίγμα των δύο κύριων χαρακτηριστικών, την ανεπάρκεια θειαμίνης με καρδιοπάθεια και περιφερειακή νευροπάθεια.

Η ασθένεια εκδηλώνεται κυρίως με αλλαγές που αφορούν το νευρικό σύστημα, το καρδιαγγειακό σύστημα καθώς επίσης το γαστρεντερικό σωλήνα (World health Organization & United Nations High Comissioner for Refugees, 1999, p. 7).

##### Νευρολογικές εκδηλώσεις

Τα πιο εντυπωσιακά κλινικά συμπτώματα της ανεπάρκειας θειαμίνης σχετίζονται με το νευρικό σύστημα. Η πολυνευρίτιδα και η παράλυση των περιφερειακών νεύρων κυριαρχούν, ενώ αλλαγές εμφανίζονται στο κέντρο αισθήσεων και στο κινητικό σύστημα. Στο κέντρο αισθήσεων, η πρώτη που επηρεάζεται είναι η αίσθηση της αφής, στη συνέχεια εμφανίζεται πόνος και τελικά αυξάνεται η ευαισθησία στη θερμοκρασία. Στα συμπτώματα περιλαμβάνονται η απώλεια αίσθησης της δόνησης πάνω από το μεγάλο δάχτυλο του ποδιού και τον αστράγαλο και οι διαταραχές στην περιφερειακή αίσθηση όπως οι παραισθησία (μυρμηκίαση, κάψιμο, μούδιασμα) στα πόδια και τα δάχτυλα των ποδιών και η επιφανειακή υπερευαισθησία ξεκινώντας από τα κάτω άκρα, στη συνέχεια στα άκρα των δακτύλων και στην κάτω κοιλιακή χώρα, ενώ σταδιακά επεκτείνονται. Ορισμένα συμπτώματα μπορεί να είναι μόνιμα και μη αναστρέψιμα ακόμη και με τη χορήγηση θειαμίνης.

Η παράλυση των κινητικών νεύρων εμφανίζεται μετά τις διαταραχές των αισθήσεων. Και αυτό ξεκινά από τα κάτω άκρα, στη συνέχεια στα δάχτυλα, και ανεβαίνει προοδευτικά. Υπάρχει αυξανόμενη μυϊκή αδυναμία η οποία εύκολα διακρίνεται από την αδυναμία του ατόμου να ανέβει από τη θέση καθίσματος χωρίς βοήθεια, ενώ κατά την εξέλιξη της νόσου υπάρχει ατροφία των μυών των ποδιών. Επίσης, επηρεάζονται τα αντανακλαστικά των τενόντων και ιδιαίτερα των τενόντων των αστραγάλων και των γονάτων. Μπορεί ακόμη να αναπτυχθεί πόνος στους μύς της κνήμης και τελικά να προκληθεί ρήξη στα πόδια και στους καρπούς. Προηγμένες νευρολογικές αλλαγές μπορεί να οδηγήσουν σε μεγάλη δυσκολία στο βάδισμα ακόμη και σε πλήρη παράλυση.

Η κλασική τριάδα συμπτωμάτων της ανεπάρκειας θειαμίνης περιλαμβάνει οφθαλμικές ανωμαλίες (νυσταγμός, μερική ή πλήρης οφθαλμοπληγία, θηλώδεις ανωμαλίες, οφθαλμολογικές μεταβολές, οπτική νευροπάθεια), δυσκολία βάδισμα και αλλαγές της ψυχικής κατάστασης. Μπορεί να μην εμφανίζονται όλα τα συμπτώματα της τριάδας αυτής. Η αταξία του βαδίσματος και του κορμού οφείλεται σε αιθουσαία και παρεγκεφαλιδική εμπλοκή. Εμφανίζονται, επίσης, διάφορες εκδηλώσεις περιφερειακής νευροπάθειας. Στις πιο σπάνιες νευρολογικές εκδηλώσεις περιλαμβάνονται οι επιληπτικές κρίσεις, η μυοκλονία και η υπερτονία, η χορεία, η τετραπρίωση και η δυσφαγία. Έχουν επίσης αναφερθεί εμβοές και απώλεια ακοής.

Οι αλλαγές στην ψυχική κατάσταση και το κέντρο αισθήσεων παρατηρούνται πολύ συχνά σε ανθρώπους που πάσχουν από ανεπάρκεια θειαμίνης και περιλαμβάνουν απάθεια, αδυναμία συγκέντρωσης, χωρικό αποπροσανατολισμό, σύγχυση, ακόμη και παραλήρημα, ψύχωση ή κώμα. Η έλλειψη θειαμίνης θα πρέπει να υποπτεύεται σε κάθε ασθενή στη μονάδα εντατικής θεραπείας (ΜΕΘ), με ανεξήγητες αλλαγές στο κέντρο αισθήσεων ή με παρανοϊκό παραλήρημα.

Περίπου το 80% των ασθενών που επιβιώνουν από το ξηρό beri-beri, καταλήγουν με ψύχωση. Το λεγόμενο σύνδρομο Wernicke-Korsakoff είναι ένα σύνδρομο διαταραχής της μνήμης και περιλαμβάνει σοβαρή αμνησία και απώλεια πρόσφατης και λειτουργικής μνήμης, ενώ διατηρείται η μακρινή μνήμη ή η μνήμη αναφοράς. Ο ασθενής μπορεί να φαίνεται σε εγρήγορση, χωρίς διάσπαση προσοχής, με αξιοπρεπή κοινωνική συμπεριφορά και ικανότητα ανάπτυξης νέων δεξιοτήτων (Sriram et al., 2012; World health Organization & United Nations High Commissioner for Refugees, 1999, p. 7).

#### Καρδιαγγειακές εκδηλώσεις

Αν και το υγρό beri-beri έχει περιγραφεί πριν από δεκαετίες, η συσχέτιση μεταξύ της καρδιακής ανεπάρκειας και της έλλειψης θειαμίνης αναγνωρίζεται σήμερα ολοένα και περισσότερο. Η ανεπάρκεια της θειαμίνης πρέπει να υποπτευθεί και να αντιμετωπιστεί σε όλες τις περιπτώσεις ανεξήγητων καρδιακών ανεπαρκειών. Οι αλλαγές στο καρδιαγγειακό σύστημα μπορεί να είναι σοβαρές και εκτεταμένες. Συχνά συμπτώματα είναι η αύξηση των παλμών, η αδυναμία και η δύσπνοια. Κατά την αύξηση των παλμών, δηλαδή την ταχυκαρδία, μπορεί να υπάρχει μία αίσθηση καρδιακής συνείδησης ή πόνος πάνω από την καρδιά. Αυτά τα συμπτώματα μπορεί να εμφανιστούν πολύ νωρίς στην ασθένεια και οι ηλεκτροκαρδιογραφικές αλλαγές εμφανίζονται σε πολλές περιπτώσεις. Στην πιο σοβαρή ανεπάρκεια, η καρδιά διευρύνεται προς τα δεξιά και έτσι μπορεί να προκληθεί ζάλη και χαμηλή αρτηριακή πίεση. Έχουν επίσης παρατηρηθεί αλλαγές στον καρδιακό μυ και

συσσώρευση υγρού μεταξύ των μυϊκών ινών. Οι ασθενείς με σοβαρό beri-beri μπορεί να πεθάνουν ξαφνικά από ανακοπή ή μετά από άσκηση.

Πολλοί πιθανοί παράγοντες έχουν συσχετιστεί με έλλειψη θειαμίνης σε ασθενείς με καρδιακή ανεπάρκεια, μεταξύ των οποίων ο αλκοολισμός, η χρήση διουρητικών, ο υποσιτισμός και η προχωρημένη ηλικία. Σύμφωνα με αναλύσεις, η απώλεια της θειαμίνης μέσω των ούρων είναι ο σημαντικότερος προγνωστικός παράγοντας όσον αφορά την κατάσταση της θειαμίνης στους ασθενείς με καρδιακή ανεπάρκεια (Sriram et al., 2012; World health Organization & United Nations High Commissioner for Refugees, 1999, p. 7).

#### Γαστρεντερικές εκδηλώσεις:

Τα συμπτώματα φαίνεται να σχετίζονται κυρίως με την καθυστερημένη εκκένωση του στομάχου και τη διαστολή του παχέος εντέρου. Απώλεια της όρεξης (ανορεξία), ασαφείς κοιλιακές ενοχλήσεις και δυσκοιλιότητα είναι κάποιες κοινές εκδηλώσεις. Καθώς η νόσος εξελίσσεται, μπορεί να εμφανιστούν ναυτία και εμετός (World health Organization & United Nations High Commissioner for Refugees, 1999, p. 8).

### 2.2.2 Η ΘΕΙΑΜΙΝΗ ΣΤΗ ΔΙΑΤΡΟΦΗ

Η θειαμίνη είναι πρακτικά παρούσα στους ιστούς όλων των φυτών και των ζώων, αλλά κυρίως περιέχονται μόνο χαμηλές συγκεντρώσεις της. Στα φυτά, η θειαμίνη εμφανίζεται κυρίως ως ελεύθερη θειαμίνη, ενώ στα ζώα βρίσκεται σχεδόν εξ ολοκλήρου (95-98%) σε φωσφορυλιωμένες μορφές, με κυρίαρχη μορφή την πυροφωσφορική θειαμίνη. Η πλουσιότερη πηγή θειαμίνης είναι η μαγιά. Τα δημητριακά, ωστόσο, αποτελούν τη σημαντικότερη πηγή διατροφής της θειαμίνης στις περισσότερες δίαιτες του ανθρώπου. Για παράδειγμα, ακόμη και στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής και το Ηνωμένο Βασίλειο, τα δημητριακά συμβάλλουν περίπου κατά 50% στο σύνολο της πρόσληψης της θειαμίνης, ακολουθούμενη από προϊόντα κρέατος που παρέχουν το 21% της καθημερινής πρόσληψης θειαμίνης, και από τα λαχανικά, τα οποία παρέχουν το 18% της καθημερινής πρόσληψης της βιταμίνης.

Τα όσπρια περιέχουν περίπου 0,40-0,80 mg θειαμίνης/100 g. Οι φρέσκες πατάτες περιέχουν 0,10 mg θειαμίνης/100 g, αλλά δεδομένου ότι η περιεκτικότητά τους σε νερό είναι περίπου 80% αυτό ισοδυναμεί με 0,35-0,40 mg θειαμίνης/100 g ξηρής πατάτας. Το αγελαδινό γάλα περιέχει περίπου 0,04 mg θειαμίνης/100 g, αλλά καθώς αποτελείται από 87% νερό, θεωρείται μεταξύ των πιο πλούσιων σε θειαμίνη τρόφιμα σε βάση ξηρού βάρους. Η παστερίωση του

γάλακτος καταστρέφει το 10% περίπου της θειαμίνης. Το ανθρώπινο γάλα περιέχει κατά μέσο όρο τόση θειαμίνη όσο και το αγελαδινό γάλα.

Η θειαμίνη μπορεί να ληφθεί από διάφορα άλλα τρόφιμα όπως, το βόειο και το χοιρινό κρέας, οι σπόροι, οι ξηροί καρποί και οι ζύμες. Η υψηλή θερμοκρασία και το pH έχουν επίδραση επί της θειαμίνης. Επομένως, το μαγείρεμα, το ψήσιμο, η παστερίωση και η διατήρηση των τροφίμων μπορούν να υποβαθμίσουν την περιεχόμενη θειαμίνη. Επιπλέον, ο χρόνος ημιζωής της θειαμίνης στο σώμα είναι μεταξύ 1 και 3 εβδομάδων. Αυτοί οι παράγοντες μαζί εξηγούν τη σχετικά σύντομη περίοδο που απαιτείται για την εμφάνιση της ανεπάρκειας της θειαμίνης καθώς και την εμφάνιση των κλινικών συμπτωμάτων μετά από κατανάλωση μίας δίαιτας ανεπαρκούς σε θειαμίνη, η οποία είναι κατά προσέγγιση 3 εβδομάδες και 3 μήνες αντίστοιχα (Eshak & Arafa, 2018; World health Organization & United Nations High Commissioner for Refugees, 1999).

#### 2.2.2.1 Η ΘΕΙΑΜΙΝΗ ΣΤΟ ΡΥΖΙ

Η θειαμίνη είναι πολύ άνισα κατανεμημένη στον πυρήνα των κόκκων ρυζιού. Το στρώμα της αλευρόνης και το φύτρο είναι πολύ πιο πλούσια από το ενδοσπέρμιο. Ο νούκελλος (το λεπτό στρώμα μεταξύ του φύτρου και του ενδοσπερμίου), ο οποίος αποτελεί μόνο το 1,5% του βάρους ολόκληρου του πυρήνα, είναι το πλουσιότερο και συνήθως περιέχει το 50-60% της συνολικής θειαμίνης του πυρήνα.

Η μύλευση ουσιαστικά μειώνει την περιεκτικότητα του ρυζιού σε θειαμίνη. Σε ένα έντονα αλεσμένο άλευρο διατηρείται μόνο το 70% περίπου του κόκκου και η περιεκτικότητα σε θειαμίνη ενός τέτοιου αλεύρου είναι περίπου 0,13 mg ανά 100 g, σε σύγκριση με το αλεύρι κανονικής άλεσης (80-85% του κόκκου) το οποίο περιέχει 0,32 mg/100 g.

Το καστανό ρύζι έχει κάπως χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θειαμίνη, 0,33 mg/100 g, σε σχέση με το καλύτερο σιτάρι ολικής άλεσης. Σε ένα έντονα μυλευμένο λευκό ρύζι παραμένει μόνο περίπου 0,08 mg/100 g και αυτό μπορεί να μειωθεί κατά το ήμισυ μετά το πλύσιμο του ρυζιού πριν από το μαγείρεμα. Το ρύζι το οποίο έχει επεξεργαστεί χειρωνακτικά είναι σπάνια τόσο λευκό όσο το μυλευμένο ρύζι μηχανής και η περιεκτικότητά του σε θειαμίνη είναι 0,16 mg/100 g.

## 2.2.2.2 ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΣΛΗΨΗΣ ΤΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Οι συνιστώμενες ημερήσιες ποσότητες πρόσληψης θειαμίνης βασίζονται στα ακόλουθα:

- εκτίμηση των επιπτώσεων των διαφόρων επιπέδων της θειαμίνης από τη διατροφή στην εμφάνιση κλινικών σημάτων ανεπάρκειας
- ουρική απέκκριση της θειαμίνης
- δραστικότητα της τρανσκετολάσης των ερυθροκυττάρων.

Οι απαιτήσεις της θειαμίνης είναι στενά συνδεδεμένες με την πρόσληψη υδατανθράκων. Στις διατροφές με βάση το ρύζι, το 75% ή περισσότερο της ενέργειας παρέχεται από υδατάνθρακες. Οι ανάγκες σε θειαμίνη συνήθως εκφράζονται ως 1 mg ανά 1000 kcal ενέργειας από την πρόσληψη υδατανθράκων. Ωστόσο, το σφάλμα, όσον αφορά τη συσχέτιση της περιεκτικότητας της διατροφής σε θειαμίνη με το συνολικό ενεργειακό περιεχόμενο της διατροφής και όχι την ενέργεια που προέρχεται από τους υδατάνθρακες, είναι ασήμαντο.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τις συστάσεις πρόσληψης της θειαμίνης, αν και γενικώς υπάρχουν μεγάλες διαφορές στις προτεινόμενες δοσολογίες, ανάλογα με την κάθε περίπτωση. Η συνιστώμενη ημερήσια δόση θειαμίνης όσον αφορά τη στοματική ή εντερική χορήγηση είναι μόνο 1,1-1,2 mg. Τα παρεντερικά προϊόντα πολυβιταμινών συνήθως περιέχουν 3,0-3,5 mg. Οι εντερικές φόρμουλες περιέχουν 2,2-2,9 mg ανά 1500 kcal τροφής την ημέρα.

**Πίνακας 2.1 : Συνιστώμενη δοσολογία θειαμίνης**

Συνιστώμενη ημερήσια δόση	1,1 – 1,2 mg
Σύνηθες παρεντερικό πρόσθετο	3,0 – 3,5 mg
Σύνηθες εντερικό πρόσθετο	2,2 – 2,9 mg ανά 1500 kcal/d τροφής
Προτεινόμενο εύρος εντερικής διατροφικής θεραπείας	1,2 – 10 mg/ημέρα
Σε κίνδυνο για ανεπάρκεια θειαμίνης	100 mg, 3 φορές την ημέρα, παρεντερικά
Σε υπάρχουσα ανεπάρκεια θειαμίνης	200 mg, 3 φορές την ημέρα, παρεντερικά
Διατήρηση μετά από θεραπεία ανεπάρκειας	50 – 100 mg από το στόμα ημερησίως
Σε θεραπεία αντικατάστασης νεφρών	100 mg ημερησίως

Η οδηγία της Ευρωπαϊκής Κοινότητας για την εντερική διατροφή υποδηλώνει ως ελάχιστη ημερήσια δόση θειαμίνης τα 1,2 mg και ως μέγιστη δόση τα 10 mg. Η ακριβής απαίτηση της θειαμίνης στην περίπτωση κρίσιμης ασθένειας δεν είναι γνωστή, γεγονός που ισχύει για τα

περισσότερα μικροθρεπτικά συστατικά. Ωστόσο, πιστεύεται γενικά ότι οι απαιτήσεις θειαμίνης αυξάνονται αναλογικά με την κρισιμότητα της ασθένειας (Sriram et al., 2012; World health Organization & United Nations High Commissioner for Refugees, 1999).

#### ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΟΣΗ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΝΗΛΙΚΕΣ:

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO) δηλώνει ότι η συνιστώμενη πρόσληψη θειαμίνης για τους ενήλικες είναι 0,4 mg ανά 1000 kcal. Για έναν ενήλικα άνδρα που καταναλώνει 3200 kcal ημερησίως απαιτείται μία ημερήσια πρόσληψη 1,3 mg θειαμίνης, ενώ για μία ενήλικη γυναίκα που καταναλώνει κατά μέσο όρο 2300 kcal απαιτείται πρόσληψη 0.9 mg θειαμίνης ημερησίως. Σύμφωνα με το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας (NRC), επιτρέπεται μέχρι και 0,5 mg/1000 kcal για τους ενήλικες και επίσης συνιστούν η συνολική ημερήσια πρόσληψη να μην είναι μικρότερη από 1,0 mg ακόμα και για όσους καταναλώνουν λιγότερο από 2000 kcal ημερησίως.

#### ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΟΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΤΗΣ ΕΓΚΥΜΟΣΥΝΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΘΗΛΑΣΜΟΥ:

Με βάση μία πρόσθετη απαίτηση ενέργειας 300 kcal/ημέρα κατά τη διάρκεια της εγκυμοσύνης, συνιστάται επιπλέον 0,4 mg/ημέρα. Κατά τη διάρκεια του θηλασμού συνιστάται η χορήγηση επιπλέον 0,5 mg/ημέρα, λόγω της απώλειας θειαμίνης από το γάλα και της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας.

#### ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΟΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΒΡΕΦΗ:

Οι μελέτες σχετικά με την περιεκτικότητα σε θειαμίνη του ανθρώπινου γάλακτος δείχνουν ότι η ελάχιστη ημερήσια απαίτηση για την προστασία έναντι της ανεπάρκειας είναι περίπου 0,17 mg/ημέρα. Η εκτίμηση αυτή βασίζεται στην μέση συγκέντρωση 0,23 mg θειαμίνης/L μητρικού γάλακτος και σε μέση κατανάλωση 750 mL μητρικού γάλακτος καθημερινά από το βρέφος.

#### ΣΥΝΙΣΤΩΜΕΝΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΔΟΣΗ ΓΙΑ ΤΑ ΠΑΙΔΙΑ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΕΦΗΒΟΥΣ:

Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας (WHO), συνιστά την ποσότητα των 0,4 mg/1000 kcal για παιδιά και εφήβους, ενώ το Εθνικό Συμβούλιο Έρευνας [ΗΠΑ] συνιστά 0,5 mg/1000 kcal.



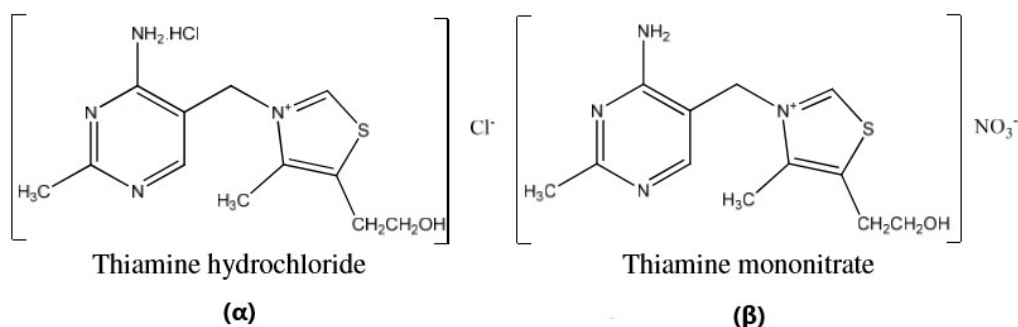
**Πίνακας 2.2 : Συνιστώμενη ημερήσια δόση θειαμίνης ανάλογα με την ηλικιακή ομάδα**

ΗΛΙΚΙΑΚΗ ΟΜΑΔΑ		ΘΕΙΑΜΙΝΗ (mg)
<b>ΠΑΙΔΙΑ</b>	< 1	0,3
	1 – 3	0,5
	4 – 6	0,7
	7 - 9	0,9
<b>ΕΦΗΒΑ ΑΓΟΡΙΑ</b>	10 – 12	1,0
	13 – 15	1,2
	16 – 19	1,2
<b>ΕΦΗΒΑ ΚΟΡΙΤΣΙΑ</b>	10 – 12	0,9
	13 – 15	1,0
	16 - 19	0,9
<b>ΕΝΗΛΙΚΑΣ ΑΝΔΡΑΣ</b>		1,2
<b>ΕΝΗΛΙΚΗ ΓΥΝΑΙΚΑ</b>		0,9
<b>ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΓΚΥΜΟΣΥΝΗ</b>		1,0
<b>ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΘΗΛΑΣΜΟ</b>		1,1

(World health Organization & United Nations High Comissioner for Refugees, 1999)

### 2.2.3 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΘΕΙΑΜΙΝΗ

Η θειαμίνη μπορεί να βρεθεί σε πολλά τρόφιμα, όπως σε σιτηρά ολικής άλεσης, προϊόντα κρέατος, λαχανικά, γάλα, όσπρια, φρούτα αλλά και σε εμπλουτισμένα τρόφιμα. Τα εξευγενισμένα και επεξεργασμένα τρόφιμα τα οποία δεν είναι εμπλουτισμένα είναι πολύ φτωχά σε θειαμίνη. Υπάρχουν δύο εμπορικά διαθέσιμες μορφές θειαμίνης, η θειαμίνη "mononitrate" και η θειαμίνη "hydrochloride". Η πρώτη είναι πιο σταθερή μορφή, αλλά η δεύτερη είναι περισσότερο διαλυτή στο νερό. Ο εμπλουτισμός των τροφίμων πραγματοποιείται, συνήθως, με θειαμίνη "mononitrate", αλλά και οι δύο μορφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πρότυπα για την ανάλυση της θειαμίνης (United States Agency for International Development (USAID), 2010).



*Εικόνα 2.3 : Χημική δομή (α) υδροχλωριδίου θειαμίνης και (β) μονονιτρικής θειαμίνης*

Υπάρχει μεγάλη ιστορία εμπειρίας όσον αφορά την προσθήκη βιταμινών Β στα δημητριακά (συμπεριλαμβανομένων των αλεύρων σίτου και αραβοσίτου) και στους κόκκους ρυζιού, τόσο σε βιομηχανοποιημένες όσο και σε αναπτυσσόμενες περιοχές. Τα οφέλη από την αποκατάσταση της θειαμίνης στα δημητριακά και τα άλευρα, από τα οποία το 65-80% αφαιρείται με τη διαδικασία της μύλευσης, έχουν αναγνωρισθεί εδώ και καιρό.

Πράγματι, ο εμπλουτισμός των αλεύρων και των σιτηρών έχει συμβάλει και εξακολουθεί να συμβάλλει σημαντικά στην επίτευξη της συνιστώμενης πρόσληψης των βιταμινών ακόμη και στις βιομηχανικές χώρες. Η ποσότητα θειαμίνης που προστίθεται στο αλεύρι σίτου κυμαίνεται από 1,5 έως 11 mg ανά kg. Καθώς η τοξικότητα δεν αποτελεί πρόβλημα, η Επιτροπή Τροφίμων και Διατροφής των Ηνωμένων Πολιτειών δεν καθορίζει κάποιο ανώτατο όριο εμπλουτισμού της θειαμίνης.

Οι βιταμίνες του συμπλέγματος Β προστίθενται απευθείας στο αλεύρι είτε ως μεμονωμένες θρεπτικές ουσίες, είτε ως ένα πρόμιγμα, το οποίο συνήθως περιέχει και σίδηρο, ή διαλύονται και αναμιγνύονται με μία μικρή ποσότητα αλεύρου στο μύλο προτού προστεθεί σε όλο το άλευρο. Στην περίπτωση του έτοιμο πρωινού δημητριακών, οι βιταμίνες Β μπορούν είτε να προστεθούν στο ξηρό μίγμα πριν από τις άλλες διεργασίες, είτε το διάλυμα ή αιώρημα των βιταμινών να ψεκάσθει στα δημητριακά αφού έχουν φρυγανιστεί. Η ριβοφλαβίνη έχει ισχυρό κίτρινο χρώμα και ελαφρώς πικρή γεύση, αλλά στα επίπεδα που προστίθεται συνήθως στο λευκό αλεύρι, οποιαδήποτε αλλαγή του χρώματος ή της γεύσης είναι μηδαμινή. Οι επικαλυμμένες μορφές των υδατοδιαλυτών βιταμινών, όπως η θειαμίνη και η βιταμίνη Β6, είναι διαθέσιμες εάν προκύψουν αλλαγές στη γεύση ή άλλα προβλήματα (Allen et al., 2006, p. 128).

### 2.3 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΡΥΖΙΟΥ

Το ρύζι καταναλώνεται ως ολόκληρος κόκκος, γεγονός το οποίο περιπλέκει τη διαδικασία εμπλουτισμού και απαιτεί εξειδικευμένη τεχνολογία, σε αντίθεση με τον εμπλουτισμό των αλεύρων, όπου το πρόμιγμα και το άλευρο είναι σε μορφή σκόνης και μπορούν εύκολα να αναμιχθούν. Πρέπει να εμπλουτίζεται με θρεπτικά που είναι διαθέσιμα για απορρόφηση από το σώμα, και που παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας, της αποθήκευσης, της μεταφοράς, της προετοιμασίας και των μεθόδων και πρακτικών μαγειρέματος, συμπεριλαμβανομένης της απόρριψης περίσσειας νερού.

Τα μικροθρεπτικά συστατικά στο μίγμα εμπλουτισμού δεν πρέπει να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ή με το ρύζι, καθώς αυτό μπορεί να επηρεάσει το χρώμα, τη γεύση και τη σταθερότητα, καθιστώντας το τρόφιμο μη αποδεκτό από τον καταναλωτή. Τα θρεπτικά πρέπει να παραμείνουν σταθερά κατά τη διάρκεια της προετοιμασίας όπως το πλύσιμο πριν από το μαγείρεμα, τη διαβροχή, το μαγείρεμα σε διαφορετικές ποσότητες νερού και για διαφορετικό χρόνο μαγειρέματος (Montgomery, Rosenzweig, & Smit, 2018).

Μία μορφή εγγενούς βελτίωσης των επιπέδων των μικροθρεπτικών συστατικών του ρυζιού, αντί του εμπλουτισμού, ήταν η εισαγωγή της υδροθερμικής επεξεργασίας. Πριν από την αφαίρεση του πίτουρου, οι κόκκοι ρυζιού διαβρέχονται ξηραίνονται. Κατά τη διάρκεια αυτών των βημάτων, το περιεχόμενο των βιταμινών B1, B6 και της νιασίνης στο ενδοσπέρμιο αυξάνεται τρεις φορές λόγω της μετατόπισης τους από το πίτουρο στο ενδοσπέρμιο. Στην περίπτωση υψηλής κατανάλωσης ρυζιού, η συνολική ημερήσια ανάγκη αυτών των βιταμινών μπορεί να καλυφθεί με αυτόν τον τρόπο. Ωστόσο, άλλα μικροθρεπτικά συστατικά, όπως ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος, δεν ενισχύονται στο λευκό ρύζι μετά από την υδροθερμική επεξεργασία. Γι' αυτό απαιτούνται άλλες τεχνολογίες για τον εμπλουτισμό του ρυζιού με θρεπτικά συστατικά (Steiger, Müller-Fischer, Cori, & Conde-Petit, 2014).

Οι τεχνολογίες αυτές περιγράφονται παρακάτω:

#### Μέθοδος ψεκασμού με σκόνη:

Κατά τη μέθοδο του ψεκασμού με σκόνη (dusting) τα μικροθρεπτικά συστατικά τα οποία βρίσκονται σε μορφή μικρών σωματιδίων, ψεκάζονται στον κόκκο του μυλευμένου ρυζιού. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ της επιφάνειας του ρυζιού και της επιφάνειας των θρεπτικών συστατικών. Ωστόσο, υπάρχει ο κίνδυνος του διαχωρισμού, όπως επίσης υπάρχει ο κίνδυνος των απωλειών με το πλύσιμο ή το μαγείρεμα σε περίσσεια νερού. Το μέγεθος αυτών των απωλειών είναι τέτοιο, ώστε στις Ηνωμένες Πολιτείες, είναι υποχρεωτική η εκτύπωση μίας προειδοποιητικής ετικέτας κατά την οποία επισημαίνεται ότι το ρύζι δεν πρέπει να ξεπλένεται πριν από το μαγείρεμα ή δεν πρέπει να μαγειρεύεται σε υπερβολική ποσότητα νερού. Στις αναπτυσσόμενες χώρες όπου γίνεται εντατική πλύση του ρυζιού πριν το μαγείρεμα, η μέθοδος του ψεκασμού δεν συστήνεται (Steiger et al., 2014).

#### Μέθοδος εμπόπτισης:

Αποτελεί μια από τις ευκολότερες και αποτελεσματικότερες μεθόδους εμπλουτισμού του ρυζιού. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, κατασκευάζεται ένα υδατικό διάλυμα που περιέχει τα θρεπτικά συστατικά και θερμαίνεται στους 90 °C. Οι κόκκοι του ρυζιού που πρόκειται να εμπλουτιστούν προστίθενται σε αυτό το διάλυμα και παραμένουν έως ότου το νερό με τα θρεπτικά απορροφηθεί. Στη συνέχεια απαιτείται ξήρανση των κόκκων ρυζιού με σκοπό την αφαίρεση της υγρασίας.

#### Μέθοδος ψεκασμού και επικάλυψης:

Μία από τις παλαιότερες μεθόδους για την αποφυγή των απωλειών μικροθρεπτικών συστατικών μέσω του πλυσίματος είναι η προσθήκη υψηλών συγκεντρώσεων μικροθρεπτικών συστατικών στους κόκκους του ρυζιού, η επικάλυψή τους με μία υδατοδιαλυτή βρώσιμη επίστρωση και στη συνέχεια η ανάμιξη των επικαλυμμένων κόκκων με κανονικούς κόκκους ρυζιού σε αναλογίες που κυμαίνονται από 1 : 50 έως 1 : 200. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το ρύζι τοποθετείται σε περιστροφικό κύλινδρο, μέσα στον οποίο ψεκάζεται κόκκος-κόκκος με το υδατικό διάλυμα των θρεπτικών συστατικών και μέσω του ίδιου κυλίνδρου πραγματοποιείται ξήρανση των κόκκων μέσω ρεύματος θερμού αέρα.

Έχουν δοκιμαστεί πολλά διαφορετικά επικαλυπτικά υλικά, συμπεριλαμβανομένων των κηρών, των οξέων, των κόμμεων (π.χ., άγαρ), του αμύλου και των κυτταρινικών πολυμερών. Οι απώλειες που προέρχονται από την πλήση του ρυζιού, σε γενικές γραμμές, κυμαίνονται από 20% έως 60%, ενώ όταν μαγειρεύεται με περίσσεια νερού χάνεται η πλειοψηφία των υδατοδιαλυτών θρεπτικών ουσιών (60-90%). Τα κύρια προβλήματα που εμφανίζουν οι μέθοδοι επικάλυψης σχετίζονται με το χρώμα, τη γεύση και την απώλεια μικροθρεπτικών συστατικών κατά την πλήση, καθώς και κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος (Steiger et al., 2014).

#### Μέθοδος εκβολής:

Κατά τη μέθοδο της εκβολής, παρασκευάζεται μία ζύμη από άλευρο ρυζιού και ένα πρόμιγμα βιταμινών ή μετάλλων και περνάει μέσα από μία περιοχή συγκεκριμένης θερμοκρασίας ή/και πίεσης, και κατόπιν μέσω μίας κατάλληλης μήτρας διαμορφώνονται κόκκοι σχήματος ρυζιού. Αυτοί οι κόκκοι αναμιγνύονται με κανονικό ρύζι κατά τη διάρκεια της μύλευσης (σε αναλογία 1 : 200 έως 1 : 50), με σκοπό την παραγωγή εμπλουτισμένου ρυζιού. Τα θρεπτικά

συστατικά τα οποία ενσωματώνονται στους εμπλουτισμένους κόκκους προστατεύονται αποτελεσματικά κατά το πλύσιμο και το μαγείρεμα. Κατά τη διαδικασία αυτή χρησιμοποιούνται θραύσματα ρυζιού χαμηλού κόστους ως πρώτη ύλη και οι κόκκοι διαμορφώνονται σύμφωνα με τις απαιτήσεις του πελάτη όσον αφορά το σχήμα, το χρώμα και το περιεχόμενο των θρεπτικών ουσιών, ώστε να ταιριάζει με το ρύζι με το οποίο θα αναμιχθούν.

Υπάρχουν δύο τύποι εκβολής, η θερμή και ψυχρή εκβολή. Κατά τη διαδικασία της θερμής εκβολής, η ζύμη διέρχεται μέσω ενός εκβολέα σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες (70 °C έως 110 °C), καταλήγοντας σε μία μορφή με παρόμοια συνοχή και διαφάνεια με αυτή του φυσικού ρυζιού. Κατά τη μέθοδο της ψυχρής εκβολής, εφαρμόζεται μία παρόμοια διαδικασία σε χαμηλότερη θερμοκρασία (κάτω από 70 °C), χρησιμοποιώντας συχνά μία πρέσα ζυμαρικών για την παραγωγή εμπλουτισμένων κόκκων ρυζιού οι οποίοι μοιάζουν με το φυσικό ρύζι, αλλά είναι λίγο πιο αδιαφανείς. Υπάρχουν επίσης υβριδικές μέθοδοι εκβολής κατά τις οποίες η ζύμη υποβάλλεται σε κάποια θερμική κατεργασία πριν από την εκβολή και στη συνέχεια περνάει μέσω ενός εκβολέα σε χαμηλή θερμοκρασία (κάτω από 70 °C).

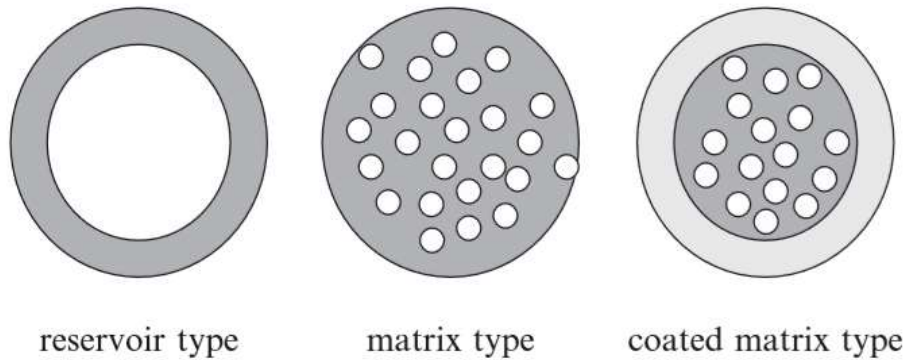
Σε έρευνα, αξιολογήθηκε η συγκράτηση του σιδήρου και της θειαμίνης σε ρύζι το οποίο εμπλουτίστηκε και με τις δύο μεθόδους, τη θερμή και τη ψυχρή εκβολή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι και στις δύο περιπτώσεις διατηρούσαν το 100% του σιδήρου και μεταξύ 83% και 63% της θειαμίνης (Muthayya et al., 2012).

### 3. ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΣ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ ΚΑΙ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ

---

Η διαδικασία του εγκλεισμού αναπτύχθηκε περίπου 50 χρόνια πριν. Ο εγκλεισμός μπορεί να οριστεί ως η διεργασία παγίδευσης ή αλλιώς ενθυλάκωσης μίας ουσίας εντός μίας άλλης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό σωματιδίων διαμέτρου, που κυμαίνεται από λίγα nm έως μερικά μm. Η ουσία που παγιδεύεται μπορεί να καλείται πυρήνας (core-material), ενεργός παράγων, εσωτερική φάση, γέμιση ή φορτίο. Η ουσία που εγκλείει μπορεί να ονομαστεί φορέας (carrier material), κέλυφος, περίβλημα, μεμβράνη, κάλυμμα, εξωτερική φάση ή μήτρα. Το υλικό των φορέων εγκλεισμού, που χρησιμοποιούνται σε προϊόντα και επεξεργασία τροφίμων, πρέπει να είναι κατάλληλο για βρώση και ικανό να λειτουργεί ως εμπόδιο ανάμεσα στο δραστικό παράγοντα και το περιβάλλον του.

Δύο είναι οι κύριοι τύποι δομών εγκλεισμού που μπορεί να διακριθούν, ο τύπος θαλάμου (reservoir type) και ο τύπος μήτρας (matrix type). Ο τύπος θαλάμου χαρακτηρίζεται από ένα κέλυφος γύρω από το ενεργό συστατικό. Αυτή η μορφή εγκλεισμού καλείται τύπος κάψουλας ή μονού πυρήνα (single-core, mono-core) ή πυρήνα-κελύφους. Η εφαρμογή πίεσης μπορεί να προκαλέσει θραύση των καψουλών του τύπου θαλάμου και συνεπώς απελευθέρωση των περιεχομένων τους. Βέβαια, είναι δυνατόν να προκύψουν και κάψουλες τύπου πολλαπλών πυρήνων (poly- or multiple-core), όπου σε ένα σωματίδιο συνυπάρχουν αρκετοί θάλαμοι αυτού του τύπου. Στον τύπο μήτρας το ενεργό συστατικό είναι αρκετά πιο διεσπαρμένο στο φορέα. Μπορεί να υφίσταται είτε στη μορφή σχετικά μικρών σταγονιδίων είτε διανεμημένο περισσότερο ομοιογενώς στη δομή εγκλεισμού. Σε αντίθεση με τον τύπο θαλάμου, τα ενεργά συστατικά στον τύπο μήτρας μπορούν γενικά να είναι παρόντα και στην εξωτερική επιφάνεια των δομών εγκλεισμού (εκτός φυσικά αν εφαρμοστεί γύρω τους επιπρόσθετο περίβλημα: coated-matrix type) (Zuidam & Shimon, 2010).



Εικόνα 3.1 : Δομές εγκλεισμού (Zuidam & Shimoni, 2010)

Οι δομές εγκλεισμού μπορούν επίσης να διαχωριστούν με βάση το μέγεθος των σωματιδίων τους, όπως για παράδειγμα νανοσωματίδια, μικροσωματίδια και μικροκάψουλες.

#### Οφέλη - Μειονεκτήματα εγκλεισμού

Τα πιθανά οφέλη του εγκλεισμού συστατικών στη βιομηχανία τροφίμων είναι τα εξής:

- Ευέλικτος χειρισμός του ενεργού παράγοντα (παραδείγματος χάριν μετατροπή μίας υγρής δραστικής ουσίας σε μορφή πούδρας, η οποία έχει ιδιότητες ελεύθερης ροής, απουσία σκόνης και πιο ουδέτερη οσμή).
- Ακινησία - παραμονή του δραστικού παράγοντα στα συστήματα επεξεργασίας τροφίμων.
- Βελτιωμένη σταθερότητα της δραστικής ουσίας στο τελικό προϊόν και κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του (παραδείγματος χάριν περιορισμός της εξάτμισης πτητικών δραστικών παραγόντων και/ή υποβιβασμός ή αντίδραση με άλλα συστατικά του τροφίμου όπως το οξυγόνο και το νερό).
- Βελτιωμένη ασφάλεια (παραδείγματος χάριν μείωση αναφλεξιμότητας πτητικών όπως αρωματικές ύλες, χειρισμός μη συμπυκνωμένων πτητικών ελαίων).
- Δημιουργία επιθυμητών οπτικών ιδιοτήτων και ιδιοτήτων υφής στο τρόφιμο.
- Κάλυψη πιθανής αρνητικής γεύσης του δραστικού παράγοντα.
- Προσαρμοσμένες ιδιότητες των δραστικών ουσιών (μέγεθος σωματιδίων, δομή, χρώμα, διαλυτότητα σε υδατική ή ελαιώδη φάση).
- Ελεγχόμενη απελευθέρωση της δραστικής ουσίας (σταδιακή απελευθέρωση ή κατόπιν κατάλληλου κινήτρου).

Αυτά τα πλεονεκτήματα θα πρέπει να υπερισχύουν των ακόλουθων πιθανών μειονεκτημάτων:

- Επιπρόσθετο κόστος.
- Αυξημένη πολυπλοκότητα της παραγωγικής διαδικασίας και / ή των γραμμών τροφοδοσίας.
- Ανειθύμητες παρατηρήσεις των καταναλωτών (οπτικές ή υφής) ως προς τις δομές εγκλεισμού στα προϊόντα τροφίμου.
- Προκλήσεις ως προς τη σταθερότητα των σωματιδίων εγκλεισμού κατά τη διάρκεια επεξεργασίας και αποθήκευσης του τελικού προϊόντος τροφίμου.

Λόγω αυτών των μειονεκτημάτων, ο εγκλεισμός δεν είναι γενικά απαραίτητο να αντιμετωπίζεται ως η πρώτη επιλογή κατά το σχεδιασμό νέων προϊόντων τροφίμων. Θεωρείται δόκιμη λύση κυρίως στην περίπτωση που άλλες, πιο απλοϊκές επιλογές εμπλουτισμού τροφίμων αποτυγχάνουν. Παρ' όλα αυτά, λόγω του ότι τα προϊόντα εγκλεισμού διευκολύνουν το σχηματισμό υγιεινότερων, γευστικότερων και ευκολότερων στην κατανάλωση τροφίμων, υπάρχουν αυξανόμενες απαιτήσεις για την ευρύτερη εισαγωγή του εγκλεισμού στη βιομηχανία τροφίμων τις τελευταίες δεκαετίες (Zuidam & Shimoni, 2010).

### 3.1 Ο ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Στη βιομηχανία τροφίμων, η διαδικασία του εγκλεισμού μπορεί να εφαρμοστεί για διάφορους λόγους. Ο εγκλεισμός είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη βελτίωση της χορήγησης βιοενεργών μορίων (π.χ. αντιοξειδωτικών, μεταλλικών στοιχείων, βιταμινών, φυτοστερολών, λουτεΐνης, λιπαρών οξέων, λυκοπενίου) και ζωντανών κυττάρων (π.χ. προβιοτικών) σε τρόφιμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, ο εγκλεισμός απευθύνεται σε μία τεχνολογία στην οποία τα βιοδραστικά συστατικά είναι εντελώς περιτυλιγμένα, καλυμμένα και προστατευμένα από ένα φυσικό φράγμα. Επίσης, ο εγκλεισμός έχει οριστεί ως μία τεχνολογία συσκευασίας στερεών, υγρών ή αερίων υλικών σε μικρές κάψουλες που απελευθερώνουν το περιεχόμενό τους σε ελεγχόμενους ρυθμούς για παρατεταμένες περιόδους και υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Τα παραγόμενα σωματίδια συνήθως έχουν διάμετρο λίγων nm έως μερικά χιλιοστά.

Ο εγκλεισμός αρχικά εισήχθη στον τομέα της βιοτεχνολογίας για να καταστήσει τις παραγωγικές διαδικασίες πιο αποτελεσματικές καθώς ο φορέας γύρω από τα κύτταρα επιτρέπει το γρήγορο και αποτελεσματικό διαχωρισμό των παραγωγικών κυττάρων και των



μεταβολιτών. Τέτοιες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν περίπου 60 χρόνια πριν, παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον για το φαρμακευτικό τομέα (ειδικά όσον αφορά τα φάρμακα και τα εμβόλια), αλλά έχουν επίσης σημασία και για τη βιομηχανία τροφίμων. Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία τροφίμων απαιτεί την προσθήκη λειτουργικών ενώσεων στα προϊόντα. Αυτές οι ενώσεις συνήθως είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες σε περιβαλλοντικές, επεξεργαστικές και / ή γαστρεντερικές καταστάσεις και ως εκ τούτου, ο εγκλεισμός έχει επιβάλει μία προσέγγιση για την αποτελεσματική προστασία αυτών. Οι λειτουργικές ενώσεις χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των ιδιοτήτων γεύσης, χρώματος, υφής ή συντήρησης. Περιλαμβάνονται επίσης βιοδραστικές ενώσεις με διάφορα πιθανά οφέλη για την υγεία.

Υπάρχει ένα πλήθος πιθανών οφελών των εγκλεισμένων συστατικών στη βιομηχανία τροφίμων. Ο εγκλεισμός στοχεύει στη διατήρηση της σταθερότητας των βιοδραστικών ενώσεων κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας και της αποθήκευσης και στην πρόληψη ανεπιθύμητων αλληλεπιδράσεων με τη μήτρα τροφίμων. Κυρίως, οι βιοδραστικές ενώσεις τροφίμων χαρακτηρίζονται από ταχεία απενεργοποίηση. Αυτές οι ενώσεις θα επωφεληθούν από μία διαδικασία εγκλεισμού, καθώς επιβραδύνουν τις διεργασίες αποικοδόμησης (π.χ. οξείδωση ή υδρόλυση) ή αποτρέπουν την αποδόμηση μέχρις ότου το προϊόν παραδοθεί στις επιθυμητές θέσεις. Έτσι, το βιοδραστικό συστατικό θα διατηρείται ως πλήρως λειτουργικό. Επίσης, η τεχνολογία αυτή μπορεί να προσφέρει εμπόδια μεταξύ των ευαίσθητων βιοδραστικών υλικών και του περιβάλλοντος και έτσι να επιτρέψει τη διαφοροποίηση της γεύσης και του αρώματος, να καλύψει την κακή γεύση ή τη μυρωδιά, να σταθεροποιήσει τα συστατικά τροφίμων ή να αυξήσει τη βιοδιαθεσιμότητά τους. Εκτός από τα παραπάνω, ο εγκλεισμός μπορεί να εφαρμοστεί για την τροποποίηση των φυσικών χαρακτηριστικών του αρχικού υλικού ώστε (α) να διευκολύνει το χειρισμό, (β) να βοηθήσει το διαχωρισμό των συστατικών του μίγματος που διαφορετικά θα αντιδρούσαν το ένα με το άλλο (γ) να υπάρχει κατάλληλη συγκέντρωση και ομοιόμορφη διασπορά ενός δραστικού παράγοντα (Gibbs, Kermasha, Alli, & Mulligan, 1999).

### 3.2 ΕΓΚΛΕΙΣΤΙΚΑ ΜΕΣΑ

Πολλές ουσίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικάλυψη ή τον εγκλεισμό συστατικών στερεής, υγρής ή αέριας μορφής, με διαφορετικές ιδιότητες. Ωστόσο, οι κανονισμοί για τα πρόσθετα τροφίμων είναι πιο αυστηροί από ότι, για παράδειγμα, στα φαρμακευτικά προϊόντα. Διάφορες ενώσεις, ευρέως αποδεκτές για τον εγκλεισμό φαρμάκων, δεν έχουν εγκριθεί για χρήση στη βιομηχανία τροφίμων, επειδή πολλές από αυτές τις ουσίες δεν έχουν

πιστοποιηθεί για εφαρμογή στα τρόφιμα ως υλικά “γενικά αναγνωρισμένα ως ασφαλή” (GRAS). Στην πραγματικότητα, ολόκληρη η διαδικασία παραγωγής τροφίμων θα πρέπει να σχεδιαστεί, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις ασφάλειας των κυβερνητικών υπηρεσιών όπως η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων (EFSA) ή η Υπηρεσία Τροφίμων και Φαρμάκων (FDA) στις ΗΠΑ (Nedovic, Kalusevic, Manojlovic, Levic, & Bugarski, 2011).

### 3.2.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΜΕΣΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ

Μεταξύ όλων των υλικών, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα για τον εγκλεισμό σε εφαρμογές τροφίμων είναι οι πολυσακχαρίτες. Το άμυλο και τα παράγωγά του - αμυλόζη, αμυλοπηκτίνη, δεξτρίνες, μαλτοδεξτρίνες, πολυδεξτρόζη, σιρόπια και κυτταρίνη και τα παράγωγά τους χρησιμοποιούνται συνήθως. Εκχυλίσματα φυτών και άλλα εκχυλίσματα, όπως αραβικό κόμμι, κόμμι τραγακάνθης, κόμμι καράγια, κόμμι mesquite, γαλακτομαννάνες, πηκτίνες και διαλυτά πολυσακχαρίδια σόγιας αποτελούν επίσης υλικά εγκλεισμού. Χρησιμοποιούνται, επιπλέον, θαλάσσια εκχυλίσματα όπως οι καρραγενάνες και το αλγινικό, καθώς και μικροβιακοί ή ζωικοί πολυσακχαρίτες όπως η δεξτράνη, η χιτοζάνη, η ξανθάνη και η ζελλάνη. Εκτός από τους φυσικούς και τροποποιημένους πολυσακχαρίτες, οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια είναι επίσης κατάλληλα υλικά για εγκλεισμό. Παραδείγματα των πιο συνηθισμένων πρωτεϊνών γάλακτος και ορού γάλακτος είναι η καζεΐνη, η ζελατίνη και η γλουτένη. Μεταξύ των λιπιδικών υλικών τα οποία είναι κατάλληλα για εφαρμογές τροφίμων υπάρχουν λιπαρά οξέα και λιπαρές αλκοόλες, κηροί (κερί μέλισσας, κηρός καρναούμπα, κηρός candellia), γλυκερίδια και φωσφολιπίδια, επίσης κατάλληλα για τέτοιες εφαρμογές. Εκτός από τα παραπάνω, χρησιμοποιούνται άλλα υλικά όπως PVP, παραφίνη, shellac, ανόργανα υλικά (Nedovic et al., 2011).

**Πίνακας 3.1 : Υλικά εγκλεισμού που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία τροφίμων (Zuidam & Shimoni, 2010)**

ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ	ΥΔΑΤΑΝΘΡΑΚΙΚΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ	ΠΡΩΤΕΪΝΕΣ	ΛΙΠΙΔΙΑ
<b>ΦΥΤΙΚΑ</b>	Άμυλο και παράγωγα αμύλου	Γλουτένη	Λιπαρά οξέα/Αλκοόλες
	Κυτταρίνη και παράγωγα κυτταρίνης		Γλυκερίδια
	Φυτικά εκχυλίσματα - Αραβικό κόμμα - Κόμμα καράγια - Γαλακτομαννάνη		Φωσφολιπίδια
	Πολυσακχαρίτες		Κήροι
<b>ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΕΚΧΥΛΙΣΜΑΤΑ</b>	Καραγεννάνη		
	Αλγινικό		
<b>ΖΩΙΚΟΙ ΠΟΛΥΣΑΚΧΑΡΙΤΕΣ</b>	Ξανθάνη	Καζεΐνη	Λιπαρά οξέα/Αλκοόλες
	Ζελλάνη	Ζελατίνη	Γλυκερίδια
	Δεξτράνη	Πρωτεΐνες ορού γάλακτος	Φωσφολιπίδια
	Χιτοζάνη		Κήροι

### 3.2.1.1 ΒΙΟ-ΥΛΙΚΑ ΩΣ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΗΤΡΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ

#### Πολυσακχαρίτες:

Οι πολυσακχαρίτες αποτελούνται από πολυμερή υδατανθρακικά μόρια, τα οποία συντίθενται από αρκετές μονάδες μονοσακχαριτών, συνδεδεμένες μεταξύ τους με γλυκοζιτικούς δεσμούς. Οι χημικές διαφορές της πολυμερούς αλυσίδας σχετικά με τον τύπο, τον αριθμό, την αλληλουχία και τη σύνδεση των μονοσακχαριτών επηρεάζουν τις μοριακές ιδιότητές τους, όπως την ικανότητα συγκράτησης νερού, τη διαλυτότητα, τη δυνατότητα πέψης, καθώς και τη δυνατότητα ζελατινοποίησης και γαλακτωματοποίησης.

Οι πολυσακχαρίτες συναντώνται συχνά στη φύση και μπορούν να ληφθούν από φυσικές πηγές ή από παραπροϊόντα της βιομηχανίας τροφίμων, ως επί το πλείστον μέσω τεχνικών επεξεργασίας χαμηλού κόστους. Αυτά τα πολυμερή παρουσιάζουν σημαντικές ιδιότητες όπως καλή σταθερότητα, μη τοξικότητα, ικανότητα βιοδιάσπασης και βιοπροσκολλησιμότητα, οι οποίες επιτρέπουν τη χρήση τους ως φορείς βιοδραστικών ουσιών. Η βιοπροσκολλησιμότητα έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς συμβάλλει στην αύξηση του χρόνου παραμονής του προϊόντος εγκλεισμού στο γαστρεντερικό σύστημα. Αυτό οφείλεται κυρίως στις εσωτερικές υδρόφιλες ομάδες (π.χ. υδροξύλια, καρβονυλομάδες και αμινομάδες)

των πολυσακχαριτών που επιτρέπουν το σχηματισμό μη ομοιοπολικών δεσμών με τους βιολογικούς ιστούς, συμβάλλοντας έτσι στη μεγιστοποίηση των επιπέδων του ρυθμού απορρόφησης των βιοδραστικών ουσιών που έχουν παγιδευσει.

Συνήθως οι πολυσακχαρίτες που δρουν ως φορείς εγκλεισμού ταξινομούνται σύμφωνα με τη βιολογική τους προέλευση:

- Φυτικής προέλευσης (π.χ., πηκτίνη, κόμμι γκουάρ, άμυλο και κυτταρίνη)
- Ζωικής προέλευσης (π.χ. χιτοζάνη)
- Θαλάσσιας προέλευσης (π.χ., αλγινικό άλας και καρραγενάνη)
- Μικροβιακής προέλευσης (π.χ., κόμμι δεξτράνης και ξανθάνης)

(Souza Simões et al., 2017)

### Πρωτεΐνες:

Οι πρωτεΐνες είναι βιολογικά πολυμερή τα οποία σχηματίζονται από μία αλληλουχία αμινοξέων που συνδέονται μεταξύ τους με πεπτιδικούς δεσμούς. Υπάρχουν 20 διαφορετικά αμινοξέα τα οποία κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τις ιδιότητες των πλευρικών τους ομάδων ως αλειφατικά, αρωματικά, φορτισμένα (θετικά ή αρνητικά) ή πολικά. Οι πρωτεΐνες οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά στη βιομηχανία τροφίμων έχουν συνήθως φυτική προέλευση (π.χ. σόγια και ζεϊνή) και ζωική προέλευση (π.χ. πρωτεΐνης καζεΐνης, αυγού και ορού γάλακτος) ή είναι υδρολύματα αυτών των πρωτεϊνών.

Ο χαρακτηρισμός των πρωτεϊνικών μορίων είναι υψίστης σημασίας, δεδομένου ότι η γνώση των χαρακτηριστικών τους, όπως η θερμοκρασία μετουσίωσης, το ισοηλεκτρικό σημείο και οι αντιδράσεις χημικής αποικοδόμησης, είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτιστοποίηση των συνθηκών των διεργασιών εγκλεισμού. Τα μόρια πρωτεϊνών αλληλεπιδρούν μεταξύ τους ή με άλλα μόρια μέσω δεσμών ηλεκτροστατικών, ομοιοπολικών, van der Waals, στερεοχημικών, υδροφοβικών και δισουλφιδικών.

Η δευτερεύουσα δομή των πρωτεϊνών (α-έλικες και β-φύλλα) μπορεί να οργανωθεί σε γειτονικά αμινοξέα των πρωτεϊνικών αλυσίδων και παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό, τη σταθερότητα και τη λειτουργικότητα των δομών που προκύπτουν. Η έκθεση των πλευρικών ομάδων των πρωτεϊνών στις περιβαλλοντικές συνθήκες καθορίζεται από τη διαμόρφωση της αλυσίδας των αμινοξέων, η οποία επηρεάζει τη σταθερότητα και την αντιδραστικότητα της πρωτεΐνης (Souza Simões et al., 2017).

### Λιπίδια:

Τα λιπίδια ανάλογα με τη φυσική τους κατάσταση σε θερμοκρασία δωματίου, όταν βρίσκονται σε στερεή μορφή αναφέρονται ως λιπαρά, ενώ όταν βρίσκονται σε υγρή μορφή αναφέρονται ως έλαια. Ταξινομούνται σε μη πολικά λιπίδια, όπως η χοληστερόλη, ή πολικά λιπίδια, όπως τα φωσφολιπίδια, παρουσιάζοντας σημαντικές διαφορές στη διαλυτότητά τους και σε άλλες λειτουργικές τους ιδιότητες.

Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των λιπιδίων ελέγχουν τα μικροδομικά χαρακτηριστικά τους, την σταθερότητά τους, τη ρεολογική τους συμπεριφορά και την υγρασία τους. Η μείωση του μήκους της υδρογονανθρακικής αλυσίδας που συνδέεται με τη γλυκερόλη, ή η αύξηση του βαθμού ακορεστότητας των αλυσίδων των λιπαρών οξέων, χαμηλώνει το σημείο τήξης τους και μειώνει τις ιδιότητες φραγμού της υγρασίας.

Τα λιπίδια, ως φορείς εγκλεισμού, προσφέρουν μία σειρά πλεονεκτημάτων. Μία από αυτές είναι η ικανότητά τους να συγκρατούν υλικά με διαφορετικές διαλυτότητες, κυρίως τα έντονα υδρόφοβα υλικά, προστατεύοντας έτσι τον ενεργό παράγοντα από βιολογική και χημική αποικοδόμηση, παρέχοντας παράλληλα σταθερότητα κατά την αποθήκευση του τροφίμου. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να ενισχύσουν την απόδοση του εγκλεισμού των υδρόφοβων δραστικών παραγόντων, αυξάνοντας έτσι τη βιοδιαθεσιμότητά τους και μειώνοντας την πιθανή τοξικότητά τους (Souza Simões et al., 2017).

### Συνδυασμοί διαφορετικών βιο-υλικών:

Ορισμένες εφαρμογές εγκλεισμού ενδέχεται να απαιτούν ιδιότητες διαφορετικών υλικών και έτσι ενδείκνυται ο συνδυασμός διαφόρων βιοϋλικών. Ο κατάλληλος συνδυασμός βιολογικών φορέων εγκλεισμού (πρωτεϊνών, πολυσακχαριτών, λιπιδίων ή άλλων υλικών) μπορεί να βελτιώσει τις ιδιότητες του εγκλεισμένου προϊόντος από άποψη μηχανικής, θερμικής και φρακτικής αντοχής, απόδοσης εγκλεισμού, σταθερότητας και βιοδιαθεσιμότητας των βιοδραστικών παραγόντων σε σύγκριση με εκείνα που συντίθενται από έναν μόνο φορέα.

Ο συνδυασμός πρωτεϊνών και πολυσακχαριτών έχει αναφερθεί σε διάφορες μελέτες ως η καταλληλότερη λύση για την ανάπτυξη συστημάτων εγκλεισμού. Οι πρωτεΐνες έχουν υψηλή θρεπτική αξία, μεγάλη ικανότητα σχηματισμού πηκτωμάτων και υδρολύονται εύκολα με πεπτικές πρωτεάσες. Οι πολυσακχαρίτες (αλγινικό οξύ, πηκτίνη, δεξτράνη και χιτοζάνη) έχουν μεγάλη αντοχή στις σκληρές γαστρικές συνθήκες, είναι δηλαδή ανθεκτικοί στα πεπτικά ένζυμα, και εμφανίζουν υψηλή προσκολλησιμότητα στην επιφάνεια του βλεννογόνου του εντέρου.

Επιπλέον, τα αντίθετα ηλεκτρικά φορτία μεταξύ των πρωτεϊνών και των πολυσακχαριτών τα οποία επηρεάζονται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, συμβάλλουν στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των δύο βιοπολυμερών μέσω ηλεκτροστατικής έλξης (Souza Simões et al., 2017).

### 3.2.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΦΟΡΕΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ

Τα σημαντικότερα κριτήρια για την επιλογή ενός φορέα εγκλεισμού είναι η λειτουργικότητα που θα πρέπει να παρέχει στο τελικό προϊόν, οι δυνητικοί περιορισμοί για το υλικό επίστρωσης, η συγκέντρωση των εγκλεισμάτων, ο τύπος απελευθέρωσης, οι απαιτήσεις σταθερότητας και οι περιορισμοί κόστους. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό του προστατευτικού κελύφους των εγκλεισμάτων πρέπει να είναι βρώσιμα, βιοδιασπώμενα και ικανά να σχηματίσουν ένα εμπόδιο μεταξύ της εσωτερικής φάσης και του περιβάλλοντος χώρου.

Η πλειοψηφία των φορέων που χρησιμοποιούνται για την ενθυλάκωση στον τομέα των τροφίμων είναι βιομόρια. Εκτός από το γεγονός ότι είναι φυσικοί, οι φορείς πρέπει να παρέχουν μέγιστη προστασία του ενεργού παράγοντα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, να τον συγκρατούν εντός της δομής των καψουλών κατά την επεξεργασία ή αποθήκευση κάτω από διάφορες συνθήκες, να μην αντιδρούν με τον πυρήνα, να έχουν καλά ρεολογικά χαρακτηριστικά σε υψηλή συγκέντρωση εάν είναι απαραίτητο και να καθιστούν εύκολη τη διαδικασία του εγκλεισμού.

Είναι αδύνατον να οριστούν όλα τα κριτήρια για την επιλογή ενός κατάλληλου φορέα εγκλεισμού. Βεβαίως, πρώτα στη λίστα βρίσκονται ο τύπος του ενεργού παράγοντα και τα χαρακτηριστικά του και η εφαρμογή στην οποία πρόκειται να χρησιμοποιηθούν τα εγκλεισμένα προϊόντα. Εκτός από αυτό, ο περιορισμός του κόστους παραμένει καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή των καταλληλότερων υλικών. Ανεξάρτητα από τον φορέα καθ' αυτόν, η μετατροπή των φυσικοχημικών χαρακτηριστικών του είναι η προϋπόθεση για την επιτυχή παραγωγή των προϊόντων τροφίμων. Επομένως, η μελέτη και η ανάλυση όλων των ιδιοτήτων του φορέα εγκλεισμού είναι η απαραίτητη προϋπόθεση προκειμένου να προβλεφθεί η συμπεριφορά του υπό συνθήκες που επικρατούν στις συνθέσεις τροφίμων (Nedovic et al., 2011).

### 3.3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ

Υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες τεχνικές για τον εγκλεισμό των ενώσεων τροφίμων. Δεδομένου ότι οι ενώσεις εγκλεισμού είναι πολύ συχνά σε υγρή μορφή, πολλές τεχνολογίες βασίζονται στην ξήρανση. Διαφορετικές τεχνικές όπως η ξήρανση με ψεκασμό (spray drying), η επικάλυψη ρευστοποιημένης κλίνης (fluid-bed coating), η ψύξη με ψεκασμό (spray-chilling/cooling), η έγχυση τήγματος (melt injection), η εξώθηση τήγματος (extrusion) και η γαλακτωματοποίηση (emulsification) είναι διαθέσιμες για τον εγκλεισμό ενεργών παραγόντων (Nedovic et al., 2011).

Πολλές διεργασίες εγκλεισμού βασίζονται στο σχηματισμό των πρώτων σταγονιδίων του δραστικού παράγοντα, ο οποίος βρίσκεται σε μορφή αερίου, υγρού ή σκόνης. Αυτά τα σταγονίδια στη συνέχεια περιβάλλονται από το φορέα σε αέρια ή υγρή φάση μέσω διαφορετικών φυσικοχημικών διεργασιών. Εξαιρέσεις αποτελούν ορισμένες τεχνικές εγκλεισμού, όπως η τεχνική λιποσωμάτων, η παρασκευή προϊόντων εγκλεισμού με την τεχνική της εξώθησης τήγματος, τεχνολογίες εγκλεισμού συμπλοκοποίησης και η χρήση έμβιων φορέων εγκλεισμού (Zuidam & Shimoni, 2010).

**Πίνακας 3.2 : Περιγραφή ορισμένων τεχνολογιών εγκλεισμού (Zuidam & Shimoni, 2010)**

<b>ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ</b>	<b>ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ</b>	<b>ΤΥΠΟΣ ΔΟΜΗΣ</b>	<b>ΜΕΓΕΘΟΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ (μm)</b>
<b>Ξήρανση με ψεκασμό</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Διάλυση του ενεργού παράγοντα σε υδατικό διάλυμα</li><li>2. Ψεκασμός</li><li>3. Αφυδάτωση</li></ol>	Μήτρας	40 - 100
<b>Επικάλυψη ρευστοποιημένης κλίνης</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Ρευστοποίηση του δραστικού παράγοντα</li><li>2. Ψεκασμός</li><li>3. Αφυδάτωση ή ψύξη</li></ol>	Θαλάμου	5 - 5000
<b>Ψύξη με ψεκασμό</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Διάλυση του ενεργού παράγοντα σε θερμαινόμενο διάλυμα λιπιδίων</li><li>2. Ψεκασμός</li><li>3. Ψύξη</li></ol>	Μήτρας	20 - 200
<b>Έγχυση τήγματος</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Τήξη της μήτρας</li><li>2. Διάλυση του ενεργού παράγοντα</li><li>3. Εξώθηση μέσω φίλτρου</li><li>4. Ψύξη και αφυδάτωση</li></ol>	Μήτρας	200 - 2000
<b>Εξώθηση τήγματος</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Τήξη της μήτρας</li></ol>	Μήτρας	300 - 5000

	<ol style="list-style-type: none"> <li>Διάλυση του ενεργού παράγοντα</li> <li>Εξώθηση με διπλό κοχλία</li> <li>Ψύξη</li> </ol>		
<b>Γαλακτωματοποίηση</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Διάλυση του ενεργού παράγοντα και των γαλακτωματοποιητών σε υδατική ή ελαιώδη φάση</li> <li>Ανάμιξη των δύο φάσεων</li> </ol>	Μήτρας	0,2 - 5000
<b>Παρασκευή γαλακτωμάτων με πολλαπλά στρώματα</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Παρασκευή γαλακτωμάτων με λιπόφιλο ενεργό παράγοντα σε ελαιώδη φάση και ιοντικούς γαλακτωματοποιητές</li> <li>Ανάμιξη με υδατικό διάλυμα το οποίο περιέχει αντίθετα φορτισμένους πολυηλεκτρολύτες</li> <li>Αφαίρεση των ελεύθερων πολυηλεκτρολυτών</li> <li>Επανάληψη των βημάτων 2 και 3</li> </ol>	Θαλάμου	0,2 - 5000
<b>Συσσωμάτωση</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Παρασκευή γαλακτωμάτων με λιπόφιλο ενεργό παράγοντα σε ελαιώδη φάση</li> <li>Ανάμιξη</li> <li>Ύπαρξη τριών μη αναμίξιμων φάσεων</li> <li>Ψύξη</li> </ol>	Θαλάμου	10 - 800
<b>Παρασκευή μικροσφαιρών μέσω εξώθησης</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Διάλυση του ενεργού παράγοντα σε διάλυμα αλγινικού οξέος</li> <li>Εισαγωγή σε λουτρό ζελατινοποίησης</li> </ol>	Μήτρας	200 - 5000
<b>Παρασκευή μικροσφαιρών μέσω γαλακτωματοποίησης</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Γαλακτωματοποίηση του νερού σε ελαιώδη φάση</li> <li>Προσθήκη παράγοντα ζελατινοποίησης</li> </ol>	Μήτρας	10 - 1000
<b>Συν - εξώθηση</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>Διάλυση του ενεργού παράγοντα σε έλαιο</li> <li>Παρασκευή υδατικής ή λιπιδικής μήτρας</li> <li>Με ένα ομόκεντρο ακροφύσιο πιέζονται ταυτόχρονα η ελαιώδης και η υδατική φάση</li> <li>Εισαγωγή σε λουτρό ζελατινοποίησης ή ψύξης</li> </ol>	Θαλάμου	150 - 8000



<b>Συμπλοκοποίηση</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ανάμιξη του ενεργού παράγοντα και του φορέα εγκλεισμού σε νερό</li> <li>2. Επώαση και ξήρανση αν είναι απαραίτητο</li> </ol>	Μοριακός εγκλεισμός	0,001 – 0,01
<b>Εγκλεισμός με λιποσώματα</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Διάλυση των λιπιδικών μορίων στο νερό, με τον ενεργό παράγοντα σε λιπιδική ή υδατική φάση</li> <li>2. Μείωση του μεγέθους με διάτμηση ή εξώθηση</li> <li>3. Αφαίρεση του ελεύθερου ενεργού παράγοντα</li> </ol>	Πικοίλει	10 - 1000
<b>Ξήρανση υπό κατάψυξη ή υπό κενό</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Διάλυση του ενεργού παράγοντα και του φορέα εγκλεισμού σε νερό</li> <li>2. Ψύξη του διαλύματος</li> <li>3. Ξήρανση υπό χαμηλή πίεση</li> <li>4. Άλεση (προαιρετικό)</li> </ol>	Μήτρας	20 - 5000

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικότερα οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τεχνικές:

Ξήρανση με ψεκασμό:

Η ξήρανση με ψεκασμό είναι μία από τις παλαιότερες και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές εγκλεισμού στον τομέα της βιομηχανίας τροφίμων. Πρόκειται για μία ευέλικτη, συνεχή, και το σημαντικότερο, οικονομική λειτουργία. Παράγει σωματίδια καλής ποιότητας, το μέγεθος των οποίων είναι μικρότερο από 40 μm. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι επιθυμητό από άποψη υφής και αισθητικής, όσον αφορά τα τελικά προϊόντα. Αν και η τεχνική αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη στη βιομηχανία τροφίμων, υπάρχουν πολλά μειονεκτήματα αυτής της τεχνικής, όπως η πολυπλοκότητα του εξοπλισμού, οι μη ομοιόμορφες συνθήκες στο θάλαμο ξήρανσης και η δυσκολία ελέγχου του μεγέθους των σωματιδίων. Περίπου το 80-90% των διεργασιών εγκλεισμού γίνεται με ξήρανση με ψεκασμό, ενώ το υπόλοιπο 20-10% γίνεται κυρίως με ψύξη με ψεκασμό, ξήρανση με κατάψυξη, εξώθηση τήγματος και έγχυση τήγματος (Nedovic et al., 2011).

Εξώθηση τήγματος:

Η τεχνική της εξώθησης τήγματος βασίζεται στην πτώση των σταγονιδίων ενός υδατικού διαλύματος πολυμερούς μέσα σε ένα λουτρό ζελατινοποίησης. Το εργαλείο με το οποίο

πέφτουν οι σταγόνες μπορεί να είναι απλώς μία πιπέτα, μία σύριγγα, ένα δονούμενο ακροφύσιο, ένα ακροφύσιο ψεκασμού, ένας κοπτήρας (jet cutter) ή ένας ψεκαστήρας. Σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές εξώθησης, ο κοπτήρας φαίνεται να είναι η καλύτερη επιλογή για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας ή βιομηχανικής χρήσης. Η ηλεκτροστατική εξώθηση είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για την παραγωγή πολύ μικρών σωματιδίων, έως και 50 μm. Μία εναλλακτική τεχνολογία εξώθησης είναι η συνεξώθηση. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή σφαιρικών μικροσφαιριδίων με έναν υδρόφοβο πυρήνα και ένα υδρόφιλο ή υδρόφοβο κέλυφος (Nedovic et al., 2011).

#### Γαλακτωματοποίηση:

Η γαλακτωματοποίηση είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική εγκλεισμού και χρησιμοποιείται στην περίπτωση υδατοδιαλυτών ενεργών παραγόντων των τροφίμων. Υπάρχουν δύο συνδυασμοί γαλακτωμάτων: γαλακτώματα νερού / ελαίου ή γαλακτώματα ελαίου / νερού και διπλά γαλακτώματα νερού / ελαίου / νερού. Ένα γαλάκτωμα ελαίου σε νερό μπορεί να ξηρανθεί μέσω διαφορετικών μεθόδων ξήρανσης όπως ξήρανση με ψεκασμό ή με ψύξη προκειμένου να παραχθεί μία σκόνη. Αυτά τα γαλακτώματα που παράγονται μετά την ξήρανση αποτελούν τα εγκλεισμένα προϊόντα (Nedovic et al., 2011).

#### Ψύξη με ψεκασμό:

Η ψύξη με ψεκασμό αποτελεί μία τεχνολογία για την παραγωγή ενεργών παραγόντων με επικάλυψη λιπιδίων. Υπάρχουν δύο διαφορετικές τεχνικές, το "spray-chilling" και το "spray-cooling". Η διαφορά μεταξύ αυτών των δύο τεχνικών είναι το σημείο τήξης των λιπιδίων, το οποίο στην πρώτη τεχνική βρίσκεται στην περιοχή των 34-42 °C, ενώ στη δεύτερη η θερμοκρασία είναι υψηλότερη. Ο ενεργός παράγοντας μπορεί να διαλυθεί σε λιπίδια, να λάβει τη μορφή ξηρών σωματιδίων ή υδατικών γαλακτωμάτων (Nedovic et al., 2011).

#### Επικάλυψη ρευστοποιημένης κλίνης:

Η επικάλυψη ρευστοποιημένης κλίνης είναι μία τεχνική εγκλεισμού κατά την οποία εφαρμόζεται ένα επικαλυπτικό στρώμα σε σωματίδια σκόνης. Τα σωματίδια σκόνης

αιωρούνται μέσω ενός ρεύματος αέρα σε μία συγκεκριμένη θερμοκρασία και ψεκάζονται με ένα ατμοποιημένο υλικό επικάλυψης. Το υλικό επικάλυψης μπορεί να είναι ένα υδατικό διάλυμα κυτταρίνης ή παραγώγων αμύλου, πρωτεϊνών και κόμμεων (Nedovic et al., 2011).

#### Ξήρανση υπό κενό και Ξήρανση υπό κατάψυξη:

Ξήρανση υπό κενό και η Ξήρανση υπό κατάψυξη είναι παρόμοιες τεχνικές Ξήρανσης, με την πρώτη να είναι ταχύτερη και φθηνότερη, επειδή λειτουργεί σε θερμοκρασία πάνω από το σημείο πήξης του διαλύτη. Η Ξήρανση υπό κατάψυξη είναι μία τεχνική κατά την οποία ο πάγος εξαχνώνεται ώστε να παραχθεί αέριο υπό πίεση, και η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται είναι πολύ μικρή. Τα κύρια βήματα αυτής της τεχνικής είναι η κατάψυξη, η εξάχνωση, η εκρόφηση και η αποθήκευση. Είναι μία κατάλληλη τεχνική εγκλεισμού για θερμικά ευαίσθητα υλικά και για τη διατήρηση των εγκλεισμένων προϊόντων για μεγάλο χρονικό διάστημα, δεδομένου ότι η διαδικασία της αφυδάτωσης λαμβάνει χώρα σε χαμηλή θερμοκρασία, υπό κενό. Ωστόσο, τα κύρια μειονεκτήματα της Ξήρανσης με ψύξη είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας και ο μεγάλος χρόνος επεξεργασίας (Nedovic et al., 2011; Souza Simões et al., 2017).

#### Μέθοδος εξάτμισης διαλύτη:

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην εξάτμιση της εσωτερικής φάσης ενός γαλακτώματος μέσω ανάδευσης. Γενικά, το πολυμερές υλικό επικάλυψης διαλύεται σε έναν πτητικό οργανικό διαλύτη. Ο πυρήνας, στη συνέχεια, διαλύεται στο παραπάνω διάλυμα πολυμερούς σχηματίζοντας ένα εναιώρημα, ένα γαλάκτωμα ή ένα διάλυμα. Κατόπιν η οργανική φάση γαλακτωματοποιείται κάτω από ανάδευση. Μόλις το γαλάκτωμα σταθεροποιηθεί, η ανάδευση διατηρείται και ο διαλύτης εξατμίζεται αφού διαχυθεί διαμέσου της συνεχούς φάσης έχοντας ως αποτέλεσμα την παραγωγή στερεών μικροσφαιριδίων. Τα μικροσφαιρίδια ανακτώνται με διήθηση ή φυγοκέντρηση, πλένονται και ξηραίνονται. Αρκετοί ερευνητές έχουν παράγει μικροσφαιρίδια διαφόρων βιοδραστικών υλικών χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνική και τις παραλλαγές της (Hwisa, Katakam, Chandu, & Adiki, 2013).

### 3.4 ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΣ ΣΙΔΗΡΟΥ

Το βασικό πλεονέκτημα του εγκλεισμού του σιδήρου είναι ότι μπορεί να επιτρέψει την προσθήκη ενώσεων σιδήρου υψηλής βιοδιαθεσιμότητας σε τρόφιμα τα οποία είναι δύσκολο να εμπλουτιστούν, όπως αλεύρια δημητριακών, γαλακτοκομικά προϊόντα και άλατα χαμηλής ποιότητας. Ο εγκλεισμός του σιδήρου μπορεί να μειώσει την οξείδωση των λιπαρών οξέων, των αμινοξέων και άλλων μικροθρεπτικών συστατικών που καταλύεται από το σίδηρο και μπορεί να προκαλέσει δυσμενείς αισθητικές αλλαγές και να μειώσει τη θρεπτική αξία των τροφίμων. Επίσης, μπορεί να μειώσει τις αλληλεπιδράσεις του σιδήρου με συστατικά των τροφίμων τα οποία προκαλούν αλλαγές χρώματος και χαμηλότερη βιοδιαθεσιμότητα σιδήρου, όπως οι ταννίνες, οι πολυφαινόλες και τα φυτικά οξέα. Έρευνες έχουν δείξει ότι ο εγκλεισμός του θειικού σιδήρου και του φουμαρικού σιδήρου δεν μεταβάλλει τη βιοδιαθεσιμότητα του σιδήρου στον οργανισμό. Επιπλέον, ο διπλός εμπλουτισμός του αλατιού με εγκλεισμένο σίδηρο έχει βρεθεί ότι είναι πολύ αποτελεσματικός στους ανθρώπους.

Ένας αριθμός εγκλεισμένων ενώσεων σιδήρου είναι υπό ανάπτυξη ή είναι εμπορικά διαθέσιμος. Κατά την ανάπτυξη εγκλεισμένων ενισχυτικών σιδήρου, είναι σημαντικό να επιλεγεί ένας φορέας ο οποίος να παρέχει επαρκή ισορροπία μεταξύ σταθερότητας και βιοδιαθεσιμότητας. Σε αυτές τις ενώσεις περιλαμβάνονται μορφές θειικού σιδήρου, φουμαρικού σιδήρου, πυροφωσφορικού σιδήρου και στοιχειακού σιδήρου. Υδατοδιαλυτά υλικά επικάλυψης, όπως η μαλτοδεξτρίνη και η κυτταρίνη, τυπικά δεν παρέχουν επαρκή προστασία ενάντια στην οξείδωση του σιδήρου σε υγρά περιβάλλοντα. Επομένως, οι περισσότερες εγκλεισμένες ενώσεις σιδήρου επικαλύπτονται με υδρογονωμένα έλαια που παρέχουν ένα αποτελεσματικό φράγμα νερού σε σχέση με το χαμηλό κόστος τους. Αυτά τα λιπαρά προϊόντα εγκλεισμού μπορούν να παρασκευαστούν με την τεχνική της επικάλυψης ρευστοποιημένης κλίνης ή με ψύξη με ψεκασμό (Allen et al., 2006, pp. 103–104; Zuidam & Nedović, 2010, pp. 187–188).

### 3.5. ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Η θειαμίνη είναι μία εξαιρετικά ασταθής βιταμίνη, κυρίως όταν εκτίθεται σε φως, οξυγόνο, υψηλές θερμοκρασίες και μεταλλικά ιόντα. Έτσι, η αποτελεσματικότητα της θειαμίνης μειώνεται, όταν αποθηκεύεται για μεγάλο χρονικό διάστημα. Με την τεχνική του εγκλεισμού,

αποτρέπεται η καταστροφή της θειαμίνης παρουσία οξυγόνου, θερμότητας, υγρασίας, φωτός, ορυκτών, ακραίων περιβαλλοντικών συνθηκών και μεγάλου διαστήματος αποθήκευσης. Τα εγκλειστικά υλικά είναι εύπεπτα από το ανθρώπινο πεπτικό σύστημα, αυξάνουν τη βιοδιαθεσιμότητα της θειαμίνης και καλύπτουν τη γεύση της (Juveriya Fathima, Fathima, Abhishek, & Khanum, 2016).

### 3.6. ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΕΓΚΛΕΙΣΜΕΝΑ ΘΡΕΠΤΙΚΑ

Το φαγητό όχι μόνο εξυπηρετεί την ικανοποίηση της πρωταρχικής ανάγκης της πείνας, αλλά αποσκοπεί επίσης στην αντιμετώπιση των διατροφικών διαταραχών και την προστασία της υγείας του οργανισμού. Πολλά θρεπτικά συστατικά τα οποία είναι απαραίτητα για τον οργανισμό μας, όπως ο σίδηρος και η θειαμίνη, δεν λαμβάνονται στις κατάλληλες ποσότητες και γι' αυτό επιλέγεται η μέθοδος του εμπλουτισμού των τροφίμων. Ωστόσο, η προσθήκη στα τρόφιμα ελεύθερων συστατικών τείνει να παρουσιάζει οργανοληπτικούς περιορισμούς, αλλά και περιορισμούς όσον αφορά την απορρόφησή τους από τον οργανισμό. Αποτελεσματική λύση για τον περιορισμό αυτό αποτελεί ο εγκλεισμός των θρεπτικών συστατικών.

Ο σκοπός του εμπλουτισμού και της ενίσχυσης του ρυζιού είναι η αποκατάσταση, στο αλεσμένο ρύζι, των επιπέδων των βιταμινών Β και των μετάλλων που αφαιρούνται από τους κόκκους κατά την επεξεργασία. Τεχνικά, είναι πιο δύσκολο από τον εμπλουτισμό του αλεύρου σίτου, καθώς το ρύζι καταναλώνεται ως ολόκληρος κόκκος. Οι παραδοσιακές μέθοδοι περιλαμβάνουν την υγροθερμική επεξεργασία, την υγροθερμική επεξεργασία με οξύ, χρησιμοποιώντας 1% οξικό οξύ, τον εμπλουτισμό της θειαμίνης, την επικάλυψη, την παραγωγή τεχνητού ρυζιού και τον εμπλουτισμό με πολλά θρεπτικά, με την προσθήκη ενός προμίγματος πολλών θρεπτικών. Η πρόσμιξη πραγματοποιείται εμποτίζοντας το μυλεμένο ρύζι σε διάλυμα οξικού οξέος το οποίο περιέχει τις υδατοδιαλυτές βιταμίνες θειαμίνη, ριβοφλαβίνη, νιασίνη, παντοθενικό οξύ και πυριδοξίνη. Στη συνέχεια ατμίζεται, ξηραίνεται και επικαλύπτεται με ξεχωριστά στρώματα βιταμίνης Ε, ασβεστίου και σιδήρου και ακολούθως επικαλύπτεται με προστατευτικό υλικό επίστρωσης και φυσικό χρωματισμό τροφίμων για την αποφυγή της απώλειας θρεπτικών συστατικών μέσω πλύσης. Τα επίπεδα θρεπτικών συστατικών είναι εν τέλει τα ίδια με αυτά του καφέ ρυζιού. Αυτό το πολυθρεπτικά εμπλουτισμένο ρύζι αναμιγνύεται με λευκασμένο ρύζι σε αναλογία 1: 200. Μόνο το 10%

οποιασδήποτε θρεπτικής ουσίας χάνεται με το συνηθισμένο πλύσιμο πριν το μαγείρεμα και άλλο 10% χάνεται με το μαγείρεμα (Juliano, 1993, p. 122).

## 4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

### 4.1. ΣΚΟΠΟΣ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο εμπλουτισμός προϊόντων ρυζιού με εγκλεισμένο σίδηρο και εγκλεισμένη θειαμίνη. Το ρύζι αποτελεί το βασικό τρόφιμο σε πολλά μέρη του πλανήτη, τόσο σε αναπτυσσόμενες χώρες όσο και σε ανεπτυγμένες χώρες. Έτσι ο εμπλουτισμός του με σίδηρο και θειαμίνη αποτελεί ένα μέσο πρόληψης και αντιμετώπισης της ανεπάρκειας σιδήρου και θειαμίνης αντίστοιχα, η οποία πλήττει μεγάλο ποσοστό του πληθυσμού. Έναυσμα για την πραγματοποίηση του εγκλεισμού των θρεπτικών πριν από τον εμπλουτισμό τους στάθηκαν τα οργανοληπτικά προβλήματα που προκύπτουν με την προσθήκη των ελεύθερων θρεπτικών στα τρόφιμα, αλλά και η ανάγκη για ενίσχυση της βιοδιαθεσιμότητάς τους.

Συνεπώς, η πειραματική διαδικασία της εργασίας χωρίζεται σε δύο μέρη: 1) τον εγκλεισμό των θρεπτικών και 2) τον εμπλουτισμό τους στα προϊόντα ρυζιού. Κατά το πρώτο μέρος, πραγματοποιείται ο εγκλεισμός του σιδήρου και της θειαμίνης με διάφορα μέσα εγκλεισμού και στη συνέχεια εκτιμάται η απόδοση των διαδικασιών παραγωγής των προϊόντων εγκλεισμού. Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει την ενσωμάτωση των προϊόντων εγκλεισμού, με τις μεγαλύτερες αποδόσεις, σε προϊόντα ρυζιού. Τα εμπλουτισμένα προϊόντα ρυζιού μαγειρεύονται και αξιολογείται η περιεκτικότητα στα εν λόγω θρεπτικά, τόσο των μαγειρεμένων όσο και των ξηρών προϊόντων. Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιούνται μη εμπλουτισμένα προϊόντα ρυζιού. Τέλος, διεξάγεται προσομοίωση του συστήματος βιολογικής πέψης, με σκοπό τη μελέτη της βιοδιαθεσιμότητας του σιδήρου και της θειαμίνης των εμπλουτισμένων προϊόντων ρυζιού.

Τα πειράματα της εργασίας διεξήχθησαν στο εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων της Σχολής των Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

### 4.2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την παρασκευή των προϊόντων εγκλεισμού, τη διαδικασία εμπλουτισμού και μαγειρέματος του ρυζιού και τις μεθόδους ανάλυσης και προσομοίωσης της πέψης χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω πρώτες ύλες, αντιδραστήρια και συσκευές.

### Πυρήνας εγκλεισμού

1. Για τον εγκλεισμό σιδήρου:
  - Ένυδρος θειικός σίδηρος,  $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$
  - Ασκορβικό οξύ
2. Για τον εγκλεισμό θειαμίνης
  - Μονονιτρική θειαμίνη

### Υλικά εγκλεισμού

- Μαλτοδεξτρίνη (Syras.A.)
- Τροποποιημένο άμυλο (IngredionUKLimited)
- Αραβικό κόμμι (Sigma-Aldrich)
- Πηκτίνη (Fisher Scientific UK)
- Ζελατίνη (from porcine skin Type A, Sigma-Aldrich)

### Πρόσθετα υλικά για την παραγωγή προϊόντων εγκλεισμού

- Απιονισμένο νερό
- Αιθανόλη καθαρότητας 96%

### Προϊόντα ρυζιού

Όλα τα προϊόντα ρυζιού που χρησιμοποιήθηκαν είναι προσφορά από την εταιρία Agrino.

- Ρύζι Parboiled
- Ρύζι Parboiled (Agrino έτοιμο σε 10 min)
- Καστανό ρύζι
- Λευκό ρύζι
- Λευκό ρυζάλευρο



### Αντιδραστήρια αναλυτικών μεθόδων

- Ορθο-φαινανθρολίνη (Ortho-phenanthroline)

### Αντιδραστήρια προσομοίωσης πέψης

- Πεψίνη (Pepsin)
- Παγκρεατίνη (Pancreatin)
- Χολικά συστατικά (Bile extract)
- HCL 0,1 N
- NaHCO<sub>3</sub> 0,1 M
- Απιονισμένο νερό

### Εργαστηριακά όργανα και συσκευές

- Αναλυτικός ζυγός
- Ηλεκτρονικός ζυγός (620C, Precisa Instruments, Switzerland)
- Πλάκες ανάδευσης (IKA-WERKE EURO-ST, GmbH & CO.KG, Staufen, Germany)
- Θερμαινόμενες πλάκες ανάδευσης
- Συσκευή υπερήχων (Elmasonic S 30)
- Φυγόκεντρος (Thermo scientific, Megaluge 16R)
- Υδατόλουτρο (KOTTERMANN)
- Ψεκαστήρας (οικιακής χρήσης)
- Σύριγγα των 5 mL
- Φίλτρα (PTFE 0,45 μm)
- Vials
- Vortex
- pHμετρο
- Συσκευή Freeze Drying (Christ/Alpha 1-4DL, UK)
- Φασματόμετρο Ορατού φωτός (Hitachi/U-2900, Japan)
- Συσκευή HPLC (Hewlett Packard, 1100 FLD-UV detector, Waldbronn, Germany)
- Συσκευή Microwave (Microwave acid digestion apparatus, Milestone Ethos/SK-10 High Pressure Rotor)
- Ηλεκτρικό Μίξερ

- Φασματοόμετρο Ατομικής Απορρόφησης (PerkinElmer 3300)
- Υδραυλική πρέσα
- Ξηραντήρας (Binder)
- Κλίβανος (Thermawatt TG103)
- Αναλυτής υφής (Stable Micro Systems/TA-XT2i, UK)
- Χρωματοόμετρο (Konica – Minolta/CR-200)
- Μετρητής ενεργότητας νερού, Pawkit 13 water activity meter (Decagon, Pullman, WA, USA).
- Βασικά σκεύη εργαστηρίου και αναλώσιμα (ποτήρια ζέσεως, ογκομετρικές φιάλες, κωνικές φιάλες, ογκομετρικοί κύλινδροι, χωνιά μετάγγισης, σιφώνια, πουάρ, πιπέτες, υδροβολείς, τρυβλία, μαγνήτες ανάδευσης, σκαφίδιο).

### 4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

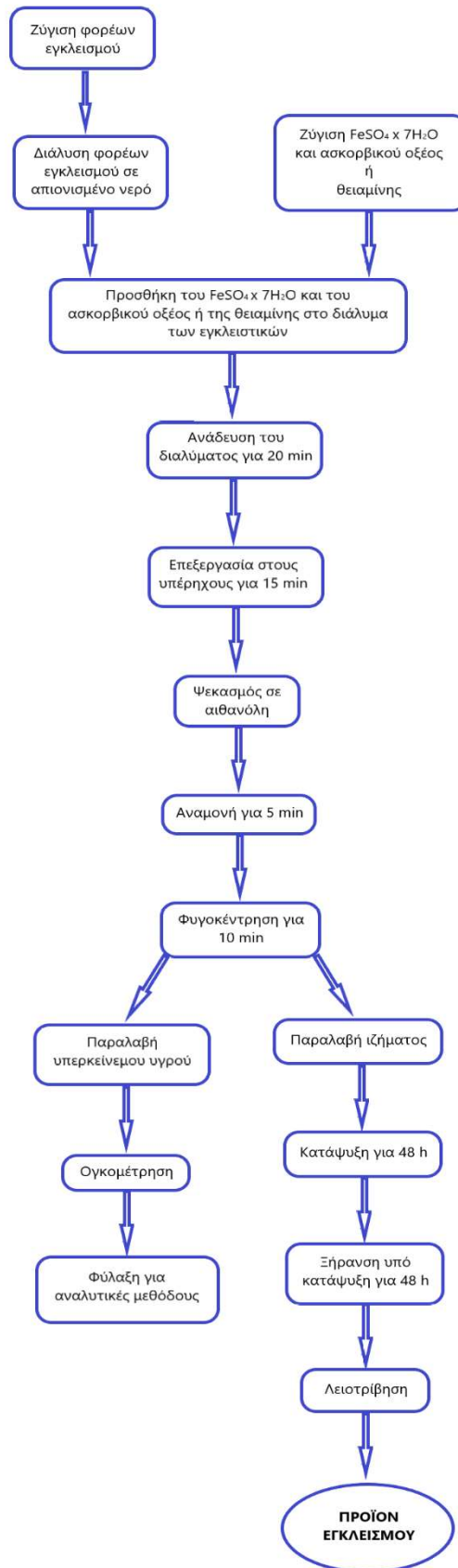
Η πειραματική διαδικασία αποτελείται από τα εξής μέρη:

- A) Εγκλεισμός
  1. Εγκλεισμός σιδήρου
  2. Εγκλεισμός θειαμίνης
- B) Ενσωμάτωση των προϊόντων εγκλεισμού σε ρύζια και σε ρυζάλευρο

Στη συνέχεια περιγράφονται οι μέθοδοι και οι διεργασίες που εφαρμόστηκαν για κάθε πειραματικό μέρος.

#### 4.3.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ

Για τον εγκλεισμό του σιδήρου και της θειαμίνης εφαρμόζεται η ίδια τροποποιημένη μέθοδος εξάτμισης διαλύτη (modified solvent evaporation method)(Gupta, Chawla, Arora, Tomar, & Singh, 2014). Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα ροής της μεθόδου και περιγράφεται το κάθε στάδιο ξεχωριστά.



Εικόνα 4.1 : Διάγραμμα ροής της μεθόδου εγκλεισμού

- Ζύγιση  $FeSO_4 \times 7H_2O$  και Ασκορβικού Οξέος ή Ζύγιση Θειαμίνης: Σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας τοποθετείται σκαφίδιο και μηδενίζεται η ένδειξη. Ζυγίζεται η κατάλληλη ποσότητα Σιδήρου και Ασκορβικού Οξέος ή Θειαμίνης. Στην πρώτη περίπτωση, η αναλογία του σιδήρου προς το ασκορβικό οξύ είναι πάντα σταθερή και ίση με 15 : 1.
- Ζύγιση φορέων εγκλεισμού: Σε ηλεκτρονικό ζυγό τοποθετείται σκαφίδιο και μηδενίζεται η ένδειξη. Μέσα στο αλουμινόχαρτο ζυγίζεται η κατάλληλη ποσότητα εγκλειστικών μέσων. Η αναλογία φορέων εγκλεισμού προς πυρήνα είναι πάντα σταθερή και ίση με 20 : 1.
- Διάλυση φορέων εγκλεισμού σε απιονισμένο νερό: Η ζυγισμένη ποσότητα των εγκλειστικών μέσων μεταφέρεται εντός ποτηριού ζέσεως με επαρκή ποσότητα απιονισμένου νερού, το οποίο θερμαίνεται στους 60°C. Με χρήση μαγνήτη ακολουθεί ανάδευση μέχρι διάλυσης των εγκλειστικών μέσων.
- Ανάδευση διαλύματος για 20 min: Στο διάλυμα των εγκλειστικών προστίθεται το άλας του σιδήρου και το ασκορβικό οξύ ή η θειαμίνη και αναδεύονται μαζί, έτσι ώστε να προκύψουν οι επιθυμητοί δεσμοί μεταξύ τους.
- Επεξεργασία με υπέρηχους: Το διάλυμα υφίσταται επεξεργασία σε συσκευή υπερήχων για 15 min. Πριν τη χρησιμοποίηση της συσκευής φροντίζεται να τοποθετείται πάγος στο νερό του λουτρού των υπερήχων, έτσι ώστε τη στιγμή της επεξεργασίας η θερμοκρασία να βρίσκεται στους 5-10 °C. Κατά το στάδιο αυτό, το διάλυμα απαλλάσσεται από τις φυσαλίδες αέρα και συνεχίζεται η ανάπτυξη των επιθυμητών δεσμών μεταξύ των φορέων εγκλεισμού και του πυρήνα.
- Ψεκάσμος σε αιθανόλη: Το διάλυμα φορέα/πυρήνα ψεκάζεται σε διάλυμα αιθανόλης καθαρότητας 96%, το οποίο έχει πρωτίστως ψυχθεί σε θερμοκρασία 3-4 °C, εντός ψυγείου. Ο ψεκάσμος πραγματοποιείται με απλή εμπορική συσκευή ψεκάσμου οικιακής χρήσης. Η αιθανόλη αποτελεί ένα μέσο αφυδάτωσης, καθώς αφυδατώνει τα υλικά εγκλεισμού όταν έρχονται σε επαφή, συμβάλλοντας έτσι στον σχηματισμό των επιθυμητών καψουλών.
- Αναμονή για 5 min: Κατά τον ψεκάσμό του διαλύματος στην αιθανόλη δημιουργείται σχεδόν ακαριαία στερεή φάση. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να δοθεί το ελάχιστο

χρονικό περιθώριο των 5 min, ώστε να ολοκληρωθεί ο σχηματισμός συσσωματωμάτων και να ληφθεί η μέγιστη δυνατή ποσότητα προϊόντος εγκλεισμού.

- Διαχωρισμός στερεής-υγρής φάσης: Ο διαχωρισμός της στερεής από την υγρή φάση γίνεται με φυγοκέντρηση. Το διάλυμα μεταγγίζεται εντός των δειγματοφορέων της συσκευής, ζυγίζονται διαδοχικά και ρυθμίζεται το βάρος να είναι κοινό ανά δύο. Στη συνέχεια οι δειγματοφορείς τοποθετούνται στη συσκευή με τα ισοβαρή δοχεία να είναι αντιδιαμετρικά, και η συσκευή τίθεται σε λειτουργία για 10 min.
- Διαχείριση υπερκείμενου υγρού: Το υπερκείμενο υγρό διαχωρίζεται από τη στερεή φάση και μεταγγίζεται σε ποτήρι ζέσεως. Στη συνέχεια ογκομετρείται σε έναν ογκομετρικό κύλινδρο και σημειώνεται η ένδειξη.
- Παραλαβή ιζήματος: Η στερεή φάση παραλαμβάνεται από τους δειγματοφορείς της φυγοκέντρου και τοποθετείται σε τρυβλία.
- Κατάψυξη για 48 h: Τα τρυβλία τοποθετούνται σε καταψύκτη στους -40 °C για 48h.
- Ξήρανση υπό κατάψυξη για 48 h: Τα τρυβλία τοποθετούνται εντός της συσκευής ξήρανσης υπό κατάψυξη και παραμένουν εκεί για 48 h.
- Λειοτρίβηση: Τα υλικά που παραλαμβάνονται από τη συσκευή ξήρανσης υπό κατάψυξη λειοτριβούνται χειροκίνητα σε γουδί, έως ότου αποκτήσουν μορφή σκόνης. Η σκόνη αυτή αποτελεί το τελικό προϊόν εγκλεισμού, το οποίο φυλάσσεται εντός ξηραντήρα.

#### 4.3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΡΥΖΙΟΥ ΚΑΙ ΡΥΖΑΛΕΥΡΟΥ

Για τον εμπλουτισμό του ρυζιού με σίδηρο και θειαμίνη χρησιμοποιείται η μέθοδος της εμφάπτισης. Το διάλυμα του θρεπτικού, το οποίο έχει μορφή σκόνης, τοποθετείται σε ποτήρι ζέσεως που περιέχει την κατάλληλη ποσότητα νερού και αναδεύεται με τη βοήθεια μαγνητικής πλάκας έως ότου διαλυθεί. Στη συνέχεια, προστίθεται, στο ποτήρι ζέσεως, το ρύζι και τοποθετείται σε υδατόλουτρο στους 90 °C για 15 min. Μετά το πέρας των 15 min, το ρύζι έχει συγκρατήσει όλη την ποσότητα του νερού με το θρεπτικό και αποτελεί πλέον το

εμπλουτισμένο προϊόν. Βάσει δοκιμών υπολογισμού της απορροφητικότητας του νερού από το ρύζι, υπολογίστηκε ο όγκος του διαλύματος θρεπτικού να είναι τέτοιος, ώστε το διάλυμα να απορροφάται πλήρως από το ρύζι με σκοπό να αποφευχθούν απώλειες λόγω απομάκρυνσης εναπομείναντος υλικού. Το εμπλουτισμένο προϊόν ξηραίνεται με χρήση ξηραντήρα, σε δύο στάδια λόγω της πολύ υψηλής υγρασίας που απέκτησε, στους 50 °C για 2 h και στους 70 °C για άλλες 2 h.

Για τον εμπλουτισμό του ρυζάλευρου με σίδηρο και θειαμίνη χρησιμοποιείται η μέθοδος της ανάμιξης, κατά την οποία τα θρεπτικά αναμιγνύονται με το ρυζάλευρο. Το μίγμα που έχει δημιουργηθεί τοποθετείται στον ξηραντήρα και ξηραίνεται σε δύο στάδια, στους 50 °C για 2 h και στους 70 °C για άλλες 2 h.

Τα εμπλουτισμένα, με θρεπτικά, ρύζια μαγειρεύτηκαν χωρίς να προηγηθεί πλύσιμο, με την απαιτούμενη ποσότητα νερού, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες θρεπτικού από την απομάκρυνση του νερού βρασμού. Η αναλογία ρυζιού : νερού είναι 1 : 2,5 για το κίτρινο, 1 : 3 για το λευκό και 1 : 4 για το καστανό. Ο χρόνος βρασμού είναι 10 min, εκτός από το καστανό που χρειάζεται 20-25 min.

## 4.4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

### 4.4.1. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ

#### 1. ΣΙΔΗΡΟΥ

Η σειρά αυτή των πειραμάτων περιλαμβάνει τον εγκλεισμό του άλατος θεικού σιδήρου ( $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ). Ο εγκλεισμός του θεικού σιδήρου πραγματοποιείται σε συνδυασμό με το ασκορβικό οξύ, πάντα σε αναλογία 15:1, καθώς το ασκορβικό οξύ αποτελεί ενισχυτικό απορρόφησης του σιδήρου. Η τεχνική με την οποία πραγματοποιείται ο εγκλεισμός είναι μια τροποποιημένη μέθοδος εξάτμισης διαλύτη, κατά την οποία χρησιμοποιούνται διάφορα εγκλειστικά μέσα ως φορείς, αλλά και συνδυασμοί αυτών. Η αναλογία πυρήνα : φορέα είναι σε όλες τις περιπτώσεις 1 : 20.

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ποσοτικός έλεγχος της απόδοσης του εγκλεισμού μέσω Φασματοφωτομετρίας του ορατού φωτός. Κατά τον έλεγχο αυτό χρησιμοποιείται ως τυφλό δείγμα το προϊόν που παρασκευάστηκε με την ίδια διαδικασία και τα ίδια εγκλειστικά μέσα με το προϊόν εγκλεισμού, αλλά χωρίς σίδηρο. Στα προϊόντα εγκλεισμού με την καλύτερη

απόδοση εγκλεισμού (τα οποία χρησιμοποιούνται και για τον εμπλουτισμό), μετράται επίσης ο περιεχόμενος σίδηρος με Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης.

## 2. ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Κατά την πειραματική αυτή σειρά πραγματοποιείται ο εγκλεισμός της θειαμίνης, με την ίδια τροποποιημένη μέθοδο εξάτμισης διαλύτη. Το εγκλειστικό μέσο που επιλέγεται είναι αυτό με την καλύτερη απόδοση εγκλεισμού της προηγούμενης σειράς πειραμάτων. Η αναλογία πυρήνα : φορέα είναι και σε αυτήν την περίπτωση 1 : 20. Ακολούθως, πραγματοποιείται έλεγχος της απόδοσης του εγκλεισμού μέσω της Υγρής Χρωματογραφίας Υψηλής Απόδοσης (HPLC).

### 4.4.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Η πειραματική σειρά εμπλουτισμού περιλαμβάνει τον εμπλουτισμό του ρυζιού και του ρυζάλευρου με σίδηρο και θειαμίνη. Η τεχνική με την οποία πραγματοποιείται ο εμπλουτισμός του σιδήρου στο ρύζι είναι η εμφάπτιση και η ποσότητα του σιδήρου που προστίθεται είναι 25 mg Fe/100 g ρυζιού. Στην περίπτωση του ρυζάλευρου η τεχνική εμπλουτισμού είναι η ανάμιξη και η ποσότητα που προστίθεται είναι η ίδια (25mg/100g). Ο εμπλουτισμός του ρυζιού με θειαμίνη πραγματοποιείται, επίσης, με την τεχνική της εμφάπτισης και η ποσότητα της θειαμίνης που προστίθεται στο ρύζι είναι 25 mg/100 g ρυζιού. Τα προϊόντα εγκλεισμού τα οποία ενσωματώνονται είναι εκείνα τα οποία παρουσίασαν την καλύτερη απόδοση εγκλεισμού. Στη συνέχεια, μαγειρεύεται ένα μέρος του εμπλουτισμένου ρυζιού, αλλά και η ίδια ποσότητα του αντίστοιχου μη εμπλουτισμένου ρυζιού, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως τυφλό δείγμα.

Και στις δύο περιπτώσεις των θρεπτικών εμπλουτισμού, μετά το μαγείρεμα τα ρύζια εξετάζονται ως προς ορισμένα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, γίνονται μετρήσεις του χρώματος, της ενεργότητας του νερού, της υγρασίας και των χαρακτηριστικών υφής όπως η σκληρότητα.

Ο περιεχόμενος σίδηρος μετράται χωριστά στα προϊόντα εγκλεισμού, στο εμπλουτισμένο ξηρό ρύζι και στο μαγειρεμένο, αλλά και στα τυφλά δείγματα αυτών, καθώς και στο εμπλουτισμένο και μη εμπλουτισμένο ρυζάλευρο. Η μέτρηση πραγματοποιείται με Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης. Η περιεχόμενη θειαμίνη μετράται στο μαγειρεμένο ρύζι καθώς και στο τυφλό δείγμα, μέσω της Υγρής Χρωματογραφίας Υψηλής Απόδοσης.

Επίσης, προσδιορίζεται η βιοδιαθεσιμότητα του σιδήρου και της θειαμίνης με τη μέθοδο της *in vitro* πέψης. Μετά από τη διαδικασία αυτή, η συγκέντρωση των θρεπτικών, η οποία προσδιορίζεται με Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης στην περίπτωση του σιδήρου και με Υγρή Χρωματογραφία Υψηλής Απόδοσης στην περίπτωση της θειαμίνης, μετράται στο κλάσμα το οποίο θεωρητικά δεν απορροφάται από τον οργανισμό. Η βιοδιαθεσιμότητα εκφράζεται ως το ποσοστό επί τοις εκατό του σιδήρου ή της θειαμίνης που απορροφάται από τον οργανισμό ως προς τη συνολική ποσότητα του θρεπτικού του δείγματος.

## 4.5. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

### 4.5.1. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ - ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ

#### 4.5.1.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΜΕΣΩ ΦΑΣΜΑΤΟΦΩΤΟΜΕΤΡΙΑΣ ΟΡΑΤΟΥ ΦΩΤΟΣ

Ο υπολογισμός της απόδοσης του εγκλεισμού του σιδήρου πραγματοποιείται έμμεσα, μετρώντας την ποσότητα του σιδήρου ο οποίος δεν δεσμεύεται από το φορέα εγκλεισμού. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη απορρόφηση του ορατού φωτός από το ερυθρού χρώματος σύμπλοκο που δημιουργεί ο σίδηρος όταν έρχεται σε επαφή με το αντιδραστήριο ορθο-φαινανθρολίνη (ortho-phenanthroline). Η απορρόφηση αυτή είναι μέγιστη όταν το μήκος κύματος είναι 505 nm.

Για την παρασκευή του αντιδραστήριου ορθο-φαινανθρολίνη 0,3%, ζυγίζονται σε αναλυτικό ζυγό ακριβείας 0,3 g του αντιδραστήριου ορθο-φαινανθρολίνης που βρίσκεται σε μορφή σκόνης. Η ποσότητα αυτή μεταφέρεται σε ποτήρι ζέσεως, το οποίο περιέχει επαρκή ποσότητα απιονισμένου νερού μικρότερη από 100 mL και τοποθετείται σε πλάκα μαγνητικής ανάδευσης όπου με τη βοήθεια μαγνήτη πραγματοποιείται ανάδευση υπό θέρμανση. Όταν το αντιδραστήριο διαλυτοποιηθεί, αφαιρείται από τη μαγνητική πλάκα, μεταγγίζεται με τη βοήθεια χωνιού σε ογκομετρική φιάλη των 100 mL και πληρώνεται με απιονισμένο νερό μέχρι τη χαραγή.

Στη συνέχεια, απαιτείται η κατασκευή της καμπύλης αναφοράς και γι' αυτό το σκοπό παρασκευάζεται πρότυπο διάλυμα σιδήρου συγκέντρωσης 0,25 g/L. Για την παρασκευή του πρότυπου διαλύματος σιδήρου απαιτούνται 0,25 g σιδήρου τα οποία αντιστοιχούν σε 1,244 g άλατος θειικού σιδήρου ( $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ). Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

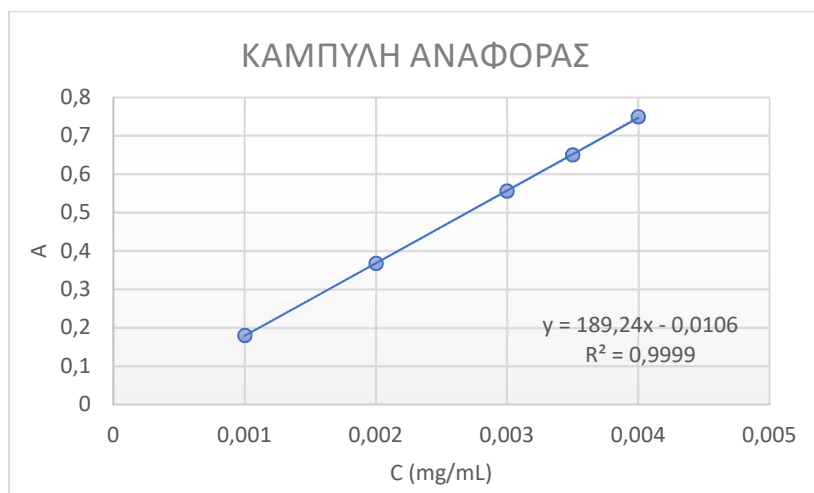


- Ζυγίζονται 1,244 g άλατος  $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$  και μεταφέρονται σε ποτήρι ζέσεως με επαρκή ποσότητα απιονισμένου νερού, μικρότερη από 1 L.
- Το ποτήρι ζέσεως μεταφέρεται σε μαγνητική πλάκα ανάδευσης, όπου με τη βοήθεια μαγνήτη το διάλυμα αναδεύεται μέχρι τελικής διαλυτοποίησης του άλατος σιδήρου.
- Το διάλυμα μεταγγίζεται με τη βοήθεια χωνιού σε ογκομετρική πλάκα του 1 L και πληρώνεται με απιονισμένο νερό μέχρι τη χαραγή.
- Με σιφώνιο των 25 mL μεταγγίζονται 25 mL του διαλύματος σε ογκομετρική φιάλη των 500 mL και ακολουθεί πλήρωση με απιονισμένο νερό μέχρι τη χαραγή. Το διάλυμα αυτό αποτελεί το «αρχικό διάλυμα σιδήρου».
- Σε 5 ογκομετρικές φιάλες των 50 mL μεταγγίζονται ποσότητες των 4 mL , 8 mL , 12 mL, 14 mL, και 16 mL του αρχικού διαλύματος σιδήρου, με σιφώνια των 10 και 25 mL.
- Με σιφώνιο των 5 mL, μεταφέρονται σε κάθε μία από τις ογκομετρικές φιάλες 4 mL του διαλύματος ορθο-φαινανθρολίνης 0,3%. Ακολουθεί πλήρωση με απιονισμένο νερό μέχρι τη χαραγή και ανακίνηση.
- Περίπου 3 mL από κάθε ένα από τα 5 διαλύματα μεταφέρεται σε κυψελίδα και μετράται η απορρόφηση στα 505 nm.

Μετά το πέρας της διαδικασίας λαμβάνονται τα 5 ζεύγη συγκέντρωσης (C) – απορρόφησης (A) και κατασκευάζεται η καμπύλη αναφοράς.

**Πίνακας 4.1 : Ζεύγη τιμών Συγκέντρωσης σιδήρου - Απορρόφησης**

<b>ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΣΙΔΗΡΟΥ (mg/mL)</b>	<b>ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ</b>
0,0010	0,180
0,0020	0,367
0,0030	0,556
0,0035	0,650
0,0040	0,749



Διάγραμμα 4.1 : Καμπύλη αναφοράς σιδήρου

Σύμφωνα με το νόμο Beer-Lambert, θεωρείται γραμμική σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης και της απορρόφησης. Σύμφωνα με την επεξεργασία του γραφήματος προκύπτει η γραμμική συνάρτηση:

$$A = 189,24 C - 0,0106$$

Στη συνέχεια, παρασκευάζεται το τυφλό δείγμα ώστε να πραγματοποιηθεί ο μηδενισμός του Φασματοφωτόμετρου. Για την παρασκευή του τυφλού δείγματος μεταφέρονται 2 mL διαλύματος ορθο-φαινανθρολίνης 0,3% σε ογκομετρική φιάλη των 25 mL. Ακολουθεί πλήρωση με ένα μίγμα νερού-αιθανόλης σε αναλογία 1 : 10.

Ακολουθεί η μέτρηση της απορρόφησης των δειγμάτων άγνωστης συγκέντρωσης. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι μετρήσεις απορρόφησης οι οποίες θεωρούνται αποδεκτές είναι αυτές που κυμαίνονται από 0,2 έως 0,8, καθώς εκτός αυτών των ορίων η συνάρτηση παύει να είναι γραμμική. Τα βήματα που ακολουθούνται είναι τα εξής:

- Κατάλληλη ποσότητα του υπερκείμενου υγρού, το οποίο έχει διαχωριστεί μετά τη διαδικασία της φυγοκέντρωσης και έχει ογκομετρηθεί, μεταφέρεται με το κατάλληλο σιφώνιο σε ογκομετρική φιάλη των 25 mL. Η ποσότητα αυτή κυμαίνεται από 5 mL έως 20 mL και βρίσκεται κατόπιν δοκιμών, έτσι ώστε να τηρούνται τα όρια απορρόφησης. Μετρήσεις εκτός των ορίων απορρίπτονται και επαναλαμβάνονται κατόπιν αραιώσης του δείγματος.
- Με σιφώνιο των 2 mL προστίθενται, στην ογκομετρική, φιάλη 2 mL διαλύματος ορθο-φαινανθρολίνης.

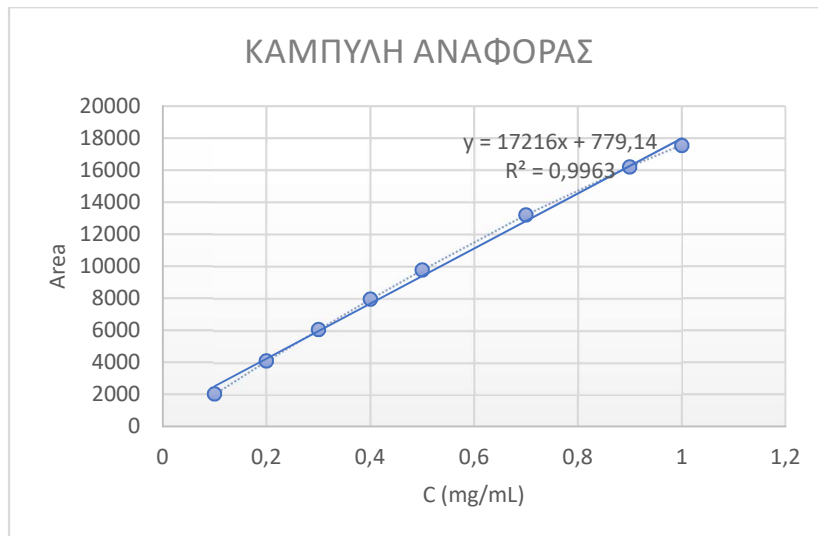
- Το διάλυμα ανακινείται για λίγα δευτερόλεπτα και αφήνεται σε ηρεμία. Μετά το πέρας 10 min, η φιάλη πληρώνεται με απιονισμένο νερό μέχρι τη χαραγή.
- Το τυφλό δείγμα μεταγγίζεται σε γυάλινη κυψελίδα και εισάγεται στο φωτόμετρο. Η ένδειξη της μέτρησης σημειώνεται και επιλέγεται ο μηδενισμός του οργάνου.
- Η κυψελίδα, αφού αφαιρεθεί από το φωτόμετρο και απορριφθεί το τυφλό δείγμα, ξεπλένεται αρκετές φορές με απιονισμένο νερό με τη βοήθεια του υδροβολέα και στεγνώνεται με χαρτί.
- Το δείγμα άγνωστης συγκέντρωσης μεταγγίζεται στην κυψελίδα, η οποία εισάγεται στο φωτόμετρο και λαμβάνεται η μέτρηση. Το δείγμα απορρίπτεται και καθαρίζεται η κυψελίδα. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται 2 φορές και ως τελική μέτρηση επιλέγεται ο μέσος όρος των τριών αυτών μετρήσεων.

Επίσης, παρασκευάζονται εγκλειστικά προϊόντα (μόνο με τα εγκλειστικά μέσα) άνευ σιδήρου, ακολουθώντας την ίδια ακριβώς μέθοδο με αυτή των εγκλειστικών προϊόντων σιδήρου και μετρώνται, με σκοπό να επιβεβαιωθεί ότι η απορρόφηση δεν επηρεάζεται (δεν υπάρχουν παρεμπόδισεις) από κάποιο εγκλειστικό μέσο.

#### 4.5.1.2. ΜΕΤΡΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ ΜΕΣΩ ΥΓΡΗΣ ΧΡΩΜΑΤΟΓΡΑΦΙΑΣ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Ο υπολογισμός της απόδοσης του εγκλεισμού της θειαμίνης, όπως και στην περίπτωση του σιδήρου πραγματοποιείται έμμεσα, μετρώντας την ποσότητα της θειαμίνης η οποία δεν δεσμεύεται από το φορέα.

Αρχικά, για τη μέτρηση της απόδοσης εγκλεισμού της θειαμίνης, απαιτείται η κατασκευή καμπύλης αναφοράς. Για το σκοπό αυτό μεταφέρονται σε ποτήρι ζέσεως 25 mL απιονισμένο νερό με σιφώνιο των 25 mL. Ζυγίζονται 25 mg θειαμίνης, προστίθενται στο ποτήρι ζέσεως και ακολουθεί ανάδευση έως ότου διαλυτοποιηθεί. Στη συνέχεια, παραλαμβάνεται με σύριγγα των 5 mL επαρκής ποσότητα του διαλύματος και διηθείται με χρήση φίλτρου PTFE 0,45 μm. Πραγματοποιείται η μέτρηση και λαμβάνεται η καμπύλη αναφοράς.



*Διάγραμμα 4.2 : Καμπύλη αναφοράς θειαμίνης*

Σύμφωνα με την επεξεργασία του γραφήματος προκύπτει η γραμμική συνάρτηση:

$$\mathbf{Area = 17216 C + 779,14}$$

Η προετοιμασία του δείγματος για τη μέτρησή του γίνεται ως εξής:

- 20 mL από το υπερκείμενο υγρό του εγκλειστικού διαλύματος, το οποίο έχει διαχωριστεί μετά τη διαδικασία της φυγοκέντρησης και έχει ογκομετρηθεί, μεταφέρεται με σιφώνιο των 20 mL σε ογκομετρική φιάλη των 25 mL.
- Η ογκομετρική φιάλη πληρώνεται μέχρι τη χαραγή με νερό, αναδεύεται και αφήνεται σε ηρεμία.
- Με χρήση φίλτρου PTFE 0,45 μm, το διάλυμα διηθείται και μεταγγίζεται απευθείας σε vial ώστε να μετρηθεί στη συσκευή Υγρής Χρωματογραφίας.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με χρήση HPLC (Hewlett Packard, 1100 FLD-UV detector, Waldbronn, Germany), με FLD-UV ανιχνευτή και στήλη Zorbax SB - C18 4.6 x 75 mm, 3.5 μm. Τα χαρακτηριστικά ήταν: 10-μL injection loop, η κινητή φάση ήταν νερό (0,025% TFA) : Ακετονιτρίλιο 99 : 1 και ροή 0.7 mL/min. Η ανίχνευση έγινε στα 220nm. Οι παράμετροι ρυθμίζονταν μέσω του προγράμματος HPLChemStation (Hewlett Packard, Germany).

## 4.5.2. ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΡΥΖΙΟΥ

### 4.5.2.1. ΜΕΤΡΗΣΗ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ

#### Χρώμα

Για τη μέτρηση του χρώματος των εμπλουτισμένων και μαγειρεμένων δειγμάτων ρυζιού χρησιμοποιήθηκε χρωματόμετρο CR-200 (Konica–Minolta, Japan). Το χρωματόμετρο βαθμονομείται με πρότυπη λευκή πλάκα και εξετάζει τις χρωματικές παραμέτρους  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , βάσει του συστήματος CIELAB.

Το χρωματικό μοντέλο CIELAB παρουσιάστηκε από την CIE (Commission International del' Eclairage) το 1976. Πρόκειται για ένα ομοιόμορφο οπτικά χρωματικό χώρο, ο οποίος προσομοιάζει καλύτερα από όλα τα χρωματικά συστήματα ή μοντέλα στην ανθρώπινη αντίληψη των χρωματικών διαφορών. Το κάθε χρώμα περιγράφεται από 3 κανάλια ή συντεταγμένες ή παράγοντες:  $L^*$ ,  $a^*$  και  $b^*$ . Ο παράγοντας  $L^*$  (Lightness) αποθηκεύει όλη την πληροφορία φωτεινότητας της εικόνας παίρνοντας τιμές από 0 (μαύρο) έως 100 (λευκό) ενώ οι παράγοντες  $a^*$  και  $b^*$  την πληροφορία χρώματος χωρίς να υπάρχουν για αυτά κάποια αριθμητικά όρια. Θετικές τιμές του  $a^*$  αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του κόκκινου, ενώ αρνητικές τιμές του  $a^*$  αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του πράσινου. Θετικές τιμές του  $b^*$  αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του κίτρινου και αρνητικές τιμές  $b^*$  αντιπροσωπεύουν αποχρώσεις του μπλε.

Η συνολική μεταβολή της οπτικής απόκρισης,  $\Delta E$ , υπολογίζεται από τις τιμές των παραμέτρων και εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$\Delta E = \sqrt{L^{*2} + a^{*2} + b^{*2}}$$

Η συνολική μεταβολή του χρώματος,  $\Delta C$ , υπολογίζεται:

$$\Delta C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

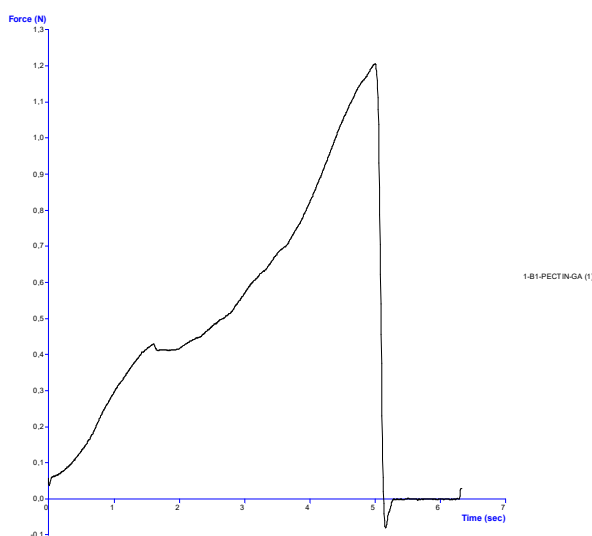
#### Υφή – σκληρότητα

Για την μέτρηση της σκληρότητας των μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού χρησιμοποιήθηκε αναλυτής υφής TA-XT2 (Stable Microsystems, Surrey, UK). Τοποθετείται στον αναλυτή το στέλεχος TA-45 Craftknife. Το δείγμα, αφού τοποθετηθεί σε ένα τρυβλίο, μεταφέρεται στην ειδική θέση του αναλυτή ώστε να πραγματοποιηθεί η μέτρηση. Η μέτρηση επαναλαμβάνεται 3-4 φορές, σε κάθε μία από τις οποίες μετατοπίζεται η θέση του δείγματος, έτσι ώστε να

ληφθούν μετρήσεις από όλο το δείγμα. Τα διαγράμματα των μετρήσεων εμφανίζονται στο πρόγραμμα που υπάρχει στον υπολογιστή με τον οποίο είναι συνδεδεμένος ο αναλυτής υφής. Η μορφή τους είναι παρόμοια με αυτή που παρουσιάζεται στην *Εικόνα 4.3*. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι παράμετροι με τις οποίες λειτουργεί το συγκεκριμένο πρόγραμμα.

**Πίνακας 4.2 : Τιμές παραμέτρων αναλυτή υφής**

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΤΙΜΗ
Test Mode	Compression
Pre-Test Speed	5 mm/s
Test Speed	1 mm/s
Post-Test Speed	10 mm/s
Target Mode	Distance
Distance	5 mm



*Εικόνα 4.3 : Διάγραμμα ανάλυσης υφής*

#### Ενεργότητα νερού

Η ενεργότητα νερού των μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού, εμπλουτισμένων και μη, μετρήθηκε με τη συσκευή Decagon technology, σε θερμοκρασία δωματίου.

### Υγρασία

Η υγρασία των δειγμάτων ρυζιού μετρήθηκε ως εξής:

- Τοποθετείται σκαφίδιο σε ηλεκτρονικό ζυγό και ζυγίζεται. Η ένδειξη καταγράφεται και ο ζυγός μηδενίζεται.
- Προστίθενται περίπου 5 g ρυζιού και καταγράφεται η τιμή/ζύγιση.
- Τοποθετείται το σκαφίδιο μαζί με το ρύζι σε κλίβανο ξήρανσης στους 105 °C για τουλάχιστον 24 h.
- Το δείγμα αφαιρείται από τον κλίβανο, ζυγίζεται και καταγράφεται η μέτρηση.

Η περιεχόμενη υγρασία υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$w(\%) = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} * 100$$

Όπου,

$m_1$ , η μάζα του σκαφιδίου

$m_2$ , η μάζα του σκαφιδίου μαζί με το ρύζι πριν την ξήρανση

$m_3$ , η μάζα του σκαφιδίου μαζί με το ρύζι μετά την ξήρανση

#### 4.5.2.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΣΤΟ ΡΥΖΙ

Ο προσδιορισμός του σιδήρου πραγματοποιήθηκε σε δείγματα μαγειρεμένου ρυζιού, σε δείγματα ξηρού ρυζιού και σε δείγματα ρυζάλευρου, εμπλουτισμένων και μη εμπλουτισμένων. Για το σκοπό αυτό εφαρμόστηκε η μέθοδος Φασματομετρίας Ατομικής Απορρόφησης (AAS: Atomic Absorption Spectrometry).

Για την ανάλυση των στοιχείων, το δείγμα θα πρέπει να βρίσκεται σε υγρή μορφή. Έτσι, για τη μετατροπή των στερεών δειγμάτων σε υγρά, απαιτείται μία προκατεργασία, η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση συσκευής μικροκυμάτων πέψης με οξέα. Η διαδικασία περιγράφεται ως εξής:

- Σκαφίδιο τοποθετείται σε ζυγό ακριβείας και μηδενίζεται το βάρος του.
- Ζυγίζονται 0,5 g δείγματος ξηρού ρυζιού, με ακρίβεια τέταρτου δεκαδικού ψηφίου, και σημειώνεται το βάρος του.
- Το δείγμα τοποθετείται σε ειδικό δοχείο που χρησιμοποιείται για την πέψη.
- Με σιφώνια των 10 mL και 2 mL, εισάγονται στο δοχείο 6 mL HNO<sub>3</sub> και 2 mL H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> αντίστοιχα.

- Το δοχείο κλείνεται με το καπάκι του και σφραγίζεται με τη βοήθεια ενός ειδικού περιστρεφόμενου κλειδιού και τοποθετείται στην περιστρεφόμενη βάση της συσκευής των μικροκυμάτων.
- Λαμβάνεται φροντίδα όλα τα δοχεία να είναι καλά σφραγισμένα στη συσκευή ώστε να μην μετακινηθούν κατά τη λειτουργία της. Αφού συνδεθεί ο αισθητήρας θερμοκρασίας, επιλέγεται το κατάλληλο πρόγραμμα λειτουργίας, το οποίο διαρκεί 90 min και τίθεται σε ισχύ.
- Μετά από 30 min, αφού έχει ολοκληρωθεί το πρόγραμμα, παραλαμβάνεται το δείγμα και μεταγγίζεται με χωνί σε ογκομετρική φιάλη των 25 mL. Η φιάλη πληρώνεται μέχρι τη χαραγή με απιονισμένο νερό και ανακινείται.
- Το υγρό μίγμα μεταγγίζεται σε πλαστικές φιάλες, ώστε να φυλαχθεί μέχρι την μέτρηση.

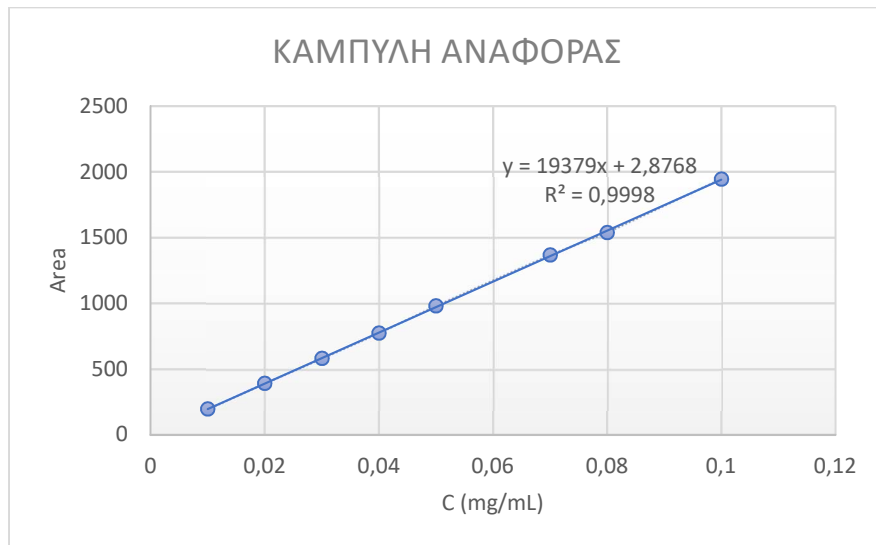
Σημειώνεται ότι η συσκευή μπορεί να επεξεργαστεί ταυτόχρονο 9 δείγματα, εκ των οποίων το 1 προτιμάται να είναι τυφλό δείγμα, δηλαδή μίγμα  $\text{HNO}_3$  και  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

#### 4.5.2.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ ΣΤΟ ΡΥΖΙ

Για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης θειαμίνης στο ρύζι απαιτείται η κατασκευή μίας επιπλέον καμπύλης αναφοράς, καθώς η απορρόφηση των δειγμάτων ρυζιού είναι πολύ μικρότερη από εκείνη του εγκλειστικού προϊόντος και δεν μπορούν να αποτυπωθούν στην ίδια καμπύλη. Για το σκοπό αυτό ακολουθείται η εξής διαδικασία:

- Ζυγίζονται 5 mg θειαμίνης και μεταφέρονται σε ποτήρι ζέσεως το οποίο περιέχει επαρκή ποσότητα απιονισμένου νερού μικρότερη από 50 mL.
- Το ποτήρι ζέσεως μεταφέρεται σε πλάκα ανάδευσης και το διάλυμα αναδεύεται με τη βοήθεια μαγνήτη μέχρι τελικής διάλυσης της θειαμίνης.
- Το διάλυμα μεταγγίζεται σε ογκομετρική φιάλη των 50 mL και ακολουθεί πλήρωση μέχρι τη χαραγή με απιονισμένο νερό.
- Με σύριγγα των 5 mL λαμβάνεται επαρκής ποσότητα του διαλύματος η οποία διηθείται με χρήση φίλτρου PTFE 0,45  $\mu\text{m}$ .
- Πραγματοποιείται η μέτρηση στον Υγρό Χρωματογράφο Υψηλής απόδοσης και λαμβάνεται η καμπύλη αναφοράς.





*Διάγραμμα 4.3 : Καμπύλη αναφοράς θειαμίνης*

Σύμφωνα με την επεξεργασία του γραφήματος προκύπτει η γραμμική συνάρτηση:

$$\text{Area} = 19379 C + 2,8768$$

Ο προσδιορισμός της θειαμίνης πραγματοποιήθηκε σε δείγματα μαγειρεμένου ρυζιού, εμπλουτισμένου και μη, μέσω της Υγρής Χρωματογραφίας Υψηλής απόδοσης (HPLC). Η διαδικασία είναι η ακόλουθη:

- Το εκάστοτε προϊόν ρυζιού αλέθεται με τη χρήση ηλεκτρικού μίξερ.
- Σε αναλυτικό ζυγό ζυγίζονται 2 g του αλεσμένου προϊόντος και μεταφέρονται σε δοκιμαστικό σωλήνα.
- Προστίθενται στο δοκιμαστικό σωλήνα 10 mL απιονισμένου νερού με σιφώνιο των 10 mL.
- Ο δοκιμαστικός σωλήνας αναδεύεται με χρήση του vortex για 1 min.
- Ακολούθως μεταφέρεται στη συσκευή των υπερήχων όπου παραμένει για 10 min.
- Μετά το πέρας των 10 min, το υπερκείμενο υγρό συλλέγεται και μεταγγίζεται στους ειδικούς δειγματοφορείς της φυγοκέντρου.
- Ζυγίζεται το βάρος του δείγματος και τοποθετείται αντιδιαμετρικά ένα δείγμα το οποίο περιέχει νερό αντίστοιχου βάρους. Ακολούθως πραγματοποιείται φυγοκέντρηση με ταχύτητα 6000 rpm για 15 min.
- Συλλέγεται το υπερκείμενο υγρό μετά τη φυγοκέντρηση και ογκομετρείται.
- Με σύριγγα των 5 mL συλλέγεται επαρκής ποσότητα του διαλύματος.

- Τοποθετείται ένα φίλτρο PTFE 0,45 μm στη σύριγγα και το διάλυμα διηθείται σε ένα vial, ώστε να μετρηθεί στον Υγρό Χρωματογράφο Υψηλής απόδοσης.
- Εάν το υπερκείμενο υγρό είναι αρκετά πυκνό και δεν μπορεί να περάσει μέσα από το φίλτρο, τότε αραιώνεται με κατάλληλη ποσότητα νερού και επαναλαμβάνεται η διήθηση.

#### 4.5.2.4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Η βιοδιαθεσιμότητα του σιδήρου προσδιορίζεται στα ξηρά και μαγειρεμένα δείγματα ρυζιού, εμπλουτισμένα και μη εμπλουτισμένα, ενώ η βιοδιαθεσιμότητα της θειαμίνης προσδιορίζεται στα δείγματα μαγειρεμένου ρυζιού, εμπλουτισμένα και μη. Ο προσδιορισμός πραγματοποιείται μέσω μίας μεθόδου *in-vitro* πέψης, κατά την οποία προσομοιάζεται η γαστρεντερική πέψη του οργανισμού, και έπειτα ακολουθεί η μέτρηση των θρεπτικών.

Η εκτέλεση της μεθόδου απαιτεί την παρασκευή κάποιων βοηθητικών διαλυμάτων τα οποία προσομοιώνουν τα γαστρεντερικά υγρά. Τα διαλύματα αυτά είναι τα εξής:

##### i. Διάλυμα πεψίνης:

- Σε ηλεκτρονικό ζυγό ζυγίζονται 16 g πεψίνης σε μορφή σκόνης.
- Η πεψίνη μεταφέρεται σε ποτήρι ζέσεως με επαρκή ποσότητα διαλύματος HCL 0,1N, μικρότερη όμως από 100 mL.
- Το ποτήρι τοποθετείται σε πλάκα ανάδευσης και με τη βοήθεια μαγνήτη αναδεύεται μέχρι τελικής διάλυσης.
- Το διάλυμα μεταγγίζεται σε ογκομετρική φιάλη των 100 mL και πληρώνεται με διάλυμα HCL 0,1N έως τη χαραγή.

##### ii. Διάλυμα παγκρεατίνης – χολικών συστατικών

- Σε ηλεκτρονικό ζυγό ζυγίζονται 4 g παγκρεατίνης και 25 g χολικών συστατικών, και τα 2 σε μορφή σκόνης.
- Τα αντιδραστήρια μεταφέρονται σε ποτήρι ζέσεως με επαρκή ποσότητα διαλύματος NaHCO<sub>3</sub> 0,1M, μικρότερη όμως από 1 L.
- Το ποτήρι τοποθετείται σε πλάκα ανάδευσης και με τη βοήθεια μαγνήτη αναδεύεται μέχρι τελικής διάλυσης.
- Το διάλυμα μεταγγίζεται σε ογκομετρική φιάλη του 1 L και πληρώνεται με διάλυμα NaHCO<sub>3</sub> 0,1M έως τη χαραγή.

Αφού παρασκευαστούν τα παραπάνω διαλύματα, πραγματοποιείται η προσομοίωση της πέψης με τον ακόλουθο τρόπο:

- Σε ηλεκτρονικό ζυγό ζυγίζονται 50 g ρυζιού, το οποίο έχει προηγουμένως υποστεί μία ελαφριά κονιοποίηση με χρήση γουδιού.
- Το ρύζι μεταφέρεται σε ποτήρι ζέσεως των 250 mL.
- Στο ποτήρι προστίθενται 100 mL απιονισμένο νερό και έπειτα προστίθενται, με χρήση πιπέτας, σταγόνες HCl 2N έως ότου το pH του διαλύματος να ρυθμιστεί στο 2. Για το σκοπό αυτό, καθ' όλη τη διάρκεια προσθήκης HCl 2N, το pH ελέγχεται με ηλεκτρονικό pH-μετρο.
- Το ποτήρι ζέσεως μεταφέρεται σε ανακινούμενο υδατόλουτρο στους 37 °C και τίθεται σε λειτουργία το πρόγραμμα κίνησής του.
- Προστίθενται στο διάλυμα 3,125 mL διαλύματος πεψίνης, ενώ το ποτήρι βρίσκεται εντός του υδατόλουτρου και αφήνεται εκεί για 2 h.
- Μετά το πέρας των 2 h, προστίθενται στο διάλυμα 75 mL απιονισμένου νερού.
- Με χρήση πιπέτας, προστίθενται στο διάλυμα σταγόνες NaHCO<sub>3</sub> 0,1M έως ότου το pH φτάσει στο 5 και η διαδικασία ελέγχεται με ηλεκτρονικό pH-μετρο.
- Προστίθενται με σιφώνιο 15 mL διαλύματος παγκρεατίνης-χολικών συστατικών και το διάλυμα αφήνεται στο υδατόλουτρο για 2 h.
- Το ποτήρι ζέσεως αφαιρείται από το υδατόλουτρο, το διάλυμα μεταγγίζεται στους ειδικούς δειγματοφορείς της φυγοκέντρου και ακολουθεί φυγοκέντρωση για 15 min.
- Το υπερκείμενο υγρό παραλαμβάνεται, ογκομετρείται και σημειώνεται ο όγκος του.
- Το στερεό κλάσμα τοποθετείται σε ξηραντήρα και παραμένει για 2 h στους 70 °C και για άλλες 2 h στους 50 °C.
- Εάν η ουσία προς προσδιορισμό είναι ο σίδηρος, τότε το ξηραμένο δείγμα μετράται με Φασματομετρία Ατομικής Απορρόφησης όπως περιεγράφηκε παραπάνω. Εάν η ουσία που πρέπει να προσδιοριστεί είναι η θειαμίνη, τότε η μέτρηση γίνεται στον Υγρό Χρωματογράφο Υψηλής απόδοσης, ακολουθώντας την προαναφερθείσα διαδικασία προσδιορισμού της θειαμίνης.

Μέσω της συγκέντρωσης του εκάστοτε θρεπτικού στο στερεό κλάσμα, υπολογίζεται σε κάθε περίπτωση η συνολική ποσότητα του θρεπτικού η οποία δεν απελευθερώνεται από το δείγμα ρυζιού.

## 4.6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

### 4.6.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ

Η απόδοση του εγκλεισμού του σιδήρου υπολογίζεται έμμεσα, αντιστοιχίζοντας την απορρόφηση του εκάστοτε δείγματος, μέσω της καμπύλης αναφοράς, σε μία συγκέντρωση του σιδήρου που διέφυγε των εγκλειστικών μέσων. Το υπερκείμενο υγρό ακολουθεί την παραπάνω διαδικασία και ως αποτέλεσμα λαμβάνεται η συγκέντρωση του σιδήρου που περιέχεται στα 25 mL της ογκομετρικής φιάλης. Έχοντας ογκομετρήσει τη συνολική ποσότητα του υπερκείμενου υγρού του προϊόντος, υπολογίζεται αναλογικά η ολική ποσότητα του σιδήρου η οποία παρέμεινε μη δεσμευμένη από τα εγκλειστικά μέσα. Αφαιρώντας αυτήν την ποσότητα από την αρχική ποσότητα σιδήρου που προστέθηκε στο διάλυμα των εγκλειστικών, βρίσκεται τελικά η ποσότητα σιδήρου η οποία παγιδεύτηκε από τα εγκλειστικά μέσα, δηλαδή ο δεσμευμένος σίδηρος.

Η απόδοση εγκλεισμού υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Απόδοση Εγκλεισμού \%} = \frac{\text{Δεσμευμένος σίδηρος (mg)}}{\text{Αρχικά προστιθέμενος σίδηρος (mg)}} \times 100$$

Η περιεκτικότητα των προϊόντων εγκλεισμού σε σίδηρο υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Περιεκτικότητα \% (w/w)} = \frac{\text{Δεσμευμένος σίδηρος (g)}}{\text{Προϊόν εγκλεισμού (g)}} \times 100$$

### 4.6.2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Η απόδοση του εγκλεισμού της θειαμίνης, υπολογίζεται επίσης έμμεσα, αντιστοιχίζοντας τις κορυφές των δειγμάτων, μέσω της καμπύλης αναφοράς, στη συγκέντρωση θειαμίνης η οποία διέφυγε των εγκλειστικών μέσων. Ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε, λαμβάνεται ως αποτέλεσμα η συγκέντρωση της θειαμίνης που περιέχεται στα 25 mL της ογκομετρικής φιάλης. Από τη συνολική ποσότητα του υπερκείμενου υγρού του προϊόντος που έχει ογκομετρηθεί, υπολογίζεται αναλογικά η ολική ποσότητα της θειαμίνης η οποία παρέμεινε μη δεσμευμένη από τα εγκλειστικά μέσα. Όπως και στην περίπτωση του σιδήρου, έτσι και εδώ η ποσότητα της θειαμίνης η οποία παγιδεύτηκε από τα εγκλειστικά μέσα

βρίσκεται αφαιρώντας την ποσότητα της μη δεσμευμένης θειαμίνης από την αρχική ποσότητα που προστέθηκε στο διάλυμα των εγκλειστικών.

Η απόδοση εγκλεισμού υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Απόδοση Εγκλεισμού (EE) \%} = \frac{\text{Δεσμευμένη θειαμίνη (mg)}}{\text{Αρχικά προστιθέμενη θειαμίνη (mg)}} \times 100$$

Η περιεκτικότητα των προϊόντων εγκλεισμού σε θειαμίνη υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Περιεκτικότητα \% (w/w)} = \frac{\text{Δεσμευμένη θειαμίνη (g)}}{\text{Προϊόν εγκλεισμού (g)}} \times 100$$

#### 4.6.3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Η βιοδιαθεσιμότητα των θρεπτικών υπολογίζεται έμμεσα μέσω της απορρόφησης του κλάσματος των θρεπτικών, το οποίο συγκρατείται από το ρύζι και ανιχνεύεται μέσω της Φασματομετρίας Ατομικής Απορρόφησης (AAS). Η συνολική ποσότητα των ευδιάλυτων θρεπτικών τα οποία απελευθερώνονται από τα δείγματα ρυζιού βρίσκεται ως η διαφορά του συνολικού περιεχόμενου σιδήρου ή της θειαμίνης, όπως βρέθηκε με τη μέθοδο AAS, από την ποσότητα σιδήρου ή θειαμίνης αντίστοιχα που συγκρατείται από το ρύζι.

Η βιοδιαθεσιμότητα των θρεπτικών υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Βιοδιαθεσιμότητα \%} = \frac{\text{Ευδιάλυτο θρεπτικό (mg)}}{\text{Συνολική ποσότητα θρεπτικού (mg)}} \times 100$$

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### 5.1. ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ

Στο παρόν κεφάλαιο, για τα μέσα εγκλεισμού θα χρησιμοποιούνται οι εξής συντομογραφίες:

MD: Μαλτοδεξτρίνη

GA: Αραβικό Κόμμα

MS: Τροποποιημένο Άμυλο

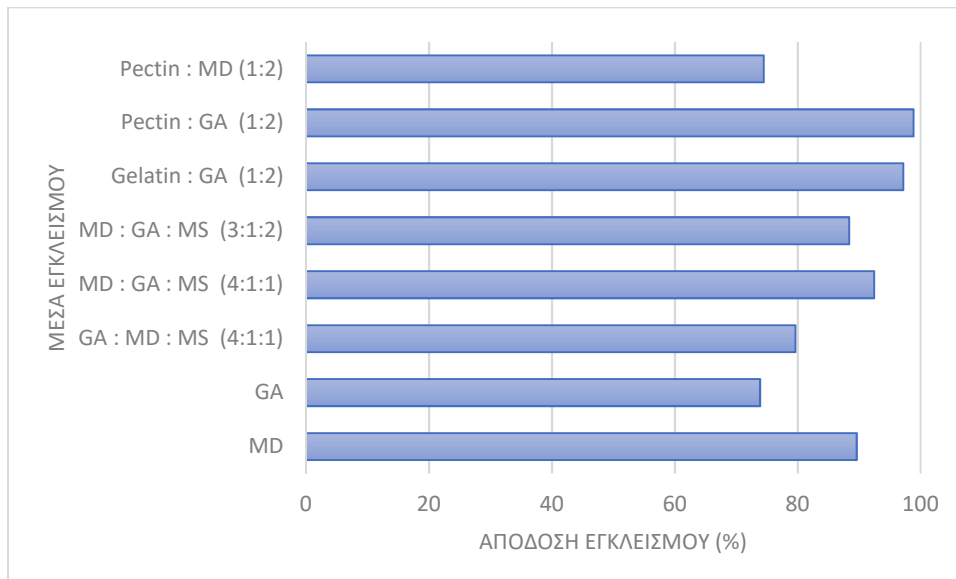
#### 5.1.1. ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΙΔΗΡΟΥ

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα ποσοστά της απόδοσης εγκλεισμού του σιδήρου και της περιεκτικότητας των προϊόντων εγκλεισμού σε σίδηρο, για κάθε χρησιμοποιούμενο μέσο εγκλεισμού.

**Πίνακας 5.1 : Απόδοση εγκλεισμού (%) και περιεκτικότητα σε σίδηρο (% w/w) των προϊόντων εγκλεισμού**

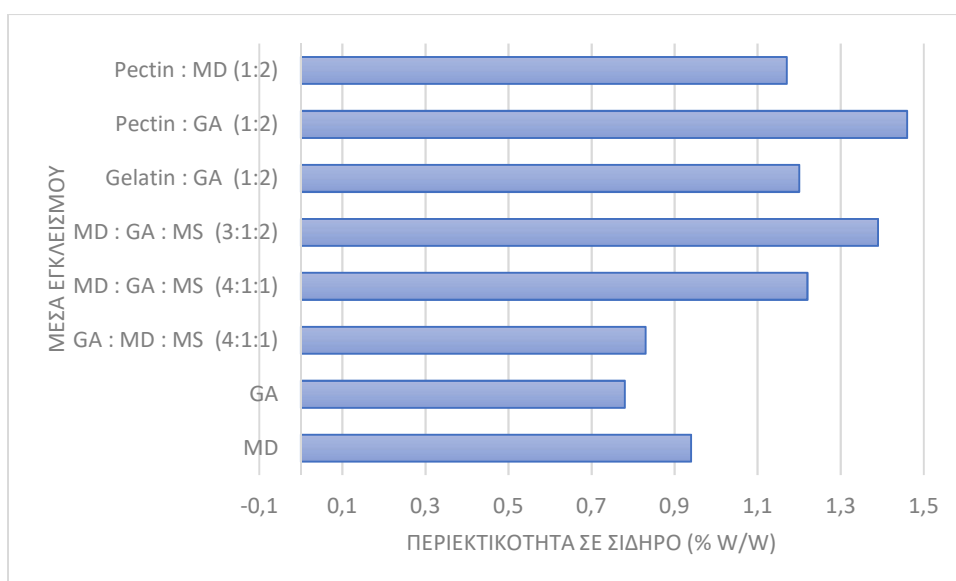
<b>ΜΕΣΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ</b>	<b>ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ (%)</b>	<b>ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΣΙΔΗΡΟ (% w/w)</b>
<b>MD</b>	89,60	0,94
<b>GA</b>	73,87	0,78
<b>GA : MD : MS (4:1:1)</b>	79,63	0,83
<b>MD : GA : MS (4:1:1)</b>	92,42	1,22
<b>MD : GA : MS (3:1:2)</b>	88,37	1,39
<b>Gelatin : GA (1:2)</b>	97,19	1,20
<b>Pectin : GA (1:2)</b>	98,84	1,46
<b>Pectin : MD (1:2)</b>	74,48	1,17

Για τη σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων κατασκευάζονται τα ακόλουθα διαγράμματα:



Διάγραμμα 5.1 : Απόδοση εγκλεισμού προϊόντων εγκλεισμού

Σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται ότι τα προϊόντα εγκλεισμού με τη μεγαλύτερη απόδοση είναι εκείνα τα οποία συντίθενται από τις πηκτικές ουσίες πηκτίνη και ζελατίνη, σε συνδυασμό με το αραβικό κόμμι. Επίσης, πολύ καλά ποσοστά συγκράτησης του σιδήρου παρουσιάζουν τα μίγματα μαλτοδεξτρίνης, αραβικού κόμμιος και τροποποιημένου αμύλου, και ιδιαίτερα σε αναλογίες 4 : 1 : 1 αντίστοιχα. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι όλα τα μέσα εγκλεισμού εμφανίζουν αρκετά υψηλές αποδόσεις, πάνω από 70% και μάλιστα ορισμένες προσεγγίζουν το άριστο, με κορυφαία απόδοση 98,84% (Pectin:GA).



Διάγραμμα 5.2 : Περιεκτικότητα σε σίδηρο των προϊόντων εγκλεισμού

Με βάση το *Διάγραμμα 5.2*, τα εγκλειστικά μέσα τα οποία παρουσιάζουν χαμηλότερη συγκράτηση σιδήρου είναι το αραβικό κόμμα (0,78%), η μαλτοδεξτρίνη (0,94%) και ο συνδυασμός GA:MD:MS (4:1:1) (0,83%). Σε όλα τα υπόλοιπα εγκλειστικά προϊόντα, η περιεκτικότητα σε σίδηρο είναι μεγαλύτερη, με κορυφαία περιεκτικότητα 1,46% την οποία εμφανίζει το προϊόν με εγκλειστικά μέσα Pectin:GA (1:2). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις η αναλογία πυρήνα : φορέα είναι 1 : 10, πράγμα που σημαίνει ότι σχεδιαστικά δεν υπάρχει κάποια διαφορά μεταξύ των πειραμάτων.

Τα αποτελέσματα αυτά, επιβεβαιώνονται βιβλιογραφικά (Gurta et al., 2014) σύμφωνα με έρευνα κατά την οποία παρατηρήθηκε ότι τα μίγματα των εγκλειστικών μέσων GA, MD, MS δίνουν καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά τον εγκλεισμό του σιδήρου, σε σχέση με τα εγκλειστικά μέσα τα οποία αποτελούνται 100% από GA και MD. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού των δύο αυτών φορέων εγκλεισμού.

#### 5.1.2. ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Για τον εγκλεισμό της θειαμίνης επιλέχθηκε το μίγμα εγκλειστικών μέσων με την καλύτερη απόδοση στον εγκλεισμό του σιδήρου, δηλαδή το μίγμα Pectin : GA (1:2). Η απόδοση του εγκλειστικού προϊόντος στην περίπτωση της θειαμίνης ήταν:

**Πίνακας 5.2 : Απόδοση εγκλεισμού (%) και περιεκτικότητα σε θειαμίνη (% w/w) του προϊόντος εγκλεισμού**

<b>ΜΕΣΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ</b>	<b>ΑΠΟΔΟΣΗ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ (%)</b>	<b>ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΕ ΘΕΙΑΜΙΝΗ (% w/w)</b>
<b>Pectin : GA</b>	58,26	3,34

Παρατηρείται ότι η απόδοση εγκλεισμού της θειαμίνης είναι αρκετά χαμηλότερη σε σχέση με την απόδοση εγκλεισμού σιδήρου με τα αντίστοιχα εγκλειστικά μέσα. Παρόλα αυτά, η περιεκτικότητα της θειαμίνης στο προϊόν εγκλεισμού είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή του σιδήρου. Η χαμηλή αυτή απόδοση εγκλεισμού πιθανώς οφείλεται στο μέσο εγκλεισμού. Βιβλιογραφικά, προτείνεται ο εγκλεισμός των υδατοδιαλυτών βιταμινών με μέσο εγκλεισμού τη μεθυλοκυτταρίνη ή άλλα παχιά στρώματα μέσων εγκλεισμού, τα οποία μειώνουν την υδατοπερατότητα των εγκλεισμένων προϊόντων. (Rahman, 2007, p. 549)



## 5.2. ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΕ ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΡΥΖΙΟΥ

### 5.2.1. ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

#### A) ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ

Ο εμπλουτισμός των προϊόντων ρυζιού με εγκλεισμένο σίδηρο εφαρμόστηκε στα προϊόντα εγκλεισμού στα οποία βρέθηκε μεγαλύτερη απόδοση. Συγκεκριμένα:

**Πίνακας 5.3 : Προϊόντα ρυζιού και προϊόντα εγκλεισμού με τα οποία εμπλουτίστηκαν**

ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΡΥΖΙΟΥ	ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ
Agriño έτοιμο σε 10 min	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pectin : GA</li><li>• MD : GA : MS</li></ul>
Καστανό ρύζι	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pectin : GA</li><li>• MD : GA : MS</li></ul>
Λευκό ρύζι	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pectin : GA</li><li>• MD : GA : MS</li></ul>
Ρύζι Parboiled	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pectin : GA</li><li>• MD : GA : MS</li></ul>
Ρυζάλευρο λευκό	<ul style="list-style-type: none"><li>• Pectin : GA</li><li>• MD : GA : MS</li><li>• Gelatin : GA</li></ul>

Η περιεκτικότητα του σιδήρου ανιχνεύτηκε σε όλα τα προϊόντα εγκλεισμού, τόσο στα ξηρά εμπλουτισμένα δείγματα όσο και στα μαγειρεμένα. Στο ρυζάλευρο, μετρήθηκε η περιεκτικότητα σε σίδηρο μετά την ξήρανσή του. Επίσης, μετρήθηκε η περιεκτικότητα όλων των προϊόντων ρυζιού, ξηρών και μαγειρεμένων, καθώς και του ρυζάλειου πριν τον εμπλουτισμό. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.4 και στον Πίνακα 5.5.

**Πίνακας 5.4 : Περιεκτικότητα σιδήρου (mg/100g) στα προϊόντα ρυζιού πριν το μαγείρεμα**

ΠΡΟΪΟΝ ΡΥΖΙΟΥ	ANEY ΣΙΔΗΡΟΥ	ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ	
		Pectin : GA	MD : GA : MS
<b>Agrino έτοιμο σε 10 min</b>	1,42	25,50	21,43
<b>Καστανό ρύζι</b>	1,63	25,50	24,10
<b>Λευκό ρύζι</b>	0,66	23,50	30,70
<b>Ρύζι Parboiled</b>	0,75	22,00	22,28

**Πίνακας 5.5 : Περιεκτικότητα σιδήρου (mg/100g) στα προϊόντα ρυζιού μετά το μαγείρεμα**

ΠΡΟΪΟΝ ΡΥΖΙΟΥ	ANEY ΣΙΔΗΡΟΥ	ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ	
		Pectin : GA	MD : GA : MS
<b>Agrino έτοιμο σε 10 min</b>	1,06	25,50	21,35
<b>Καστανό ρύζι</b>	1,39	24,50	17,03
<b>Λευκό ρύζι</b>	0,37	22,50	18,55
<b>Ρύζι Parboiled</b>	0,44	22,00	18,38

**Πίνακας 5.6 : Περιεκτικότητα σιδήρου (mg/100g) στο ρυζάλευρο**

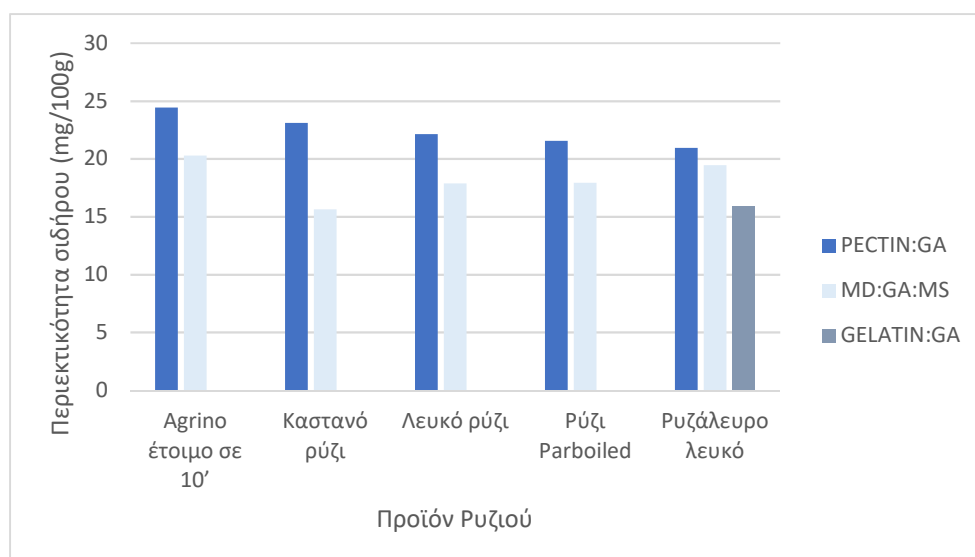
ΠΡΟΪΟΝ ΡΥΖΙΟΥ	ANEY ΣΙΔΗΡΟΥ	ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ		
		Pectin : GA	MD : GA : MS	Gelatin : GA
<b>Ρυζάλευρο λευκό</b>	0,33	21,29	19,78	16,26

Με βάση τα παραπάνω, κατασκευάζεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας ο οποίος περιέχει τις τελικές καθαρές ποσότητες εμπλουτισμού στα 100 g προϊόντος ρυζιού.

**Πίνακας 5.7 : Καθαρή ποσότητα εμπλουτισμού (mg/100g)**

ΠΡΟΪΟΝ ΡΥΖΙΟΥ	ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ		
	Pectin : GA	MD : GA : MS	Gelatin : GA
<b>Agrino έτοιμο σε 10 min</b>	24,44	20,29	-
<b>Καστανό ρύζι</b>	23,11	15,64	-
<b>Λευκό ρύζι</b>	22,13	17,89	-
<b>Ρύζι Parboiled</b>	21,56	17,94	-
<b>Ρυζάλευρο λευκό</b>	20,96	19,45	15,93

Από τα δεδομένα του Πίνακα 5.7 καταστρώνεται ένα διάγραμμα με σκοπό τη σύγκριση της περιεκτικότητας του σιδήρου ανάλογα με το προϊόν ρυζιού και με το προϊόν εγκλεισμού.



*Διάγραμμα 5.3 : Περιεκτικότητα σε σίδηρο προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με 25 mg/100 g*

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5.3, η περιεκτικότητα των προϊόντων ρυζιού σε σίδηρο επηρεάζεται αρκετά από το προϊόν εγκλεισμού. Σε όλους τους τύπους ρυζιού, η διαφορά στην ποσότητα εμπλουτισμού είναι περίπου 5 mg/100g, εκτός από το ρυζάλευρο όπου η διαφορά ανάμεσα στα δύο προϊόντα εγκλεισμού είναι ελάχιστη (1,51mg/100g). Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από τη στατιστική επεξεργασία με ανάλυση διακύμανσης δύο παραγόντων (ANOVA), σύμφωνα με την οποία υπάρχει σημαντική διαφορά ανάμεσα στα δύο εγκλειστικά υλικά. Ο τύπος του προϊόντος ρυζιού, αντιθέτως, δεν φαίνεται να επηρεάζει

την περιεκτικότητα σε σίδηρο, όπως φαίνεται και από τη στατιστική επεξεργασία (Παράρτημα 1, Εικόνα 1).

#### Β) ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Το προϊόν εγκλεισμού με το οποίο εφαρμόστηκε ο εμπλουτισμός των προϊόντων ρυζιού με θειαμίνη είναι το μίγμα Pectin:GA (1:2). Η περιεκτικότητα της θειαμίνης ανιχνεύτηκε σε όλα τα ρύζια, στα μαγειρεμένα εμπλουτισμένα και μη δείγματα.

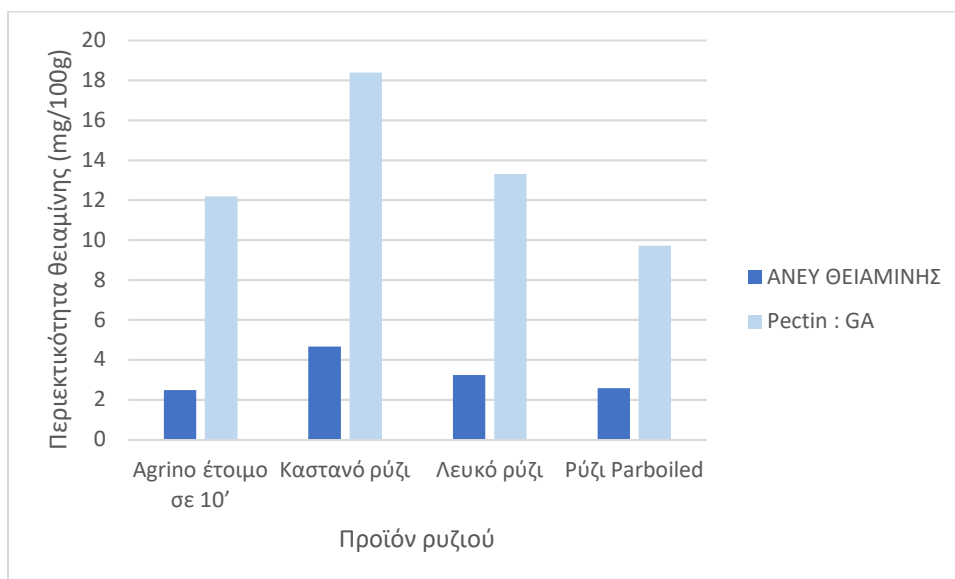
**Πίνακας 5.8 : Περιεκτικότητα θειαμίνης (mg/100g) στα προϊόντα ρυζιού μετά το μαγείρεμα**

ΠΡΟΪΟΝ ΡΥΖΙΟΥ	ΑΝΕΥ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ	Pectin : GA
<b>Agrino έτοιμο σε 10 min</b>	2,48	12,18
<b>Καστανό ρύζι</b>	4,66	18,39
<b>Λευκό ρύζι</b>	3,23	13,30
<b>Ρύζι Parboiled</b>	2,58	9,71

**Πίνακας 5.9 : Καθαρή ποσότητα θειαμίνης (mg/100g) στα προϊόντα ρυζιού μετά το μαγείρεμα**

ΠΡΟΪΟΝ ΡΥΖΙΟΥ	ΚΑΘΑΡΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ
<b>Agrino έτοιμο σε 10 min</b>	9,70
<b>Καστανό ρύζι</b>	13,73
<b>Λευκό ρύζι</b>	10,07
<b>Ρύζι Parboiled</b>	7,13

Με τα δεδομένα του Πίνακα 5.8 κατασκευάζεται το παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.4 : Περιεκτικότητα σε θειαμίνη προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με 25 mg/100 g

Με βάση το παραπάνω διάγραμμα, φαίνεται ότι η περιεκτικότητα σε θειαμίνη των εμπλουτισμένων προϊόντων ρυζιού είναι χαμηλότερη από την αναμενόμενη. Αν όμως ληφθεί υπόψη η απόδοση εγκλεισμού της θειαμίνης, η οποία είναι 58,26%, τα παραπάνω αποτελέσματα χαρακτηρίζονται ως επιτυχή. Συγκεκριμένα, ο εμπλουτισμός του καστανού ρυζιού μπορεί να θεωρηθεί άριστος, καθώς η καθαρή ποσότητα της προστιθέμενης θειαμίνης (13,73 mg), σχεδόν ταυτίζεται με τη μέγιστη δυνατή ποσότητα θειαμίνης με βάση την απόδοση του εγκλεισμού (14,57 mg).

## 5.2.2. ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ ΚΑΙ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

### A) ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΣΙΔΗΡΟΥ

Τα αποτελέσματα της μελέτης της βιοδιαθεσιμότητας του σιδήρου είναι τα εξής:

**Πίνακας 5.10 : Βιοδιαθεσιμότητα σιδήρου (mg/100g) στα εμπλουτισμένα προϊόντα ρυζιού μετά το μαγείρεμα**

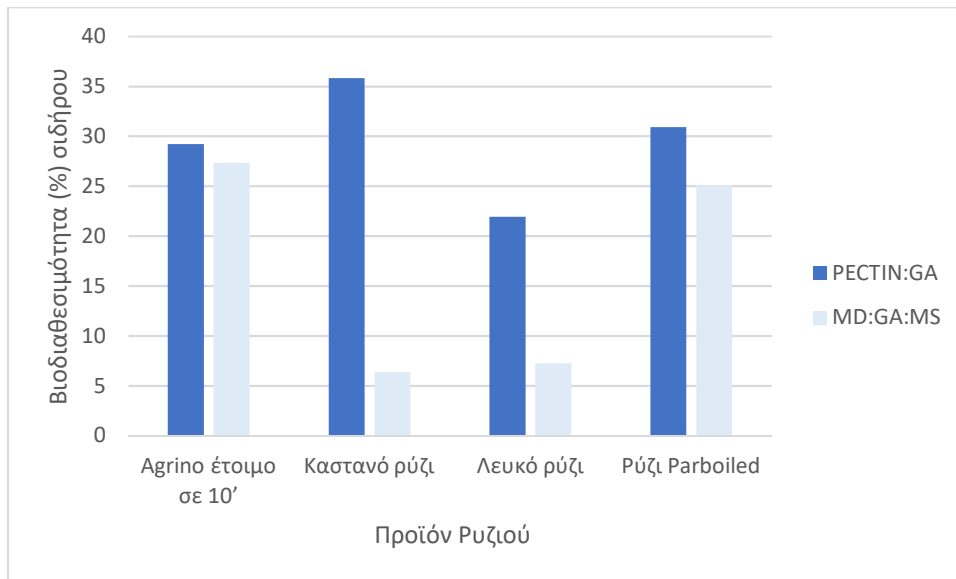
ΠΡΟΪΟΝ ΡΥΖΙΟΥ	ΑΝΕΥ ΣΙΔΗΡΟΥ	ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ	
		Pectin : GA	MD : GA : MS
<b>Agrino έτοιμο σε 10 min</b>	0,78	7,74	6,95
<b>Καστανό ρύζι</b>	0,97	8,78	1,46
<b>Λευκό ρύζι</b>	0,26	4,93	1,58
<b>Ρύζι Parboiled</b>	0,33	6,80	5,33

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα και τα αποτελέσματα του Πίνακα 5.5, υπολογίζεται το ποσοστό της βιοδιαθεσιμότητας του σιδήρου στα προϊόντα ρυζιού.

**Πίνακας 5.11 : Βιοδιαθεσιμότητα (%) σιδήρου στα εμπλουτισμένα προϊόντα ρυζιού μετά το μαγείρεμα**

ΠΡΟΪΟΝ ΡΥΖΙΟΥ	ΑΝΕΥ ΣΙΔΗΡΟΥ	ΠΡΟΪΟΝΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ	
		Pectin : GA	MD : GA : MS
<b>Agrino έτοιμο σε 10 min</b>	0,55	29,21	27,31
<b>Καστανό ρύζι</b>	0,67	35,82	6,36
<b>Λευκό ρύζι</b>	0,14	21,93	7,24
<b>Ρύζι Parboiled</b>	0,19	30,90	25,08

Ακολούθως κατασκευάζεται το διάγραμμα:



Διάγραμμα 5.5 : Βιοδιαθεσιμότητα (%) σιδήρου στα προϊόντα ρυζιού

Όπως γίνεται κατανοητό από το παραπάνω διάγραμμα, τα ποσοστά της βιοδιαθεσιμότητας του σιδήρου εμφανίζουν διακυμάνσεις τόσο ανάλογα με το προϊόν εγκλεισμού όσο και τον τύπο ρυζιού, οι οποίες ωστόσο δεν θεωρούνται στατιστικά σημαντικές (Παράρτημα 2, Εικόνα 2). Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα δύο ρύζια Parboiled εμφανίζουν υψηλά ποσοστά βιοδιαθεσιμότητας στην περίπτωση του εγκλειστικού μίγματος MD:GA:MS, σε αντίθεση με τα δύο άλλα ρύζια στα οποία το ποσοστό αυτό είναι αρκετά χαμηλό (6-7%).

## B) ΒΙΟΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΘΕΙΑΜΙΝΗΣ

Τα αποτελέσματα της μελέτης της βιοδιαθεσιμότητας της θειαμίνης είναι τα εξής:

*Πίνακας 5.12 : Βιοδιαθεσιμότητα θειαμίνης (mg/100g) στα εμπλουτισμένα προϊόντα ρυζιού μετά το μαγείρεμα*

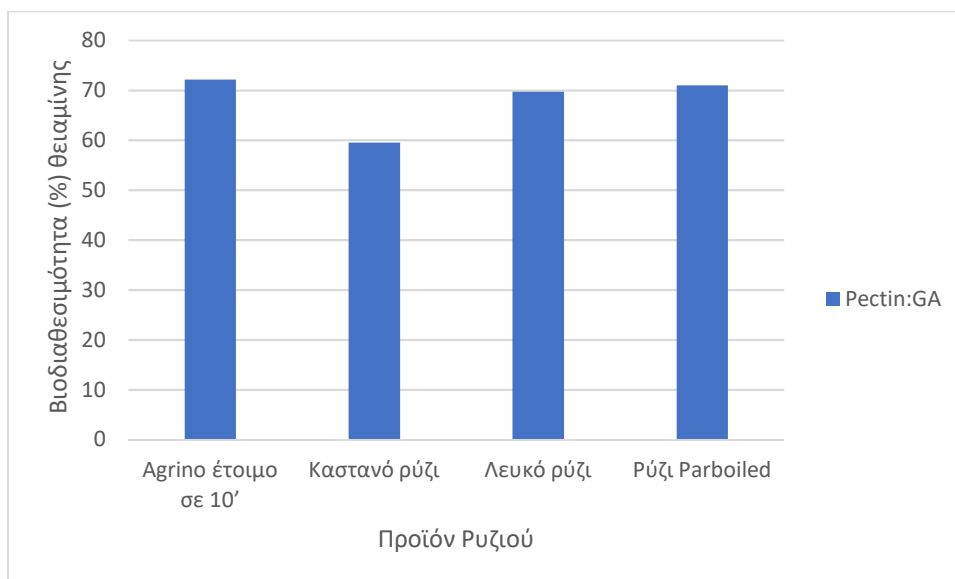
<b>ΠΡΟΪΟΝ ΡΥΖΙΟΥ</b>	<b>Pectin : GA</b>
<b>Agrino έτοιμο σε 10 min</b>	8,79
<b>Καστανό ρύζι</b>	10,95
<b>Λευκό ρύζι</b>	9,28
<b>Ρύζι Parboiled</b>	6,90

*Πίνακας 5.13 : Βιοδιαθεσιμότητα (%) θειαμίνης στα εμπλουτισμένα προϊόντα ρυζιού μετά το μαγείρεμα*

<b>ΠΡΟΪΟΝ ΡΥΖΙΟΥ</b>	<b>Pectin : GA</b>
<b>Agrino έτοιμο σε 10 min</b>	72,16
<b>Καστανό ρύζι</b>	59,52
<b>Λευκό ρύζι</b>	69,74
<b>Ρύζι Parboiled</b>	71,03

Με βάση τα παραπάνω κατασκευάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα:



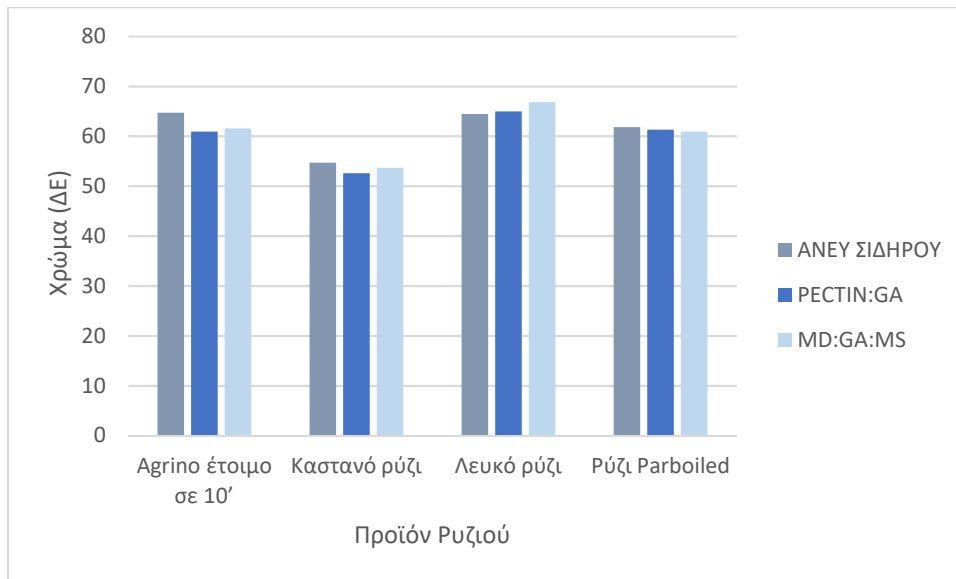


*Διάγραμμα 5.6 : Βιοδιαθεσιμότητα (%) θειαμίνης στα προϊόντα ρυζιού*

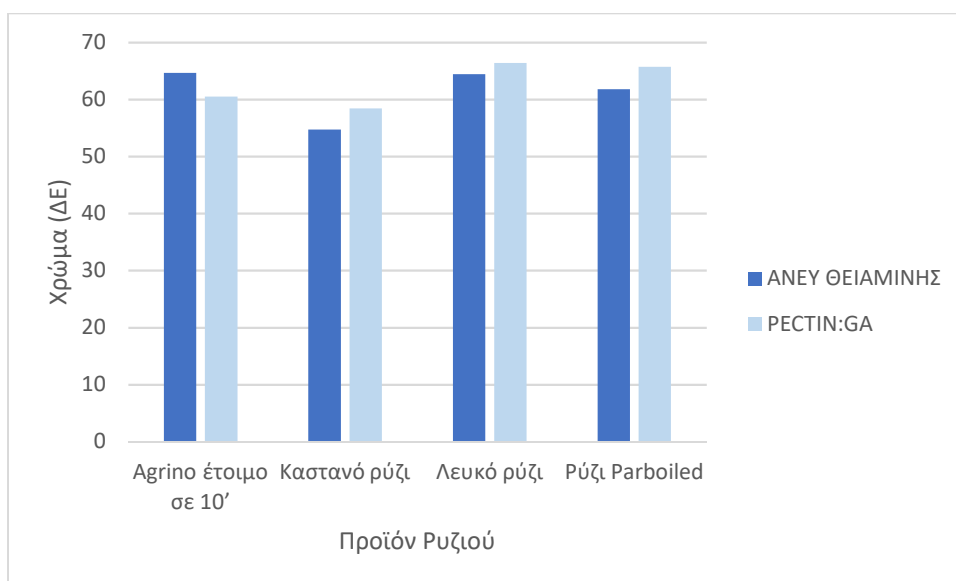
Σύμφωνα με το *Διάγραμμα 5.6* το ποσοστό της βιοδιαθεσιμότητας της θειαμίνης σε όλους τους τύπους ρυζιού είναι αρκετά υψηλό, ειδικά σε σύγκριση με τα ποσοστά βιοδιαθεσιμότητας του σιδήρου. Δεν παρατηρείται μεγάλη διακύμανση στα ποσοστά ανάμεσα στα προϊόντα ρυζιού, εκτός από το καστανό ρύζι στο οποίο το ποσοστό βιοδιαθεσιμότητας είναι περίπου 10% πιο χαμηλό από τους υπόλοιπους τύπους ρυζιού.

### 5.2.3. ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΘΡΕΠΤΙΚΩΝ ΣΤΟ ΧΡΩΜΑ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ

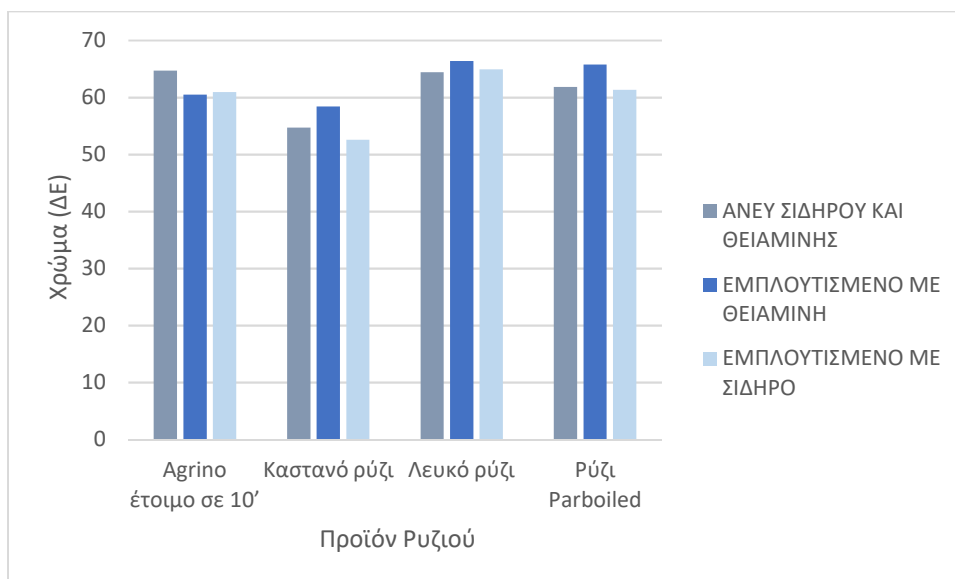
Το χρώμα των προϊόντων ρυζιού μελετάται ως προς την επίδραση των προϊόντων εγκλεισμού σε σχέση με το μη εμπλουτισμένο ρύζι, καθώς και ως προς την επίδραση του εμπλουτισμένου σιδήρου και της θειαμίνης, όσον αφορά το κοινό εγκλειστικό μίγμα, Pectin:GA. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα.



Διάγραμμα 5.7 : Χρώμα μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με σίδηρο



Διάγραμμα 5.8 : Χρώμα μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με θειαμίνη

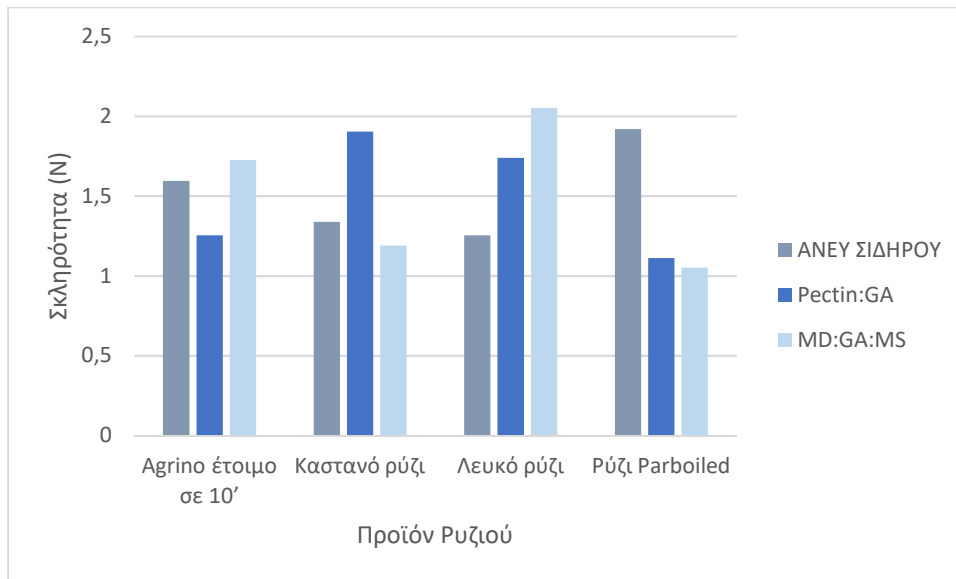


Διάγραμμα 5.9 : Χρώμα μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με σίδηρο και θειαμίνη με εγκλειστικό μίγμα Pectin:GA

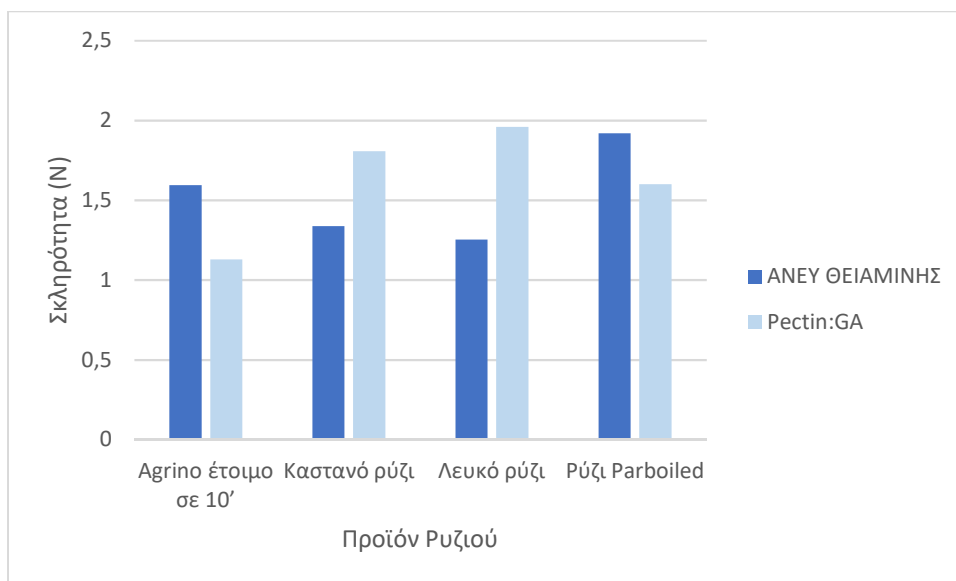
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, το χρώμα των μαγειρεμένων ρυζιών ουσιαστικά δεν επηρεάζεται τόσο από το είδος του εγκλειστικού προϊόντος, όσο και από το είδος του θρεπτικού, δηλαδή το σίδηρο και τη θειαμίνη. Παράλληλα, μέσω οπτικής εκτίμησης, δεν παρατηρήθηκαν χρωματικές διαφορές ή δυσχρωμίες ανάμεσα στα εμπλουτισμένα και μη εμπλουτισμένα προϊόντα ρυζιού.

#### 5.2.4. ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ

Η σκληρότητα των προϊόντων ρυζιού μελετάται ως προς την επίδραση των προϊόντων εγκλεισμού, και του εμπλουτισμού γενικότερα.



Διάγραμμα 5.10 : Σκληρότητα μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με σίδηρο

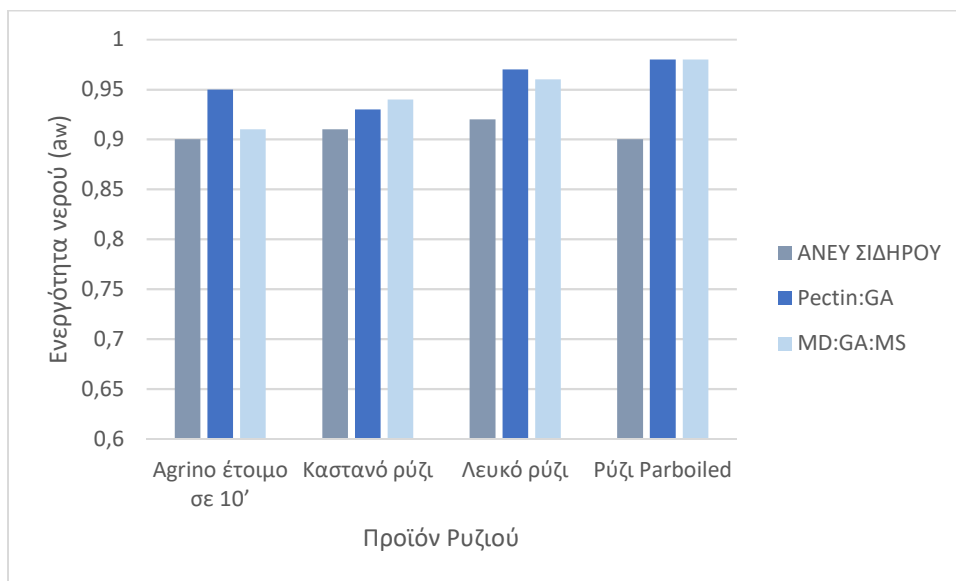


Διάγραμμα 5.11 : Σκληρότητα μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με θειαμίνη

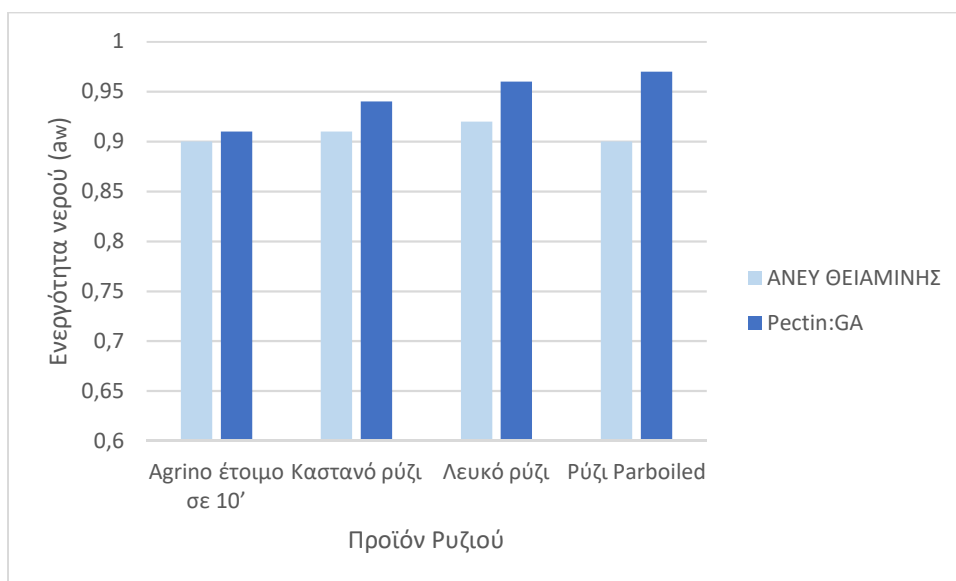
Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια σταθερή διακύμανση της σκληρότητας των προϊόντων ρυζιού που να οφείλεται στα διαφορετικά προϊόντα εγκλεισμού. Αυτό πιθανώς οφείλεται στο χρόνο βρασμού του εκάστοτε προϊόντος ρυζιού, ο οποίος επηρεάζει άμεσα τη σκληρότητα του ρυζιού.

## 5.2.5. ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ

Μελετάται η επίδραση που έχουν τα διαφορετικά προϊόντα εγκλεισμού στην ενεργότητα νερού ( $a_w$ ) για κάθε προϊόν εγκλεισμού. Για αυτό το σκοπό κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα:



Διάγραμμα 5.12 : Ενεργότητα νερού μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με σίδηρο

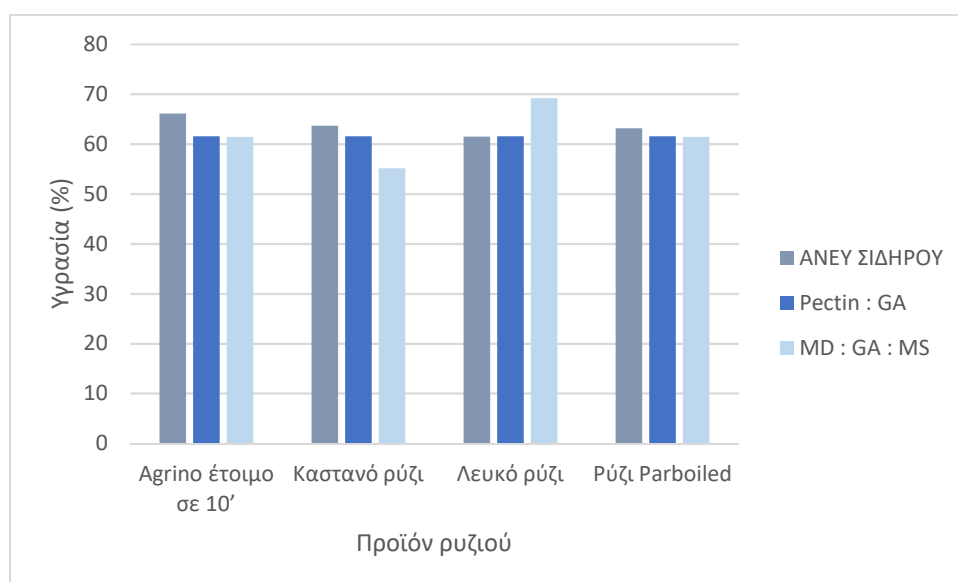


Διάγραμμα 5.13 : Ενεργότητα νερού μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με θειαμίνη

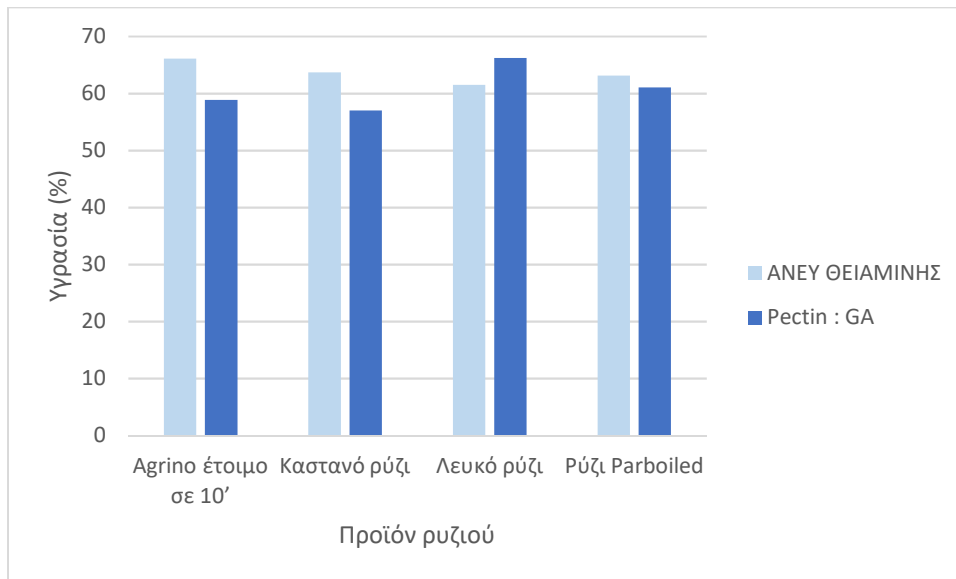
Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει ότι η ενεργότητα του νερού είναι μικρότερη στα μη εμπλουτισμένα ρύζια, σε όλες τις περιπτώσεις εγκλειστικών προϊόντων και θρεπτικών. Ωστόσο, η διαφορά αυτή είναι αρκετά μικρή και μπορεί να θεωρηθεί μη σημαντική.

#### 5.2.6. ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΥΓΡΑΣΙΑ ΤΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΡΥΖΙΟΥ

Η υγρασία των μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού μελετάται ως προς την επίδραση των προϊόντων εγκλεισμού, τόσο στον εμπλουτισμό σιδήρου όσο στον εμπλουτισμό θειαμίνης.



Διάγραμμα 5.14 : Υγρασία μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με σίδηρο



Διάγραμμα 5.15 : Υγρασία μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού εμπλουτισμένων με θειαμίνη

Σύμφωνα με τα διαγράμματα, η υγρασία των προϊόντων ρυζιού δε φαίνεται να επηρεάζεται από τον εμπλουτισμό με τα διάφορα προϊόντα εγκλεισμού.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

---

### 6.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο εγκλεισμός του σιδήρου και της θειαμίνης και η ενσωμάτωση των προϊόντων εγκλεισμού σε προϊόντα ρυζιού. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε εγκλεισμός θεικού σιδήρου ( $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ) και θειαμίνης σε ποικιλία μέσων εγκλεισμού με μία τροποποιημένη μέθοδο εξάτμισης διαλύτη. Τα εγκλειστικά μέσα τα οποία χρησιμοποιούνται για τον εγκλεισμό είναι μαλτοδεξτρίνη, αραβικό κόμμα, τροποποιημένο άμυλο, πηκτίνη και ζελατίνη. Για τον ψεκασμό των διαλυμάτων φορέα : πυρήνα χρησιμοποιείται αιθανόλη 96%. Στη συνέχεια, επιλεγμένα προϊόντα εγκλεισμού ενσωματώθηκαν με τη μέθοδο της εμβάπτισης σε προϊόντα ρυζιού και με τη μέθοδο της ανάμιξης σε ρυζάλευρο, σε κατάλληλες ποσότητες, ώστε να εμπλουτιστούν κατά 25 mg ανά 100 g, τόσο στην περίπτωση του σιδήρου όσο και στην περίπτωση της θειαμίνης. Ακολούθως, μαγειρεύτηκαν τόσο τα εμπλουτισμένα προϊόντα ρυζιού όσο και τα μη εμπλουτισμένα, ώστε να χρησιμοποιηθούν ως τυφλά δείγματα. Επίσης, μελετήθηκε η βιοδιαθεσιμότητα των θρεπτικών με μία μέθοδο *in vitro* πέψης.

Στόχος της διπλωματικής εργασίας ήταν η αξιολόγηση και η σύγκριση των προϊόντων εγκλεισμού ως προς την απόδοση εγκλεισμού του σιδήρου και της θειαμίνης. Επίσης, εξετάστηκε η καταλληλότητα του εγκλεισμού ως μεθόδου εμπλουτισμού του ρυζιού με σίδηρο και θειαμίνη, με σκοπό την παραγωγή ποιοτικά αναβαθμισμένων προϊόντων τα οποία όμως να διατηρούν τα οργανοληπτικά και ποιοτικά τους χαρακτηριστικά. Με αυτόν τον τρόπο θα μπορούσε να προληφθεί η έλλειψη σιδήρου και θειαμίνης, που προκαλούν δύο ευρέως διαδεδομένες ασθένειες.

Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν ως προς την απόδοση των προϊόντων εγκλεισμού είναι τα ακόλουθα. Οι αποδόσεις της διαδικασίας του εγκλεισμού σιδήρου κυμαίνονται από 73,87% έως 98,84%. Τα καλύτερα αποτελέσματα αποδίδονται σε προϊόντα εγκλεισμού με βασικά εγκλειστικά συστατικά τις ουσίες πηκτίνη και ζελατίνη, σε συνδυασμό με το αραβικό κόμμα, που παρέχουν απόδοση εγκλεισμού πάνω από 97%. Το γεγονός αυτό καθιστά τον συνδυασμό του αραβικού κόμματος και της πηκτίνης ή της ζελατίνης ως εξαιρετική επιλογή εγκλειστικού μέσου του σιδήρου. Όσον αφορά τη θειαμίνη, χρησιμοποιήθηκε ως εγκλειστικό μέσο το μίγμα Πηκτίνη : Αραβικό κόμμα (1 : 2), με απόδοση 58,26%. Η απόδοση αυτή αν και δεν ήταν αρκετά ικανοποιητική, θεωρείται αποδεκτή.



Τα πειράματα εμπλουτισμού των προϊόντων ρυζιού οδηγούν στα εξής συμπεράσματα. Στην περίπτωση του εμπλουτισμού του σιδήρου (25 mg/100g), το εγκλεισμένο προϊόν σε φορέα Πηκτίνη : Αραβικό κόμμα (1:2) βρέθηκε να έχει αρκετά καλύτερη συγκράτηση, με εύρος περιεκτικότητας 20,96 mg/100g έως 24,44 mg/100g σε σχέση με το εγκλεισμένο προϊόν σε φορέα Μαλτοδεξτρίνη : Αραβικό κόμμα : Τροποποιημένο άμυλο (4:1:1) όπου η περιεκτικότητα κυμαίνεται από 15,64 mg Fe/100g έως 20,29 mg Fe/100g. Η διαφορά της συγκράτησης ανάμεσα στα προϊόντα ρυζιού δεν κρίθηκε σημαντική. Στην περίπτωση του εμπλουτισμού της θειαμίνης η συγκράτηση δεν φαίνεται τόσο καλή, καθώς η περιεκτικότητα της θειαμίνης κυμαίνεται από 7,13 mg/100g έως 13,73 mg/100g, με θεωρητική περιεκτικότητα τα 25 mg/100g. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη την απόδοση εγκλεισμού η μέγιστη περιεκτικότητα των προϊόντων ρυζιού σε θειαμίνη είναι 14,57 mg/100g. Επομένως η περιεκτικότητα του καστανού ρυζιού σε θειαμίνη (13,73 mg/100g) πλησιάζει πολύ τη μέγιστη δυνατή περιεκτικότητα, καθιστώντας τη συγκράτηση εξαιρετική.

Τα πειράματα που αφορούν τη βιοδιαθεσιμότητα των θρεπτικών οδηγούν στο συμπέρασμα ότι με τον εμπλουτισμό εγκλεισμένων θρεπτικών ενισχύεται σημαντικά η βιοδιαθεσιμότητά τους. Η βιοδιαθεσιμότητα του σιδήρου για το φορέα εγκλεισμού Πηκτίνη : Αραβικό κόμμα κυμαίνεται σε ποσοστά από 21,93% έως 35,82%, ενώ για το φορέα εγκλεισμού Μαλτοδεξτρίνη : Αραβικό κόμμα : Τροποποιημένο άμυλο σε ποσοστά από 6,36% έως 27,31%. Λιγότερο ικανοποιητικά κρίνονται τα ποσοστά βιοδιαθεσιμότητας του σιδήρου όπου ως φορέας εγκλεισμού χρησιμοποιείται το μίγμα Μαλτοδεξτρίνη : Αραβικό κόμμα : Τροποποιημένο άμυλο και ιδιαίτερα στην περίπτωση του καστανού και του λευκού ρυζιού, τα οποία είναι 6,36% και 7,24% αντίστοιχα. Η βιοδιαθεσιμότητα της θειαμίνης βρέθηκε εξαιρετικά υψηλή, με ποσοστά από 59,52% έως 72,16%. Όπως και στη βιοδιαθεσιμότητα του σιδήρου, έτσι και στη θειαμίνη τα προϊόντα ρυζιού με τα υψηλότερα ποσοστά είναι τα δύο ρύζια Parboiled.

Το χρώμα, τα χαρακτηριστικά υφής και η ενεργότητα νερού των μαγειρεμένων προϊόντων ρυζιού δεν επηρεάζονται σχετικά από την προσθήκη σιδήρου και θειαμίνης. Τόσο μέσω των κατάλληλων μετρήσεων όσο μέσω της οπτικής εκτίμησης, η διαφορά αυτών των ιδιοτήτων στα εμπλουτισμένα και μη προϊόντα δεν κρίνεται σημαντική.

## 6.2. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αποδείχθηκε ότι ο εμπλουτισμός των προϊόντων ρυζιού με εγκλεισμένο σίδηρο και εγκλεισμένη θειαμίνη αποτελεί μία πολλά υποσχόμενη πρωτοποριακή μέθοδο πρόληψης και αντιμετώπισης της έλλειψης σιδήρου και θειαμίνης που πλήττουν μεγάλο μέρος του πληθυσμού παγκοσμίως. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας των παραγόντων που εμπλέκονται στο θέμα αυτό και της έλλειψης επαρκούς βάσης δεδομένων σχετικά με αυτό, κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω διερεύνησή του.

Ειδικότερα, περαιτέρω διερεύνηση μπορεί να γίνει προς βελτιστοποίηση της μεθόδου εγκλεισμού που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει η δυνατότητα να επιχειρηθούν διαφορετικοί φορείς εγκλεισμού αλλά και διαφορετικές αναλογίες πυρήνα : φορέα εγκλεισμού, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη απόδοση εγκλεισμού, κυρίως στην περίπτωση εγκλεισμού της θειαμίνης. Ακόμη, είναι δυνατή η εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων εγκλεισμού, όπως η ξήρανση με ψεκασμό ή ξήρανση με κατάψυξη, η επικάλυψη ρευστοποιημένης κλίνης, η γαλακτωματοποίηση και άλλες. Ομοίως, μπορεί να διερευνηθεί περαιτέρω η βελτιστοποίηση των ανωτέρω μεθόδων και των συνθηκών εμπλουτισμού, με σκοπό την αύξηση του ποσοστού συγκράτησης των θρεπτικών από τα προϊόντα ρυζιού. Παράλληλα μπορούν να επιχειρηθούν διαφορετικά επίπεδα εμπλουτισμού, με στόχο την εύρεση της μέγιστης δυνατής συγκράτησης των θρεπτικών και της βιοδιαθεσιμότητάς τους, χωρίς, βέβαια, να επηρεάζονται τα οργανοληπτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων.

Ταυτόχρονα μαζί με όλα τα παραπάνω, θα πρέπει να συνεκτιμηθεί το κόστος για κάθε προτεινόμενο φορέα εγκλεισμού ή μέθοδο εγκλεισμού καθώς και για κάθε μέθοδο εμπλουτισμού ώστε να βρεθεί η καλύτερη λύση που να συνδυάζει την υψηλή απόδοση και τη συγκράτηση των θρεπτικών με τη χαμηλότερη δυνατή οικονομική επιβάρυνση.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

---

*Παράρτημα 1: Μελέτη επίδρασης του προϊόντος ρυζιού και του προϊόντος εγκλεισμού στην περιεκτικότητα του ρυζιού σε σίδηρο*

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Προϊόν Ρυζιού	11,01414	4	2,753535	1,205742	0,430246	6,388233
Προϊόν Εγκλεισμού	44,05801	1	44,05801	19,29251	0,011761	7,708647
Error	9,13474	4	2,283685			
Total	64,20689	9				

*Εικόνα 1: Ανάλυση επίδραση παραγόντων στην περιεκτικότητα των προϊόντων ρυζιού σε σίδηρο*

*Παράρτημα 2: Μελέτη επίδρασης του προϊόντος ρυζιού και του προϊόντος εγκλεισμού στη βιοδιαθεσιμότητα του σιδήρου*

ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Προϊόν Ρυζιού	254,0565	3	84,6855	1,133538	0,46018	9,276628
Προϊόν Εγκλεισμού	336,2388	1	336,2388	4,500645	0,124009	10,12796
Error	224,1271	3	74,70904			
Total	814,4224	7				

*Εικόνα 2: Ανάλυση επίδραση παραγόντων στη βιοδιαθεσιμότητα του σιδήρου*

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- (IRRI), I. R. R. I. (n.d.). Rice Milling. In *Agricultural Engineering Unit*.
- Abaide, E. R., Tres, M. V., Zobot, G. L., & Mazutti, M. A. (2019). Reasons for processing of rice coproducts: Reality and expectations. *Biomass and Bioenergy*, 120(November 2018), 240–256. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.032>
- Abbaspour, N., Hurrell, R., & Kelishadi, R. (2014). Review on iron and its importance for human health. *Journal of Research in Medical Sciences: The Official Journal of Isfahan University of Medical Sciences*, 19(2), 164–174. Retrieved from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24778671>
- Adlercreutz, H. (2007). Lignans and Human Health. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, 44(5–6), 483–525. <https://doi.org/10.1080/10408360701612942>
- Allen, L., De Benoist, B., Dary, O., & Hurrell, R. (2006). *Guidelines on food fortification with micronutrients Food and Agricultural Organization of the United Nations Guidelines on food fortification with micronutrients*. 341. Retrieved from [https://www.who.int/nutrition/publications/guide\\_food\\_fortification\\_micronutrients.pdf](https://www.who.int/nutrition/publications/guide_food_fortification_micronutrients.pdf)
- Anker, S. (2019). *Iron Deficiency in Heart Failure*. 7(1), 36–46. <https://doi.org/10.1016/j.jchf.2018.07.015>
- Bates, C. J. (1997). *Vitamin analysis*.
- Blanco-rojo, R., & Vaquero, M. P. (2019). Iron bioavailability from food fortification to precision nutrition . A review. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 51(January 2018), 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.04.015>
- Blumberg, J. B. (1999). Dietary reference intakes for vitamin E. In *Nutrition* (Vol. 15). [https://doi.org/10.1016/S0899-9007\(99\)00163-X](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(99)00163-X)
- Bourgis, F., Guyot, R., Gherbi, H., Tailliez, E., Amabile, I., Salse, J., ... Ghesquière, A. (2008). Characterization of the major fragrance gene from an aromatic japonica rice and analysis of its diversity in Asian cultivated rice. *Theoretical and Applied Genetics*, 117(3), 353–368. <https://doi.org/10.1007/s00122-008-0780-9>
- Caringal, B. K. M., Rosa, Z. S. Dela, Maan, K. V. R., & Camello, N. C. (2016). *Design and Development of Rice Milling and Grinding Machine*. (8), 6–14.
- Dickson, E. A., & Brookes, M. J. (2019). Common causes of iron deficiency anaemia in

- gastroenterology patients. *Medicine (United Kingdom)*, 47(4), 219–223.  
<https://doi.org/10.1016/j.mpmed.2019.01.001>
- Eshak, E. S., & Arafa, A. E. (2018). Thiamine deficiency and cardiovascular disorders. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 28(10), 965–972.  
<https://doi.org/10.1016/j.numecd.2018.06.013>
- Ezcaray, M. A. (2014). *Strategies to improve the oxidative stability of bakery products fortified with heme iron*.
- Fung, K. Y. C., Cosgrove, L., Lockett, T., Head, R., & Topping, D. L. (2012). A review of the potential mechanisms for the lowering of colorectal oncogenesis by butyrate. *British Journal of Nutrition*, 108(5), 820–831. <https://doi.org/10.1017/S0007114512001948>
- Gibbs, B. F., Kermasha, S., Alli, I., & Mulligan, C. N. (1999). Encapsulation in the food industry: A review. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 50(3), 213–224.  
<https://doi.org/10.1080/096374899101256>
- Global Rice Science Partnership. (2013). Rice Almanac. In *Global Rice Science Partnership 2013* (4th ed.).
- Gunaratne, A., Wu, K., Li, D., Bentota, A., Corke, H., & Cai, Y.-Z. (2013). Antioxidant activity and nutritional quality of traditional red-grained rice varieties containing proanthocyanidins. *Food Chemistry*, 138(2–3), 1153–1161. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2012.11.129>
- Gupta, C., Chawla, P., Arora, S., Tomar, S. K., & Singh, A. K. (2014). Food Hydrocolloids Iron microencapsulation with blend of gum arabic , maltodextrin and modi fi ed starch using modi fi ed solvent evaporation method e Milk forti fi cation. *Food Hydrocolloids*, 1–7.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.07.021>
- Health, H., Sandstead, H. H., & Klevay, L. M. (2000). *Symposium: Trace Element Nutrition and Human Health History of Nutrition Symposium: Trace Element Nutrition and*. 483–484.
- [Http://www.fao.org](http://www.fao.org). (n.d.). <http://www.fao.org>. Retrieved from <http://www.fao.org/3/t0567e/T0567E00.htm>
- [Https://www.encyclopedia.com](https://www.encyclopedia.com). (2019). The Natural History of Rice. Retrieved from Encyclopedia of Food and Culture website: <https://www.encyclopedia.com>
- Hurrell, R. F. (2002). Fortification: Overcoming Technical and Practical Barriers 1 , 2. *Health Promotion*, 1(1), 806–812.
- Hwisa, N. T., Katakam, P., Chandu, B. R., & Adiki, S. K. (2013). Solvent Evaporation Techniques

- as Promising Advancement in Microencapsulation. *Vedic Research International Biological Medicinal Chemistry*, 1(1), 8. <https://doi.org/10.14259/bmc.v1i1.29>
- Juliano, B. O. (1993). *AO Food and Nutrition Series No. 26 RICE in human nutrition Prepared in collaboration with FAO by*. Retrieved from [http://books.irri.org/9251031495\\_content.pdf](http://books.irri.org/9251031495_content.pdf)
- Juliano, B. O. (2016). *The grain and its gross composition . in*. (January 1985).
- Juliano, B. O., & Tuaño, A. P. P. (2019). Gross structure and composition of the rice grain. *Rice*, 31–53. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811508-4.00002-2>
- Juveriya Fathima, S., Fathima, I., Abhishek, V., & Khanum, F. (2016). Phosphatidylcholine, an edible carrier for nanoencapsulation of unstable thiamine. *Food Chemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.11.005>
- Lieu, P. T., Heiskala, M., & Peterson, P. A. (2001). *The roles of iron in health and disease*. 22.
- Mew, T. W., Brar, D. S., Peng, S., Dawe, D., & Hardy, B. (2003). *Rice science: innovation and impact for livelihood. Proceedings of the international rice research conference, 16-19 September 2002, Beijing, China*.
- Min, B., McClung, A. M., & Chen, M.-H. (2011). Phytochemicals and Antioxidant Capacities in Rice Brans of Different Color. *Journal of Food Science*, 76(1), C117–C126. <https://doi.org/doi:10.1111/j.1750-3841.2010.01929.x>
- Mohammed, K., & Ahmary, A. (2014). ( vitamin B1 ) in pharmaceuticals. 5(1), 81–84. <https://doi.org/10.5155/eurjchem.5.1.81>
- Montgomery, S., Rosenzweig, J., & Smit, J. (2018). *Technology for Rice Forti fi cation*. 159–164.
- Muthayya, S., Hall, J., Bagriansky, J., Sugimoto, J., Gundry, D., Matthias, D., ... Maberly, G. (2012). *Rice fortification : An emerging opportunity to contribute to the elimination of vitamin and mineral deficiency worldwide*. 33(4), 296–307. <https://doi.org/10.1177/156482651203300410>
- Nambi, E., Manickavasagan, A., & Sultan, S. (2017). *Rice Milling Technology to Produce Brown Rice Chapter 1 Rice Milling Technology to Produce*. (January 2019). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59011-0>
- Nedovic, V., Kalusevic, A., Manojlovic, V., Levic, S., & Bugarski, B. (2011). An overview of encapsulation technologies for food applications. *Procedia Food Science*, 1(May), 1806–1815. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.265>
- Ntanos, D. (2001). Strategies for rice production and research in Greece I – Rice production

- strategy. *Ciheam*, 50, 115–122.
- Papanikolaou, G., & Pantopoulos, K. (2017). *Critical Review Systemic Iron Homeostasis and Erythropoiesis The Janus Face of Bioiron*. (April), 399–413.  
<https://doi.org/10.1002/iub.1629>
- Peanparkdee, M., & Iwamoto, S. (2019). Bioactive compounds from by-products of rice cultivation and rice processing: Extraction and application in the food and pharmaceutical industries. *Trends in Food Science and Technology*, 86(July 2018), 109–117. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.041>
- Percy, L., Mansour, D., & Fraser, I. (2017). Iron deficiency and iron deficiency anaemia in women. *Best Practice and Research: Clinical Obstetrics and Gynaecology*, 40, 55–67.  
<https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2016.09.007>
- Peterson, J., Dwyer, J., Adlercreutz, H., Scalbert, A., Jacques, P., & McCullough, M. L. (2010). Dietary lignans: physiology and potential for cardiovascular disease risk reduction. *Nutrition Reviews*, 68(10), 571–603. <https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2010.00319.x>
- Prakash, J. (2016). *Rice Bran Proteins: Properties and Food Uses*. (September).  
<https://doi.org/10.1080/10408399609527738>
- Prentice, A. M., Mendoza, Y. A., Pereira, D., Cerami, C., Wegmuller, R., Constable, A., & Spieldenner, J. (2017). Dietary strategies for improving iron status: Balancing safety and efficacy. *Nutrition Reviews*, 75(1), 49–60. <https://doi.org/10.1093/nutrit/nuw055>
- Rahman, M. S. (2007). *Handbook of Food Preservation, Second Edition*.
- Rayman, M. P. (2012). Selenium and human health. *The Lancet*, 379(9822), 1256–1268.  
[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61452-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61452-9)
- Rosanoff, A., Weaver, C. M., & Rude, R. K. (2012). Suboptimal magnesium status in the United States: are the health consequences underestimated? *Nutrition Reviews*, 70(3), 153–164.  
<https://doi.org/10.1111/j.1753-4887.2011.00465.x>
- Ryan, E. P. (2011). Bioactive food components and health properties of rice bran. *Journal of the American Veterinary Medical Association*, 238(5), 593–600.  
<https://doi.org/10.2460/javma.238.5.593>
- Schenker, S. (2012a). An overview of the role of rice in the UK diet. *Nutrition Bulletin*, 37(4), 309–323. <https://doi.org/10.1111/j.1467-3010.2012.02002.x>
- Schenker, S. (2012b). An overview of the role of rice in the UK diet. *Nutrition Bulletin*, 37(4),

- 309–323. <https://doi.org/doi:10.1111/j.1467-3010.2012.02002.x>
- Schlemmer, U., Frølich, W., Prieto, R. M., & Grases, F. (2009). Phytate in foods and significance for humans: Food sources, intake, processing, bioavailability, protective role and analysis. *Molecular Nutrition & Food Research*, *53*(S2), S330–S375.  
<https://doi.org/doi:10.1002/mnfr.200900099>
- Souza Simões, L., Madalena, D. A., Pinheiro, A. C., Teixeira, J. A., Vicente, A. A., & Ramos, Ó. L. (2017). Micro- and nano bio-based delivery systems for food applications: In vitro behavior. *Advances in Colloid and Interface Science*, *243*, 23–45.  
<https://doi.org/10.1016/j.cis.2017.02.010>
- Srinivasan, M., Sudheer, A. R., & Menon, V. P. (2007). *Ferulic acid: therapeutic potential throught*. (March), 92–100.
- Sriram, K., Manzanares, W., & Joseph, K. (2012). Thiamine in nutrition therapy. *Nutrition in Clinical Practice*, *27*(1), 41–50. <https://doi.org/10.1177/0884533611426149>
- Steiger, G., Müller-Fischer, N., Cori, H., & Conde-Petit, B. (2014). Fortification of rice: Technologies and nutrients. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1324*(1), 29–39.  
<https://doi.org/10.1111/nyas.12418>
- Thorne, M. J., Thompson, L. U., & Jenkins, D. J. (1983). Factors affecting starch digestibility and the glycemic response with special reference to legumes. *The American Journal of Clinical Nutrition*, *38*(3), 481–488. <https://doi.org/10.1093/ajcn/38.3.481>
- Topping, D. L., & Clifton, P. M. (2017). Short-Chain Fatty Acids and Human Colonic Function: Roles of Resistant Starch and Nonstarch Polysaccharides. *Physiological Reviews*, *81*(3), 1031–1064. <https://doi.org/10.1152/physrev.2001.81.3.1031>
- United States Agency for International Development (USAID). (2010). *Manual of Methods for Determining Micronutrients in*.
- WHO. (2018). *GUIDELINE: FORTIFICATION OF RICE WITH VITAMINS AND MINERALS AS A PUBLIC HEALTH STRATEGY*.
- Wong, C. (2017). Iron deficiency anaemia. *Paediatrics and Child Health (United Kingdom)*, *27*(11), 527–529. <https://doi.org/10.1016/j.paed.2017.08.004>
- Wopereis, M. C. S., Defoer, T., Idinoba, P., Diack, S., & Dugué, M.-J. (2009). Knowing the rice plant. *PLAR-IRM Curriculum: Technical Manual*, 26–32.
- World health Organization, & United Nations High Commissioner for Refugees. (1999).



- Thiamine deficiency and its prevention and control in major emergencies. *Annals of Tropical Paediatrics*, 24, 52. <https://doi.org/10.1179/146532804X10835>
- Zhu, L.-J., Liu, Q.-Q., Wilson, J. D., Gu, M.-H., & Shi, Y.-C. (2011). Digestibility and physicochemical properties of rice (*Oryza sativa* L.) flours and starches differing in amylose content. *Carbohydrate Polymers*, 86(4), 1751–1759. <https://doi.org/10.1016/J.CARBPOL.2011.07.017>
- Zuidam, N. J., & Nedović, V. A. (2010). Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing. In *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1008-0>
- Zuidam, N. J., & Shimoni, E. (2010). Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing. *Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing*, (January 1970), 1–400. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1008-0>
- Κυρίτση, Α. (2009). ΜΕΛΕΤΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΡΥΖΙΟΥ.