



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ
ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΤΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ**

**THE APPLICATION OF IMAGE ANALYSIS TO ASSESS THE
QUALITY AND SAFETY OF FOOD**

Ιωάννα Σκάρα

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Βασιλεία Σινάνογλου

Αθήνα, 2021

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια:

Βασιλεία Σινάνογλου
Καθηγήτρια

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής:

Ειρήνη Στρατή
Επίκουρος Καθηγήτρια

Παναγιώτης Ζουμπουλάκης
Αναπληρωτής Καθηγητής

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Σκάρα Ιωάννα του Χρήστου, με αριθμό μητρώου 71617095, φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Επιστημών Τροφίμων του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

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

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

Η Δηλούσα



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ:

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κυρία Βασιλεία Σινάνογλου, για την ανάθεση του θέματος της πτυχιακής αυτής εργασίας, καθώς και για την πολύτιμη βοήθειά της κατά τη διάρκεια εκπόνησής της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Ειρήνη Στρατή και τον κύριο Παναγιώτη Ζουμπουλάκη για τη συμμετοχή τους ως μέλη της εξεταστικής επιτροπής, αλλά και για τις χρήσιμες επισημάνσεις τους στην εργασία.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κύριο Διονύσιο Κάβουρα, για τις συμβουλές του στο θέμα της ανάλυσης εικόνας και για τη βοήθειά του κατά την έρευνα βιβλιογραφικών αναφορών.

Περίληψη:

Οι εξελίξεις στην επιστήμη και την τεχνολογία, καθώς και οι αυξανόμενες απαιτήσεις του καταναλωτικού κοινού, έχουν εντείνει την ανάγκη για καινοτόμες τεχνικές αξιολόγησης της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων. Η ανάλυση εικόνας είναι μια τεχνική η οποία μελλοντικά μπορεί να αναδειχθεί σε θεμελιώδες εργαλείο εκτίμησης ποιοτικών χαρακτηριστικών και κινδύνων ασφάλειας στα τρόφιμα, ενώ ήδη υπάρχουν εφαρμογές σε πληθώρα προϊόντων. Συνδυάζεται με διάφορες μεθόδους, όπως χρωματομετρικές, φασματοσκοπικές, αλλά και μεθόδους απεικόνισης. Στην παρούσα εργασία συντάχθηκε μια ανασκόπηση σχετικά με την ανάλυση εικόνας και τον τρόπο λειτουργίας της, ενώ αναλύθηκαν και εφαρμογές σε διάφορες κατηγορίες τροφίμων. Όπως αποδείχθηκε, ως μέθοδος έχει πληθώρα πλεονεκτημάτων και η ένταξή της στη βιομηχανία μπορεί να βοηθήσει τόσο στη μείωση του χρόνου παραγωγής τροφίμων, όσο και στην αύξηση της ποσότητας των παραγόμενων προϊόντων, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση των συνθηκών ζωής των ανθρώπων σε αναπτυσσόμενες χώρες αλλά και συνολικά, με τη μείωση των αποβλήτων. Φυσικά, για να γίνουν αυτά απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την απλούστευση της χρήσης της ανάλυσης εικόνας, αλλά και την απλοποίηση των εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται, με ταυτόχρονη βελτίωση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Abstract:

Advances in science and technology, as well as the growing needs of the consumers, have intensified the need for innovative techniques for assessing the quality and safety of food. Image analysis is a technique that in the future can become a fundamental tool for assessing quality characteristics and food safety risks, while there are already several existing applications in a variety of products. It is combined with various methods, such as colorimetric, spectroscopic, but also imaging methods. In the present work, a review was carried out on image analysis and how it works, additionally analyzing the applications in various food categories. As it turned out, this method has a lot of advantages and its integration into industry can help reduce the time that is needed for food production and increase the amount of products produced, while at the same time it can help improve the living conditions of people in developing countries, but also for everyone, by reducing waste. Of course, all this requires further research to simplify the use of image analysis and the components used, while improving the obtaining results.

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή	4
1.Ποιότητα και Ασφάλεια των Τροφίμων	6
2.Η Ανάλυση Εικόνας	11
2.1.Εξοπλισμός και Λήψη Εικόνων	13
2.1.1.Φωτισμός.....	14
2.1.2.Κάμερα	16
2.1.3.Πλακέτα Λήψης Εικόνων.....	18
2.1.4.Υλικό και Λογισμικό	20
2.1.5.Χρήση Ηλεκτρονικού Υπολογιστή	20
3.Μέθοδοι Με Τις Οποίες Συνδυάζεται Η Ανάλυση Εικόνας.....	22
3.1.Χρωματομετρία.....	22
3.2. Τεχνικές Απεικόνισης	26
3.2.1.Υπερφασματική Απεικόνιση.....	28
3.2.2.Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού	33
3.2.3.Θερμική Απεικόνιση	36
3.2.4.Άλλες Μέθοδοι Απεικόνισης	41
3.3. Φασματοσκοπικές Τεχνικές.....	46
3.3.1. Φασματοσκοπία Εγγύς Υπέρυθρου	46
3.3.2.Φασματοσκοπία Μέσου Υπέρυθρου	47
3.3.3.Φασματοσκοπία Πολλαπλών Μοριακών Υπέρυθρων	50
3.3.4. Φασματοσκοπία Raman	50
4.Εφαρμογές Σε Τρόφιμα	54
4.1. Φρούτα και Λαχανικά	54
4.2.Γαλακτοκομικά	56
4.3.Κρέας και Πουλερικά	58
4.4.Ιχθυηρά	61
4.5.Δημητριακά και Προϊόντα τους.....	62
4.6.Λίπη και Έλαια.....	63
4.7.Αλκοολούχα και Μη Αλκοολούχα Ποτά	64
4.8. Άλλα τρόφιμα.....	65
5.Συμπεράσματα	67
Βιβλιογραφία.....	68

Εισαγωγή:

Σε όλες τις σύγχρονες κοινωνίες, το καταναλωτικό κοινό απαιτεί τρόφιμα υψηλής ποιότητας και ασφάλειας. Αυτή η ζήτηση έχει οδηγήσει στη θέσπιση νομοθεσίας ως προς την ασφάλεια των τροφίμων, καθώς και στην υποχρεωτική επιθεώρηση της ποιότητάς τους. Είναι αναγκαία η ανάπτυξη συστημάτων ποιοτικού ελέγχου σε όλες τις διαδικασίες της βιομηχανίας τροφίμων, τα οποία θα είναι ταχεία, ακριβή και αντικειμενικά. Στόχος είναι η εξασφάλιση ενός ασφαλούς περιβάλλοντος παραγωγής κατά την επεξεργασία, καθώς και η σωστή επισήμανση των προϊόντων, όσον αφορά την ποιότητα, την ασφάλεια, την αυθεντικότητα και τη συμμόρφωση στην υπάρχουσα νομοθεσία (Wu & Sun, 2013c).

Δεδομένου ότι τα τρόφιμα αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό συστατικών, ήταν πάντα πολύπλοκη η ανάλυσή τους με παραδοσιακές μεθόδους, καθώς τέτοιες μέθοδοι καταναλώνουν πολύτιμο χρόνο (Xie *et al.*, 2021). Μέχρι πρότινος, η οπτική επιθεώρηση από τον άνθρωπο χρησιμοποιούνταν σε ευρεία κλίμακα, ωστόσο τέτοιου είδους μέθοδοι ελέγχου χαρακτηρίζονται από υποκειμενικότητα, είναι χρονοβόρες, εξαντλητικές και ασυνεπείς. Συνήθως γίνεται χρήση αναλυτικών χημικών μεθόδων, οι οποίες είναι εξίσου χρονοβόρες, καταστρεπτικές και μπορούν να αναλύσουν μικρό αριθμό δειγμάτων (Wu & Sun, 2013c). Συχνά επίσης, εμπεριέχουν πολύπλοκες προετοιμασίες δειγμάτων, τα οποία απορρίπτονται μετά τις μετρήσεις. Τα τελευταία χρόνια, οι ερευνητές στον τομέα της γεωργίας και της επεξεργασίας τροφίμων προσεγγίζουν με διάφορους τρόπους την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων που έχουν οι συμβατικές μέθοδοι αξιολόγησης της ποιότητας (Sanchez *et al.*, 2020). Έτσι λοιπόν, η εφαρμογή αξιόπιστων, αποτελεσματικών, μη επεμβατικών, εναλλακτικών λύσεων για την αξιολόγηση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων είναι μείζονος σημασίας (Wu & Sun, 2013c).

Τεχνολογίες που βασίζονται στην εικόνα, έχουν αποδειχθεί αρκετά ενδιαφέρουσες για την ανίχνευση της ποιότητας και την εκτίμηση της ασφάλειας των τροφίμων, ενώ έχει γίνει πολύτιμη η χρήση τους σε διάφορους τομείς, λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων (Chen *et al.*, 2013; Sanchez *et al.*, 2020). Οι μη καταστρεπτικές οπτικές τεχνικές, περιλαμβάνουν συστήματα υπολογιστικής όρασης (Computer Vision Systems - CVS), κάνοντας χρήση ηλεκτρονικών ψηφιακών φωτογραφικών μηχανών, σαρωτών, μικροσκοπίων σάρωσης με φως και συνεστιακών λέιζερ (CLS), συστημάτων απεικόνισης του εγγύς υπέρυθρου (Near-Infrared - NIR), φασματοσκοπία και συστήματα υπερφασματικής απεικόνισης (Hyper-Spectral Imaging - HSI), συστήματα πολυφασματικής απεικόνισης, συσκευές με ακτίνες-X και υπερήχους. Τα τελευταία χρόνια τέτοια συστήματα έχουν εφαρμοστεί στη βιομηχανία τροφίμων για τον αυτόματο εξωτερικό ποιοτικό έλεγχο των τροφίμων και των γεωργικών προϊόντων (Lukinac *et al.*, 2018).

Η ανάλυση δειγμάτων με τη χρήση τεχνικών απεικόνισης είναι ακίνδυνη και δεν επεμβαίνει στη δομή του τροφίμου. Η βιομηχανία καταβάλλει προσπάθειες με σκοπό τη μέτρηση και τον έλεγχο των παραμέτρων εικόνας των προϊόντων λόγω της αύξησης των απαιτήσεων ζήτησης ποιότητας από τους καταναλωτές. Εκπαιδευμένο προσωπικό, σε καλά φωτισμένους χώρους, πραγματοποιεί οπτικές ποιοτικές αξιολογήσεις για ποικίλες λειτουργίες των τροφίμων με διάφορες από τις υπάρχουσες μεθόδους επιθεώρησης εικόνων (Dutta *et al.*, 2016). Τέτοια συστήματα είναι κυρίως υποκατάστατα της ανθρώπινης όρασης. Με την ανάλυση ψηφιακών εικόνων, επιτυγχάνεται μια αποτελεσματική, μη καταστρεπτική τεχνική ελέγχου, που έχει τη δυνατότητα να διερευνήσει τις οπτικές ιδιότητες των τροφίμων και σε συνδυασμό με άλλες τεχνικές και μοντέλα ταξινόμησης, δίνει πληροφορίες που αφορούν τη σύνθεση και τη δομή των προϊόντων (Lukinac *et al.*, 2018).

Η παρούσα εργασία συγγράφηκε με σκοπό να γίνει μια ανασκόπηση στον τρόπο λειτουργίας της ανάλυσης εικόνας, στις υπάρχουσες μεθόδους ανάλυσης εικόνας, καθώς και στις τεχνικές με τις οποίες αυτές μπορούν να συνδυαστούν. Επίσης, επισκοπούνται οι δυνατότητες της μεθόδου σε επίπεδο μεθοδολογιών, ενώ αναφέρονται εφαρμογές της ανάλυσης εικόνας σε διάφορες κατηγορίες τροφίμων, με σκοπό τον έλεγχο της ποιότητας και της ασφάλειάς τους.

1. Ποιότητα και Ασφάλεια των Τροφίμων:

Η ποιότητα και η ασφάλεια των τροφίμων είναι στενά συνδεδεμένες με την υγεία και το βιοτικό επίπεδο των ανθρώπων και η εκτίμηση των κινδύνων στην ποιότητα και την ασφάλεια έχει ισχυρή κοινωνική σημασία (Han *et al.*, 2019). Η ασφάλεια των τροφίμων ορίζεται ως «η κατάσταση των τροφίμων σε όλα τα στάδια της παραγωγής, μεταποίησης και διανομής, που απαιτείται για την εγγύηση της προστασίας της υγείας των καταναλωτών, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις κανονικές συνθήκες χρήσης και τις διαθέσιμες πληροφορίες για τα συγκεκριμένα τρόφιμα» (Baert *et al.*, 2011). Με τη βελτίωση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων, δίνεται παγκοσμίως από τις κυβερνήσεις, πιο πολλή προσοχή σε θέματα ποιότητας και ασφάλειας των τροφίμων (Wu *et al.*, 2018). Τόσο η αυξανόμενη ευαισθητοποίηση, όσο και η πολυπλοκότητα των καταναλωτών, τους οδήγησαν σε προσδοκίες για βελτίωση της ποιότητας των τροφίμων. Αυτό με τη σειρά του, αύξησε την ανάγκη για βελτίωση των τρόπων επιθεώρησης της ποιότητας. Η ίδια η ποιότητα ορίζεται ως το άθροισμα όλων εκείνων των χαρακτηριστικών τα οποία οδηγούν στην παραγωγή προϊόντων αποδεκτών για τον καταναλωτή (Brosnan & Sun., 2004). Η ποιότητα, έχει οριστεί και ως ο βαθμός αριστείας ενός προϊόντος, ή ο βαθμός καταλληλότητας που έχει για κάποια συγκεκριμένη χρήση (Abbott, 1999; Sanchez *et al.*, 2020). Η αξιολόγηση της ποιότητας είναι η αξιολόγηση πολλών διαφορετικών εξωτερικών και εσωτερικών χαρακτηριστικών, που γίνονται αντιληπτά από τον άνθρωπο (Ali *et al.*, 2017; Sanchez *et al.*, 2020).

Συχνά, η μόλυνση των προϊόντων τροφίμων και ποτών οφείλεται στην οργάνωση εκ μέρους των επεξεργαστών (Griffith, 2010; Powell *et al.*, 2011; Jespersen *et al.*, 2017). Οι τροφικές ασθένειες προκαλούνται από παράγοντες που καταναλώνονται μαζί με την τροφή και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα ασθενειών. Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (Π.Ο.Υ.), η μόλυνση στα τρόφιμα μπορεί να συμβεί σε οποιοδήποτε στάδιο, από την παραγωγή έως την κατανάλωση του τροφίμου, και μπορεί να προκληθεί από περιβαλλοντική μόλυνση, συμπεριλαμβανομένης της ρύπανσης του νερού, του εδάφους ή του αέρα (WHO, 2007; WHO, nd; Srey *et al.*, 2013). Η μόλυνση στα τρόφιμα είναι δυνατόν να είναι τυχαία ή ακούσια, κυρίως στην περίπτωση που οι αγρότες ή οι μεταποιητές δεν γνωρίζουν πώς θα μπορούσαν να μολυνθούν τα τρόφιμα (Manning & Soon, 2014). Ωστόσο, η μόλυνση αυτή μπορεί να είναι και εκούσια. Νοθεία μπορεί να γίνει με την προσθήκη διαφόρων συστατικών, όπως οι φυτικές πρωτεΐνες στα πουλερικά, τα ψάρια, τα αυγά και τα γαλακτοκομικά προϊόντα (da Costa Filho *et al.*, 2020). Επίσης, επιρρεπείς σε νοθεία είναι πρώτες ύλες σκόνης, είτε ζωικής είτε φυτικής προέλευσης (Everstine *et al.*, 2013; Moore *et al.*, 2012; da Costa Filho *et al.*, 2020). Η απάτη στα τρόφιμα δεν είναι κάποιο καινούριο ζήτημα (Shears, 2010; Guntzburger *et al.*, 2020), ωστόσο πρόσφατα αναγνωρίστηκε ως σημαντική απειλή

για την ασφάλεια και την ποιότητα των τροφίμων, αλλά και για την εμπιστοσύνη των καταναλωτών σε παγκόσμια κλίμακα (Charlebois *et al.*, 2016; Everstine *et al.*, 2013; Manning & Soon, 2016; Spink & Moyer, 2011; Guntzburger *et al.*, 2020). Ο έλεγχος της νοθείας λοιπόν, είναι μια ακόμη προτεραιότητα κατά την παραγωγή και εμπορεία τροφίμων, και απαιτούνται κατάλληλα εργαλεία ανίχνευσης και ανάλυσης (Wang *et al.*, 2017a). Ο Παγκόσμιος Οργανισμός Υγείας εκτιμά ότι 33 εκατομμύρια χρόνια υγιούς ζωής χάνονται κάθε χρόνο, λόγω των μολύνσεων που σχετίζονται με τα τρόφιμα και τα ποτά (Παγκόσμιο φορτίο τροφικών ασθενειών, 2015; Jespersen *et al.*, 2017).

Η ασφάλεια των τροφίμων είναι παγκόσμιο θέμα ζωτικής σημασίας. Επομένως, ένας μεγάλος αριθμός ερευνητών εστιάζουν τις μελέτες τους σε αυτό το ζήτημα δημόσιας υγείας, έχοντας ως στόχο τη μείωση ή την αποφυγή των εστιών μόλυνσης που προκαλούνται στα τρόφιμα (Lynch *et al.*, 2006; Scallan *et al.*, 2011; Sivapalasingam *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2019). Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν σχεδιαστεί και δημιουργηθεί συστήματα ασφάλειας των τροφίμων, με πολλές αναθεωρήσεις. Ο σχεδιασμός και η εφαρμογή Συστημάτων Διαχείρισης Ασφάλειας Τροφίμων (Σ.Δ.Α.Τ.) ξεκίνησαν από τα πρώιμα συστήματα της δεκαετίας του 1960 και πλέον έχουν εφαρμοστεί πολλά περισσότερα βελτιωμένα συστήματα, όπως τα ISO 22000, 2005a, b και BS PAS 220 2008 (Papademas & Bintsis, 2010). Η ανάπτυξη του συστήματος HACCP, έχει περιγραφεί ως το πρώτο σύστημα διαχείρισης της ασφάλειας τροφίμων στη βιομηχανία αυτή. Ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960 λόγω της ανάγκης παραγωγής ασφαλών γευμάτων για τους αστροναύτες της NASA (Arvanitoyiannis *et al.*, 2009; Papademas & Bintsis, 2010). Οι Wright & Teplitski (2009) υποστήριξαν ότι η αποδοχή του HACCP οφειλόταν, εν μέρει, στο γεγονός ότι η κύρια αρχή του είχε ένα διαισθητικό νόημα, δηλαδή τη θανάτωση παθογόνων στο κρίσιμο βήμα του κύκλου παραγωγής και στη συνέχεια τη διατήρηση της επεξεργασίας υπό συνθήκες που δεν επιτρέπουν την επαναμόλυνση (Wright & Teplitski, 2009; Papademas & Bintsis, 2010).

Η έρευνα για την ασφάλεια των τροφίμων σε επίπεδο γεωργίας αφορά την έρευνα σε θέματα που αφορούν την παραγωγή τους, ενώ η έρευνα της ασφάλειας σε επίπεδο βιομηχανίας, αφορά θέματα σχετικά με την επεξεργασία τους (Hu *et al.*, 2019).

Η διασφάλιση της ασφάλειας των τροφίμων έχει εξελιχθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Η εισαγωγή νέων τεχνολογιών επεξεργασίας και συντήρησης τροφίμων δημιούργησε πολυάριθμες δυνατότητες για έλεγχο και πρόληψη των κινδύνων (De Boeck *et al.*, 2015). Με τη συμβολή της αξιολόγησης της ποιότητας των τροφίμων και του κινδύνου ασφάλειας, τα ατυχήματα που σχετίζονται με την ασφάλεια, είναι δυνατό να μειωθούν αποτελεσματικά (Han *et al.*, 2019). Τα ασφαλή και θρεπτικά τρόφιμα παρέχουν σημαντικά οφέλη στην ανθρώπινη υγεία και ευεξία. Τα μη ασφαλή τρόφιμα οποιασδήποτε μορφής, μπορούν να οδηγήσουν σε τροφικές, και άλλων ειδών

ασθένειες. Είναι λοιπόν αδήριτη η ανάγκη για τη διασφάλιση ότι τα τρόφιμα, είτε είναι φρέσκα είτε έχουν υποστεί μεταποίηση, είναι φυσικώς, χημικώς και μικροβιολογικώς ασφαλή (Manoj *et al.*, 2021).

Οι συμβατικές μέθοδοι αξιολόγησης της ασφάλειας, περιλαμβάνουν διαδικασίες υγρής χημικής ανάλυσης, τεχνικές βασισμένες στη χρωματογραφία, και άλλα αναλυτικά όργανα που γενικώς είναι δαπανηρά, χρονοβόρα, εξαντλητικά, και απαιτούν συγκεκριμένες δεξιότητες. Όλα αυτά είναι εξαιρετικής σημασίας, ειδικά όταν πρόκειται για ανίχνευση νοθείας, ύπαρξης φυτοφαρμάκων, παρουσίας βαρέων μετάλλων. Τέτοιες προσεγγίσεις απαιτούν ακριβείς διαδικασίες, με προετοιμασία δειγμάτων, εξειδικευμένη εργασία, ενώ περιλαμβάνουν και τη χρήση μεγάλου αριθμού χημικών (Manoj *et al.*, 2020). Είναι σημαντικό να εξεταστεί εάν τα συστήματα αξιολόγησης της ασφάλειας των τροφίμων μπορούν να ενισχυθούν με πρόσθετες μεθόδους αξιολόγησης και εάν αυτή η ενίσχυση θα μπορεί να δώσει πιο πλούσιες πληροφορίες σχετικά με τα τρόφιμα, στην παγκόσμια αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων (Jespersen & Wallace, 2017).

Η ποιότητα των τροφίμων είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας σε όλες τις απαιτήσεις παραγωγής, καθώς τα τρόφιμα που καταναλώνονται μπορούν να υποστούν μόλυνση σε κάθε διαδικασία, από το αγρόκτημα έως τη βιομηχανική διαδικασία παραγωγής. Περιοδικά, γίνονται χημικές και μικροβιολογικές αναλύσεις για τον έλεγχο της ποιότητας των τροφίμων, οι οποίες απαιτούν προκατεργασία και ακρίβεια, καθώς και προετοιμασία δειγμάτων (Manoj *et al.*, 2020). Η έγκαιρη ανίχνευση επιφανειακών ελαττωμάτων είναι ικανή να αποτρέψει την περαιτέρω εξάπλωση ζημιών σε ολόκληρο το προϊόν (Ali *et al.*, 2017; Sanchez *et al.*, 2020). Οι εξωτερικές ζημιές είναι αρκετά σημαντικές, καθώς εξαιτίας τους μπορεί να επηρεαστεί η τιμή του προϊόντος στην αγορά (Sanchez *et al.*, 2020). Για μικρής κλίμακας παραγωγές, η άμεση και παραδοσιακή ταξινόμηση μεγέθους χρησιμοποιείται από τους παραγωγούς με τη χρήση χαράκων ή δαγκάνων για τη μέτρηση των διαστάσεων (μήκος και πλάτος), και ψηφιακής ζυγαριάς για τη μέτρηση της μάζας (Su *et al.*, 2018; Sanchez *et al.*, 2020).

Μερικές από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της ποιότητας είναι η υγρή χρωματογραφία (HPLC), η αέρια χρωματογραφία (GC), υγρές χημικές μέθοδοι και αισθητηριακή ανάλυση. Για παράδειγμα, η HPLC έχει ευρεία χρήση στη διάκριση της ηλικίας του κρασιού με χημικά χαρακτηριστικά, όπως είναι η σύνθεση χρωστικής (Woodcock *et al.*, 2008) και τα φλαβονοειδή (Finn *et al.*, 2006). Η χρωματογραφία χρησιμοποιείται επίσης ευρέως για τον έλεγχο της αυθεντικότητας του υγρών τροφίμων (Van Leeuwen *et al.*, 2014). Όλες αυτές οι μέθοδοι όμως είναι χρονοβόρες και δεν εφαρμόζονται στη γραμμή παραγωγής. Επομένως, πρέπει να υιοθετηθούν νέες μέθοδοι (Wu & Sun, 2013a; Wu & Sun, 2013b; Wu & Sun, 2013c; Wang & Sun, 2002a;

Jackman *et al.*, 2009; Barbin *et al.*, 2012; Kamruzzaman *et al.*, 2012; Kamruzzaman *et al.*, 2013; El Masry *et al.*, 2012a; El Masry *et al.*, 2012b; Feng & Sun, 2012; Liu *et al.*, 2014; Barbin *et al.*, 2013; Feng and Sun, 2013; Feng *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2017a). Οι βιοαισθητήρες είναι ένας τρόπος επίλυσης των προβλημάτων, καθώς ελέγχουν την ποιότητα γρήγορα και σε οποιοδήποτε στάδιο είναι απαραίτητο (Murugaboopathi *et al.*, 2013; Manoj *et al.*, 2020). Η πιο πρόσφατη τάση στην αναλυτική χημεία είναι η ανάπτυξη ηλεκτροχημικών συσκευών, που είναι εύκολες στη μετακίνηση, ανιχνεύουν με ταχύτητα, έχουν χαμηλό κόστος, είναι ευαίσθητες, δεν απαιτούν χώρο και έχουν ελάχιστη ισχύ (Honeychurch & Hart, 2003; Manoj *et al.*, 2020).

Η διαχείριση της ποιότητας των τροφίμων γίνεται συνεχώς πιο δύσκολη, για διάφορους λόγους, όπως οι αλλαγές στα πρότυπα κατανάλωσης, οι εξελίξεις στην τεχνολογία, οι αυξανόμενες νομοθετικές απαιτήσεις και οι μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες (Luning & Marcelis, 2006; Luning & Marcelis, 2007; Luning *et al.*, 2008; Motarjemi & Käferstein, 1999; Motarjemi & Mortimore, 2005; Luning & Marcelis, 2009). Η ποιότητα των τροφίμων εξαρτάται από την τροφή και την ανθρώπινη συμπεριφορά και περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη χρήση θεωριών από διάφορους κλάδους για την ανάλυση όχι μόνο των τροφίμων, αλλά και των ανθρώπινων συστημάτων που εμπλέκονται στην παραγωγή τροφίμων (Luning & Marcelis, 2009).

Η ποιότητα επηρεάζεται και από τα ίδια τα τρόφιμα, αλλά και από τα ανθρώπινα συστήματα και τα αποτελέσματά τους, που αντικατοπτρίζουν τη συμπεριφορά του τροφίμου με την πάροδο του χρόνου (Luning & Marcelis, 2009). Η ποιότητα και η θρεπτική αξία συνεχίζουν να αποτελούν την κύρια προτεραιότητα και για τα υγρά τρόφιμα, λόγω των πρώτων υλών τους, ενώ πολλά υγρά τρόφιμα όπως το γάλα, είναι πολύ ευπαθή. Εκτός λοιπόν από την ανάγκη τεχνικών επεξεργασίας όπως είναι η ξήρανση (Cui *et al.*, 2008; Sun & Woods, 1994), η ψύξη (McDonald & Sun, 2001; Sun, 1997; Wang & Sun, 2004; Zheng & Sun, 2004) και η κατάψυξη (Kiani *et al.*, 2011) για τη διατήρηση της ποιότητας, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν νέες και γρήγορες μέθοδοι για την ανάλυση και ταξινόμησή της, καθώς στην αγορά υπάρχουν πολύ ευμετάβλητες τροφές, ιδίως υγρές (Wang *et al.*, 2017a). Η συμπεριφορά των τροφίμων εξαρτάται από τη δυναμική τους, δηλαδή τη μεταβλητότητα σε κάποιες ιδιότητες, όπως οι μεταβολές σύνθεσης, δραστικών ενζύμων και επιπέδων μόλυνσης, αλλά και από τις εφαρμοζόμενες τεχνολογικές συνθήκες, όπως συνθήκες διεργασίας, εξοπλισμός και κτιριακές εγκαταστάσεις (Luning & Marcelis, 2009).

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την τρέχουσα κατάσταση στην αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων, προκύπτει το συμπέρασμα ότι διάφορες τεχνολογικές και οργανωτικές αλλαγές θέτουν υψηλές απαιτήσεις στη διαχείριση της ποιότητας των τροφίμων (Luning & Marcelis, 2009). Υπάρχουν πολλές τεχνικές που μελετώνται για την ανίχνευση της ποιότητας και ασφάλειας τροφίμων, λόγω

της μη καταστρεπτικής τους δράσης, όπως η υπολογιστική όραση (Du & Sun, 2005; Jackman *et al.*, 2011; Sun & Brosnan, 2003; Wang & Sun, 2003; Zheng *et al.*, 2006), η φασματοσκοπία (Morsy & Sun, 2013; He & Sun, 2015; Wang *et al.*, 2017a; Wang *et al.*, 2017b; Xu *et al.*, 2015b) και η υπερφασματική απεικόνιση (Liu *et al.*, 2017; Cheng *et al.*, 2018). Η φασματοσκοπία μέσης υπέρυθρης ακτινοβολίας θεωρείται ένα ακόμα πολύτιμο εργαλείο που μπορεί να παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση και την ασφάλεια των υλικών των τροφίμων (Su & Sun, 2019).

Η βιομηχανία τροφίμων έχει ανάγκη να μειώσει ή και να εξαλείψει τον κίνδυνο που σχετίζεται με την ασφάλεια των προϊόντων, ενώ συνολικά, παρέχει μια μεγάλη ποικιλία τροφίμων με στόχο την ικανοποίηση όλων των επιθυμιών των καταναλωτών. (Van Asselt *et al.*, 2017; Su & Sun, 2019). Η μέθοδος της ανάλυσης εικόνας προσφέρεται ως ένας ιδανικός τρόπος για την επίτευξη των στόχων της βιομηχανίας. Τέτοιες τεχνολογίες που απαιτούν οπτική αντίχτυση, έχουν διερευνηθεί ως πιθανά εργαλεία για τη μη καταστρεπτική ανάλυση και την αξιολόγηση της ασφάλειας και της ποιότητας των τροφίμων (Wu & Sun, 2013c).

2.Η Ανάλυση Εικόνας:

Στη σημερινή εποχή, οι προσδοκίες για προϊόντα υψηλής ποιότητας με τις σωστές προδιαγραφές που αφορούν στην ασφάλεια του καταναλωτή, έχουν αυξηθεί. Επομένως, έχει επεκταθεί και η ανάγκη για την ύπαρξη γρήγορων και αντικειμενικών προσδιορισμών της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων (Brosnan & Sun, 2004). Η αύξηση των επιπέδων ζωής, η ανάπτυξη της τεχνολογίας, η αυξανόμενη σημασία της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων, αλλά και ο αυξανόμενος πληθυσμός, με συνεχώς αναπτυσσόμενες προσδοκίες, είναι ορισμένοι από τους λόγους οι οποίοι οδήγησαν στην ανάγκη εύρεσης ταχύτερων και ακριβέστερων τεχνικών ανάλυσης (Turgut *et al.*, 2014). Τόσο οι εταιρίες, όσο και οι προμηθευτές τροφίμων, έχουν ανάγκη για χαμηλό κόστος παραγωγής με ταυτόχρονη υψηλή απόδοση, άρα και για τεχνολογίες ελέγχου ποιότητας και ασφάλειας, οικονομικές και μη επεμβατικές. Η βιομηχανία τροφίμων λοιπόν αντιμετωπίζει διάφορες προκλήσεις, μία από τις οποίες είναι να διατηρεί πρότυπα υψηλής ποιότητας και διασφάλισης της ασφάλειας των τροφίμων, με την ταυτόχρονη αποφυγή ζητημάτων ευθύνης (Huang *et al.*, 2014). Μία αρκετά συμφέρουσα λύση, είναι εκείνη της ανάλυσης εικόνας (Brosnan & Sun, 2004).

Είναι σχετικά νέα τεχνική, με την προέλευσή της να χρονολογείται από τη δεκαετία του 1960 (Baxes, 1994; Patel *et al.*, 2012). Τη δεκαετία του 1970 το ενδιαφέρον για την τεχνική αυτή αυξήθηκε αρκετά, τόσο σε θεωρητικό, όσο και σε πρακτικό επίπεδο (Patel *et al.*, 2012). Από τότε, βρίσκει εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως: η ιατρική διαγνωστική απεικόνιση, ο αυτοματισμός στα εργοστάσια, η τηλεπισκόπηση, η εγκληματολογία, τα αυτόνομα οχήματα, η καθοδήγηση ρομπότ (Brosnan & Sun, 2004), η επίγεια και εναέρια χαρτογράφηση φυσικών πόρων, η παρακολούθηση καλλιέργειών, η γεωργία ακριβείας (Saldaña *et al.*, 2013).

Η βιομηχανία τροφίμων συγκαταλέγεται στις 10 κορυφαίες βιομηχανίες που χρησιμοποιούν την τεχνολογία που προσφέρεται για την ανάλυση εικόνας (Gunasekaran, 1996; Brosnan & Sun, 2004; Du & Sun, 2006), η οποία έχει αποδειχθεί πως έχει επιτυχία στην αντικειμενική και μη επεμβατική ποιοτική αξιολόγηση πολλών προϊόντων διατροφής (Timmermans, 1998; Du & Sun, 2006). Στη βιομηχανία τροφίμων, οι εφαρμογές της αφορούν στη μη καταστροφική επιθεώρηση ιδιοτήτων των προϊόντων, στον ποιοτικό έλεγχο και στη διαλογή σε γραμμές επεξεργασίας, και γενικώς στον αυτοματισμό διάφορων διαδικασιών (Saldaña *et al.*, 2013). Άλλοι σκοποί χρήσης των τεχνικών ανάλυσης εικόνας στα τρόφιμα είναι η επιθεώρηση της ποιότητας, η ταξινόμηση σχήματος, η ανίχνευση ελαττωμάτων, η ταξινόμηση της ποιότητας και της ποικιλίας (Patel *et al.*, 2012; Turgut *et al.*, 2014), η μικροβιακή ασφάλεια (Turgut *et al.*, 2014), η εκτίμηση της ποιότητας σύμφωνα με

εσωτερικά και εξωτερικά χαρακτηριστικά, η παρακολούθηση των διαφόρων διαδικασιών των φρούτων κατά την αποθήκευση και η αξιολόγηση πειραματικών θεραπειών (Saldaña *et al.*, 2013).

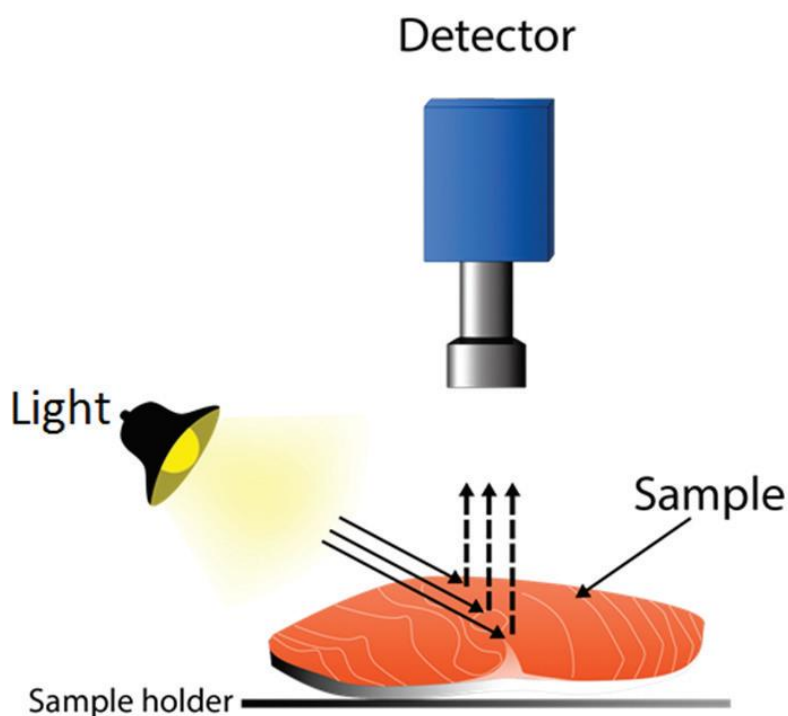
Το σύστημα που χρησιμοποιείται για την ανάλυση εικόνας, είναι γνωστό ως υπολογιστική όραση και βασίζεται κυρίως στην τεχνολογία φωτογραφικής μηχανής – υπολογιστή. Έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την ανάλυση διαφόρων αγροτικών προϊόντων (He *et al.*, 1998; Li & Wang, 1999; Patel *et al.*, 2012) και προϊόντων διατροφής (Sun, 2000; Wang & Sun, 2001; Brosnan & Sun, 2004). Ο όρος «υπολογιστική όραση» είναι συνώνυμος του όρου «μηχανική όραση» (Brosnan & Sun, 2004). Η υπολογιστική όραση περιλαμβάνει τη λήψη, την επεξεργασία και ανάλυση εικόνας, και ευνοεί την αντικειμενική και μη καταστρεπτική αξιολόγηση των οπτικών ποιοτικών χαρακτηριστικών στα τρόφιμα (Timmermans, 1998; Brosnan & Sun, 2004).

Η υπολογιστική όραση προσφέρει μία αυτοματοποιημένη, μη παρεμβατική και οικονομικά συμφέρουσα τεχνική για την ικανοποίηση των αυξανόμενων απαιτήσεων της βιομηχανίας. Μέχρι τώρα, έχει χρησιμοποιηθεί σε πληθώρα τροφίμων, όπως τα φρούτα και λαχανικά, τα κρέατα, τα ιχθυηρά, τις πίτσες, τα σιτηρά, τα προϊόντα αρτοποιίας, τα τυροκομικά (Brosnan & Sun, 2004), τα γαλακτοκομικά προϊόντα (Turgut *et al.*, 2014). Είναι ένα γρήγορο, οικονομικό, συνεπές και ακριβές εργαλείο επιθεώρησης, γι' αυτό και τα συστήματα ηλεκτρονικής όρασης χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στη βιομηχανία τροφίμων με σκοπό την αξιολόγηση της ποιότητας (Sun, 2000; Du & Sun, 2006). Έχει προσελκύσει πολύ τα τμήματα έρευνας και ανάπτυξης των βιομηχανιών, και η ταχεία ανάπτυξη γίνεται όλο και περισσότερο στον ποιοτικό έλεγχο, την ταξινόμηση και αξιολόγηση ενός ευρέος φάσματος τροφίμων (Sun, 2004; Du & Sun, 2006; Vyawahare *et al.*, 2013). Το σύστημα αυτό είναι σχεδιασμένο με λίγο εξοπλισμό και αλγορίθμους οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη λήψη πληροφοριών σχετικά με τα αντικείμενα που μελετώνται (Turgut *et al.*, 2014).

Η ποιοτική αξιολόγηση των τροφίμων είναι ανάγκη να βελτιωθεί, λόγω της αύξησης της ευαισθητοποίησης, της πολυπλοκότητας, αλλά και των προσδοκιών των καταναλωτών (Brosnan & Sun, 2004; Du & Sun, 2006). Η ανάλυση εικόνας έχει δυνατότητες ώστε να καταστεί ζωντανό συστατικό των αυτοματοποιημένων εργασιών επεξεργασίας τροφίμων (Brosnan & Sun, 2004). Μέσω της αυτοματοποίησης της ποιοτικής αξιολόγησης, η ταχύτητα παραγωγής και η απόδοση μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά (Du & Sun, 2006).

Η επεξεργασία εικόνας και η ανάλυση εικόνας αναγνωρίζονται ως ο πυρήνας της υπολογιστικής όρασης. Η τελευταία περιλαμβάνει τη λήψη, επεξεργασία και ανάλυση εικόνων, διευκολύνοντας την αντικειμενική και μη καταστρεπτική αξιολόγηση των οπτικών ποιοτικών χαρακτηριστικών στα προϊόντα διατροφής (Timmermans, 1998; Vyawahare *et al.*, 2013). Ο σκοπός

της υπολογιστικής όρασης είναι να αντικαταστήσει τελικά την ανθρώπινη οπτική διαδικασία λήψης αποφάσεων, με αυτόματες διαδικασίες (Du & Sun, 2006). Με τη χρήση της ανάλυσης εικόνας από τη βιομηχανία, θα δοθεί η δυνατότητα σε διάφορες χώρες, όπως για παράδειγμα η Ινδία, οι οποίες έχουν χαμηλό μερίδιο στην παγκόσμια αγορά, να το αυξήσουν, γιατί έτσι θα ελαττωθούν οι μεγάλες απώλειες που λαμβάνουν χώρα μετά τη συγκομιδή, το χειρισμό και τη μεταποίηση διαφόρων προϊόντων, λόγω της έλλειψης γνώσεων για συντήρηση και της ύπαρξης χρονοβόρων τεχνικών αξιολόγησης ποιότητας (Patel *et al.*, 2012). Η ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων στη βιομηχανία τροφίμων λοιπόν, μπορεί να συμβάλει στην επίτευξη ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος (Saldaña *et al.*, 2013).



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση συστημάτων υπολογιστικής όρασης

2.1. Εξοπλισμός και Λήψη Εικόνων:

Η μέθοδος της υπολογιστικής όρασης συνδυάζει μηχανήματα, οπτικά όργανα, ηλεκτρομαγνητική ανίχνευση, ψηφιακή τεχνολογία επεξεργασίας βίντεο και εικόνας (Patel *et al.*, 2012). Συνήθως, το σύστημα βασίζεται σε έναν προσωπικό υπολογιστή (PC), ο οποίος είναι συνδεδεμένος με ηλεκτρικές και μηχανικές συσκευές, με στόχο την αντικατάσταση του ανθρώπου κατά την εκτέλεση της διαδικασίας (Du & Sun, 2006). Ωστόσο, κάθε μηχανικός σχεδιασμός που χρησιμοποιείται στην υπολογιστική όραση, είναι μοναδικός, για να ταιριάζει στην ανάλυση κάποιου συγκεκριμένου προϊόντος (Patel *et al.*, 2012). Η εμφάνιση των τροφίμων εξετάζεται με τη

χρήση ηλεκτρομαγνητισμού, μετρώντας οπτικές ιδιότητες. Ανάλογα με τον αισθητήρα που χρησιμοποιείται για την παραγωγή εικόνων, οι οπτικές τεχνικές χωρίζονται σε φασματοσκοπικές και σε μεθόδους ανάλυσης εικόνας. Η υπολογιστική όραση περιλαμβάνει λειτουργίες λήψης, επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνας (Lukinac *et al.*, 2018). Βασικά στοιχεία σε ένα σύστημα υπολογιστικής όρασης είναι η συσκευή φωτισμού, μια συσκευή λήψης εικόνων (ψηφιακή φωτογραφική μηχανή / σαρωτής κ.α.), μια πλακέτα λήψης εικόνων (πλαίσιο λήψης ή frame grabber - στην περίπτωση αναλογικής κάμερας), το υλικό και το λογισμικό του υπολογιστή, δηλαδή αλγόριθμους για την ανάλυση της εικόνας και την προεπεξεργασία, για την παροχή δίσκου αποθήκευσης εικόνων, και τέλος, η χρήση υπολογιστή (Lukinac *et al.*, 2018; Davies, 2012; Brosnan & Sun, 2004; Wang & Sun, 2002b).

2.1.1. Φωτισμός:

Προκειμένου να αποκτηθεί μια εικόνα υψηλής ποιότητας, που είναι ζωτικός παράγοντας για τα διαδοχικά βήματα, ο φωτισμός και η διάταξη φωτισμού, τα υψηλής ποιότητας οπτικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα πρέπει να προετοιμαστούν σωστά (Gunasekaran, 1996). Το σύστημα υπολογιστικής όρασης επηρεάζεται από το επίπεδο και την ποιότητα του φωτισμού, όπως συμβαίνει και με το ανθρώπινο μάτι (Brosnan & Sun, 2004). Η απόδοση που θα έχει ένα σύστημα φωτισμού μπορεί να επιδράσει σημαντικά στην ποιότητα της εικόνας και είναι σημαντικός παράγοντας στην τελική απόδοση και ακρίβεια του συστήματος (Novini, 1995; Brosnan & Sun, 2004). Το σωστό σύστημα φωτισμού πρέπει να παρέχει ομοιόμορφη ακτινοβολία σε όλη την εικόνα, χωρίς λάμψεις ή σκιές και να είναι ομοιόμορφη και σταθερή με το πέρασμα του χρόνου. Εάν δε συμβαίνει αυτό, αυξάνεται το σφάλμα αβεβαιότητας και ταξινόμησης, που οδηγεί στην αναγκαιότητα της προεπεξεργασίας της εικόνας, με την αύξηση του χρόνου που χρειάζεται για την ανάλυση (Saldaña *et al.*, 2013). Ένας καλός φωτισμός μειώνει την ανάκλαση, τη σκιά και το θόρυβο που θα έχει η ληφθείσα εικόνα, και έτσι μειώνεται ο χρόνος επεξεργασίας (Brosnan & Sun, 2004). Η ποιότητα της εικόνας που λαμβάνεται μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την κατάσταση φωτισμού. Μια εικόνα υψηλής ποιότητας μπορεί να συμβάλει στη μείωση του χρόνου και της πολυπλοκότητας των επόμενων σταδίων επεξεργασίας εικόνας, γεγονός που μπορεί να μειώσει το κόστος ενός συστήματος επεξεργασίας εικόνας (Du & Sun, 2006). Οι πηγές φωτός ποικίλλουν ανάλογα με τον σκοπό της χρήσης, και μπορούν να είναι λαμπτήρες πυρακτώσεως, φθορισμού, λείζερ, σωλήνες ακτινών X, λαμπτήρες υπέρυθρων (Brosnan & Sun, 2004), αλογόνου, Xenon, LED.

Το φάσμα που εκπέμπει μια πηγή φωτός είναι θεμελιώδες για την απόκτηση σωστής εικόνας. Οι σωλήνες φθορισμού για παράδειγμα, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου το ορατό φως είναι

σημαντικό, όπως είναι οι περιπτώσεις ταξινόμησης κατά χρώμα, όμως παράγεται μικρή ακτινοβολία στην υπέρυθη περιοχή. Επίσης, με τη χρήση συμβατικών πηνίων στραγγαλισμού, γίνεται ταλάντωση της έντασης του φωτός, κάτι το οποίο διορθώνεται μέσω της χρήσης ηλεκτρονικών πηνίων υψηλής συχνότητας (Saldaña *et al.*, 2013). Οι λαμπτήρες πυρακτώσεως εκπέμπουν πιο πολλή υπέρυθη ακτινοβολία, όμως συνήθως παράγουν πολλή θερμότητα και έχουν χαμηλή θερμοκρασία χρώματος, που είναι μειονέκτημα σε εφαρμογές βασιζόμενες στο χρώμα (Cubero, 2012; Saldaña *et al.*, 2013). Στη σύγχρονη εποχή, η χρήση των συστημάτων φωτισμού που βασίζονται σε διόδους εκπομπής φωτός (LED), χρησιμοποιούνται όλο και πιο συχνά, ενώ είναι και οικονομικά. Συνήθως δεν καταναλώνουν πολλή ισχύ, είναι εύρωστες και παράγουν ελάχιστη θερμότητα, ωστόσο είναι κατευθυντήριες και η έξοδος του φωτός συνεχίζει να είναι αρκετά περιορισμένη. Τα συστήματα τα οποία προκαλούν φθορισμό, επίσης δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, λόγω της πιθανής βλάβης στο ανθρώπινο μάτι. Σε κάποια μήκη κύματος, η ακτινοβολία που λαμβάνεται διεγείρει κάποια μόρια, των οποίων η χαλάρωση έχει ως συνέπεια το σώμα να εκπέμπει φως ακτινοβολίας χαμηλότερης ενέργειας (Saldaña *et al.*, 2013).

Τα λέιζερ είναι κατευθυντήριες μονοχρωματικές πηγές φωτός οι οποίες έχουν ευρεία χρήση ως πηγές φωτός στις απεικονίσεις φθορισμού και Raman. Τα βασικά συστατικά ενός λέιζερ είναι μια συντονισμένη οπτική κοιλότητα, ένα ενεργό μέσο λέιζερ και μια πηγή αντλίας για διέγερση των σωματιδίων. Οι τρεις μοναδικές ιδιότητες των λέιζερ είναι η μονοχρωματικότητα, η κατεύθυνση και η συνοχή. Κατά τη διέγερση ενός τροφίμου από μια μονοχρωματική δέσμη φωτός με υψηλή ενέργεια, τα ηλεκτρόνια σε κάποια μόρια του τροφίμου διεγείρονται και εκπέμπουν φως χαμηλότερης ενέργειας σε ένα ευρύ φάσμα μήκους κύματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή φθορισμού ή τη σκέδαση Raman. Και οι δύο αυτές τεχνικές είναι ευαίσθητες και μεταφέρουν πληροφορίες σύνθεσης σε pixels, ενώ εντοπίζουν λεπτές αλλαγές στην ποιότητα των τροφίμων. Επίσης, λόγω της ικανότητας παραγωγής παλμικού φωτός στενής ζώνης, χρησιμοποιούνται και ως πηγές διέγερσης για μέτρηση φθορισμού για ποιοτικό έλεγχο των τροφίμων (Yang *et al.*, 2012; Wu & Sun, 2013c).

Η διάταξη των πηγών φωτός είναι ένας παράγοντας που επηρεάζει τις αποκτηθείσες εικόνες, διότι κάποια σημεία ίσως να δέχονται πιο πολύ φως από άλλα, με αποτέλεσμα να αλλάζει η συνολική ακτινοβολία που αντανακλάται από τα αντικείμενα στα σημεία αυτά. Έχει δηλαδή σημασία εάν υπάρχει οπίσθιος ή πρόσθιος φωτισμός, πλευρικός φωτισμός, δομημένος ή φωτισμός δακτυλίου. Ο άνισος φωτισμός διορθώνεται με βαθμονόμηση της εικόνας με τη χρήση ενός λευκού πίνακα γνωστής ανάκλασης (λευκό αναφοράς), ωστόσο η διόρθωση καταναλώνει κάποιους υπολογιστικούς πόρους (Saldaña *et al.*, 2013).

Η γεωμετρία είναι επίσης υψίστης σημασίας, καθώς και αν ο φωτισμός θα είναι σημειακός, διάχυτος ή συναρμολογημένος (Zuech, 2004; Patel *et al.*, 2012). Ενδεικτικά, η κατεύθυνση φωτισμού υπό γωνία 45° ως προς την κατακόρυφο έχει καλά αποτελέσματα όταν ένα επίπεδο αντικείμενο φωτίζεται, για την αποφυγή των άμεσων αντανακλάσεων στην κάμερα. Εάν επίσης το αντικείμενο είναι σφαιρικό, η χρήση μιας ημισφαιρικής συσκευής διάχυσης είναι πιο κατάλληλη για ομοιόμορφο φωτισμό. Για να αποτραπούν η ανεπιθύμητη λάμψη και οι αντανακλάσεις στα αντικείμενα, είναι χρήσιμο ένα σύστημα φωτισμού με πολωτικά φίλτρα και χρήση τεχνικών διασταύρωσης που αποτρέπουν τη φαινομενική ανάκλαση στις εικόνες (Saldaña *et al.*, 2013). Όταν το αντικείμενο είναι ημιδιαφανές, ή οι πληροφορίες λαμβάνονται μέσω της ανάλυσης του περιγράμματός του, χρησιμοποιείται οπίσθιος φωτισμός, με την τοποθέτηση του αντικειμένου ανάμεσα στο φως και την κάμερα (Patel *et al.*, 2012).

Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του φωτισμού, είναι εάν το αντικείμενο που εξετάζεται είναι επίπεδο ή καμπύλο, εάν είναι απορροφητικό, μεταδοτικό ή ανακλαστικό, καθώς επίσης και η φύση του χαρακτηριστικού που απεικονίζεται. Με τη σχεδίαση ενός ελεγχόμενου συστήματος φωτισμού, η τεχνολογία της επεξεργασίας εικόνας που εφαρμόζεται μπορεί να απλοποιηθεί και ταυτόχρονα να έχει υψηλή ακρίβεια. Μια σημαντική παράμετρος λοιπόν για την επιτυχία της μεθόδου ανάλυσης εικόνας είναι να υπάρχει καλή αντίθεση και εικόνα που δεν επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες (Patel *et al.*, 2012).

Η εικόνα σχηματίζεται όταν το φως στο ορατό φάσμα προσπίπτει σε μια μερικώς ανακλαστική και μερικώς απορροφητική επιφάνεια, με τα διάσπαρτα φωτόνια να συγκεντρώνονται στο φακό της κάμερας και στη συνέχεια να μετατρέπεται σε ηλεκτρικά σήματα, με τη βοήθεια του αισθητήρα εικόνας (Moeslund, 2012; Lukinac *et al.*, 2018).

2.1.2.Κάμερα:

Η βασική τεχνολογία της ψηφιακής κάμερας είναι ένας αισθητήρας φωτός και ένα πρόγραμμα (Vyawahare *et al.*, 2013). Οι αισθητήρες οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία εικόνων ποικίλλουν. Ορισμένοι από αυτούς είναι υπερηχογραφήματα, ακτίνες X, φασματοσκοπία εγγύς υπέρυθρου (Brosnan & Sun, 2004). Πιο σύνηθες είναι οι αισθητήρες να βασίζονται σε τεχνολογία CCD κάμερας (κάμερα στερεάς κατάστασης συνδεδεμένης συσκευής- Charged Coupled Device), με εφαρμογές όπου γίνεται χρήση συσκευών θερμοϊονικού σωλήνα (Brosnan & Sun, 2004). Η τεχνολογία CCD αποτελείται από μια σειρά αισθητήρων (pixel), καθένα από τα οποία αποτελείται από ένα φωτοκύτταρο και έναν πυκνωτή (Peterson, 2001; Saldaña *et al.*, 2013). Το φορτίο του πυκνωτή εξαρτάται από το φως που λαμβάνεται από το φωτοκύτταρο. Αυτό μετατρέπεται σε τάση και στη συνέχεια σε

σήμα βίντεο. Οι CCD κάμερες μπορούν να είναι δύο τύπων, είτε τύπου σειράς είτε τύπου γραμμής σάρωσης. Οι πρώτου τύπου κάμερες αποτελούνται από μία μήτρα λεπτών φωτοευαίσθητων στοιχείων (photosites), από όπου λαμβάνεται πλήρης η εικόνα του αντικειμένου. Οι κάμερες τύπου γραμμικής σάρωσης χρησιμοποιούν μόνο μια γραμμή από τα φωτοευαίσθητα αυτά στοιχεία (Brosnan & Sun, 2004). Ενδείκνυνται για εφαρμογές όπου το αντικείμενο κινείται κάτω από την κάμερα ή όταν η κάμερα κινείται πάνω από το προς εξέταση αντικείμενο. Έτσι, η πλήρης εικόνα της επιφάνειας αποκτάται σταδιακά, από σειρά σε γραμμή. Για εμπορικές εφαρμογές όμως, οι κάμερες matrix έχουν πιο συχνή χρήση. Αυτές λαμβάνουν μια σκηνή χρησιμοποιώντας ένα CCD σε έναν δισδιάστατο πίνακα (Saldaña *et al.*, 2013).

Παράλληλα, έχουν χρησιμοποιηθεί και μονόχρωμες ή έγχρωμες κάμερες σε όλη τη βιομηχανία για μεγάλη ποικιλία εφαρμογών (Leemans *et al.*, 1998; Pearson & Slaughter, 1996; Steinmetz *et al.*, 1999; Yang, 1996; Brosnan & Sun, 2004), αλλά και κάμερες θερμικής απεικόνισης (Gowen *et al.*, 2010) και κάμερες terahertz (Lee & Lee, 2014).

Οι έγχρωμες κάμερες μπορούν να κατασκευαστούν με ένα μόνο CCD, που αποτελείται από εικονοστοιχεία που είναι ευαίσθητα στις κύριες ζώνες κόκκινου, πράσινου και μπλε (RGB), αλλά είναι επίσης διαθέσιμες πιο εξελιγμένες, υψηλής ποιότητας κάμερες, με τρία CCD. Σε αυτές τις κάμερες, το φως που έρχεται μέσω του κύριου φακού χωρίζεται σε τρεις ακτίνες φωτός μέσω μιας σειράς φακών και καθρεπτών, οι οποίοι δημιουργούν τρία αντίγραφα της σκηνής, ένα από το κόκκινο φίλτρο, ένα άλλο από το πράσινο φίλτρο και το τρίτο από το μπλε φίλτρο. Μετά από κάθε φίλτρο υπάρχει ένας μονόχρωμος αισθητήρας CCD, έτσι ώστε ο καθένας να αποκτά ένα μόνο σήμα RGB. Οι νεότερες κάμερες βασίζονται στο συμπληρωματικό σύστημα ημιαγωγών μεταλλικού οξειδίου (Complementary Metal-Oxide Semiconductors - CMOS). Η ενοποίηση με ημιαγωγούς αύξησε την πυκνότητα των αισθητήρων, επιτρέποντας την ταχεία τεχνολογική ανάπτυξη. Αυτοί οι αισθητήρες έχουν χαμηλότερη κατανάλωση ισχύος και χαμηλότερο κόστος κατασκευής και επί του παρόντος εφαρμόζονται ευρέως σε κάμερες και κινητές συσκευές (Cubero, 2012; Saldaña *et al.*, 2013).

Συχνά, η επιθεώρηση προϊόντων ή συγκεκριμένων χαρακτηριστικών απαιτεί συστήματα λήψης εικόνων που είναι ευαίσθητα σε διαφορετικά μήκη κύματος σε όλο το φάσμα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολυφασματικές κάμερες, οι οποίες συνδυάζουν διάφορες ορατές και αόρατες ζώνες χρησιμοποιώντας κατάλληλα φίλτρα και αισθητήρες (Saldaña *et al.*, 2013). Η χρήση ακτινών X έχει επίσης εφαρμογή για ανάλυση εικόνας σε διάφορα προϊόντα (Kim & Schatzki, 2000; Brosnan & Sun, 2004), όπως η ανίχνευση οστών σε κοτόπουλο και ψάρια (Jamieson, 2002; Brosnan & Sun, 2004).

Μια εναλλακτική, είναι και η χρήση επίπεδου σαρωτή, που αποτελεί μία μέθοδο γρήγορη, εύκολη, οικονομική και ανεξάρτητη από τις εξωτερικές συνθήκες φωτισμού, ενώ έχει και μεγάλη ακρίβεια (Esteller *et al.*, 2006; Vyawahare *et al.*, 2013). Είναι μια συσκευή που μετατρέπει έντυπες εικόνες σε ψηφιακή μορφή, η οποία μεταφέρεται στον υπολογιστή. Η κεφαλή του σαρωτή περιλαμβάνει καθρέπτες, φακούς, φίλτρο και συσκευή συζευγμένης φόρτισης (CCD συστοιχία) και κινείται πάνω από τη γραμμή του εγγράφου κατά μήκος της ζώνης που είναι προσαρτημένη στον κινητήρα. Κάθε γραμμή χωρίζεται σε κουκκίδες, που αντιστοιχούν σε εικονοστοιχεία. Το χρώμα που έχει κάθε εικονοστοιχείο χωρίζεται σε 3 συστατικά (κόκκινο, πράσινο, μπλε). Καθένα από τα στοιχεία αυτά αντιπροσωπεύεται από μία τιμή, που κυμαίνεται μεταξύ 0 και 255. Το φως υψηλής έντασης εκπέμπεται και ανακλάται από το έγγραφο και συγκλίνει προς μια σειρά από απαγωγούς μέσω ενός συστήματος φακών και καθρεπτών. Οι απαγωγείς μετατρέπουν τις εντάσεις του φωτός σε ηλεκτρικά σήματα και στη συνέχεια σε ψηφιακά δεδομένα από έναν αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα.

Η επίπεδη σάρωση είναι ταχεία, εύχρηστη, οικονομική, ακριβής και ανεξάρτητη από εξωτερικές συνθήκες φωτισμού (Esteller *et al.*, 2006; Vyawahare *et al.*, 2013). Ο επιτραπέζιος σαρωτής επίπεδης επιφάνειας είναι αρκετά αποτελεσματικός για μετρήσεις χρωματομετρικών παραμέτρων (Shishkin *et al.*, 2004; Vyawahare *et al.*, 2013).

2.1.3. Πλακέτα Λήψης Εικόνων:

Η λήψη εικόνας είναι το στάδιο μετατροπής των ηλεκτρονικών σημάτων από τη συσκευή ανίχνευσης σε αριθμητική μορφή (Brosnan & Sun, 2004). Μετά την απόκτηση της εικόνας, ακολουθεί η ψηφιοποίηση. Ψηφιοποίηση είναι η διαδικασία κατά την οποία οι εικονογραφικές εικόνες μετατρέπονται σε αριθμητική μορφή. Μια εικόνα δηλαδή, χωρίζεται σε ένα δισδιάστατο πλέγμα μικρών περιοχών, το οποίο περιέχει στοιχεία εικόνας που λέγονται εικονοστοιχεία, με τη χρήση μιας πλακέτας επεξεργαστή όρασης, που ονομάζεται digitizer ή frame grabber (Brosnan & Sun, 2004; Vyawahare *et al.*, 2013; Lukinac *et al.*, 2018).

Η επεξεργασία εικόνας περιλαμβάνει και μια σειρά λειτουργιών της εικόνας, οι οποίες θα βελτιώσουν την ποιότητά της, ώστε να απομακρυνθούν κάποια ελαττώματα, όπως είναι η γεωμετρική παραμόρφωση, η ακατάλληλη εστίαση, ο επαναλαμβανόμενος θόρυβος, ο μη ομοιόμορφος φωτισμός και η κίνηση της κάμερας. Η ανάλυση εικόνας είναι η διαδικασία κατά την οποία διακρίνονται οι περιοχές ενδιαφέροντος και παράγονται ποσοτικές πληροφορίες (Brosnan & Sun, 2004), οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα συστήματα ελέγχου με απώτερο σκοπό τη λήψη αποφάσεων (Lukinac *et al.*, 2018). Η επεξεργασία της εικόνας περιλαμβάνει μια σειρά

βημάτων, τα οποία χωρίζονται σε τρία επίπεδα, που είναι: επεξεργασία χαμηλού επιπέδου, επεξεργασία μεσαίου επιπέδου και επεξεργασία υψηλού επιπέδου (Gunasekaran & Ding, 1994; Sun, 2000; Brosnan & Sun, 2004). Η επεξεργασία χαμηλού επιπέδου περιλαμβάνει την απόκτηση της εικόνας και την προεπεξεργασία. Το στάδιο της προεπεξεργασίας περιλαμβάνει μία ή περισσότερες λειτουργίες μείωσης θορύβου, διόρθωσης γεωμετρικών παραμορφώσεων, διόρθωσης γκρίζου επιπέδου και διόρθωσης της εστίασης και στοχεύει στη βελτίωση της ποιότητας της εικόνας (Brosnan & Sun, 2004; Lukinac *et al.*, 2018). Η μεσαίου επιπέδου επεξεργασία περιλαμβάνει την τμηματοποίηση της εικόνας, καθώς και την αναπαράσταση και την περιγραφή της εικόνας. Η τμηματοποίηση είναι από τα πιο σημαντικά στάδια και η ακρίβεια του βήματος αυτού είναι σημαντική, καθώς στόχος είναι να διαχωριστεί η εικόνα σε μέρη που έχουν ισχυρή σχέση με το αντικείμενο (Brosnan & Sun, 2004). Μετά την τμηματοποίηση, η εικόνα αντιπροσωπεύει γενικά ένα όριο ή μια περιοχή. Η αναπαράσταση της εικόνας πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με την προγραμματισμένη εφαρμογή (Gunasekaran, 1996; Brosnan & Sun, 2004). Η τμηματοποίηση της περιοχής ενδιαφέροντος είναι σημαντική για κάθε τεχνική που αφορά στην επεξεργασία εικόνων. Μια περιοχή με ομοιογένεια, μειώνει τις παρεμβολές από το φόντο, ελαττώνει το θόρυβο και καθιστά τη μέθοδο πιο γρήγορη και απλή (Sengar *et al.*, 2017). Η επεξεργασία υψηλού επιπέδου περιλαμβάνει την αναγνώριση και ερμηνεία, συνήθως κάνοντας χρήση αλγορίθμων, όπως στατιστικών ταξινομητών ή πολυεπίπεδων νευρικών δικτύων της περιοχής ενδιαφέροντος, για την παροχή πληροφοριών που είναι χρήσιμες για τον έλεγχο της διαδικασίας ή της μηχανής που απαιτούνται για την ταξινόμηση (Brosnan & Sun, 2004). Λειτουργίες του νευρωνικού δικτύου και της ασαφούς λογικής έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς στην υπολογιστική όραση στη βιομηχανία τροφίμων (Ying *et al.*, 2003; Lukinac *et al.*, 2018).

Γενικά υπάρχουν τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση της εικόνας. Αυτές είναι: διαστολή (αυξάνει τη φωτεινότητα των εικονοστοιχείων που περιβάλλονται από γειτονικά με μεγαλύτερη ένταση), η διάβρωση (μειώνει τη φωτεινότητα των εικονοστοιχείων που περιβάλλονται από γειτονικά με χαμηλότερη ένταση), το όριο (μετατρέπει τη γκρι κλίμακα εικόνας σε δυαδική εικόνα), το κλείσιμο (αφαιρεί τις σκοτεινές κηλίδες που απομονώνονται σε φωτεινές περιοχές και εξομαλύνει τα όρια) και το άνοιγμα (αφαιρεί τα φωτεινά σημεία που απομονώνονται σε σκοτεινές περιοχές και εξομαλύνει τα όρια) (Abdelkarim *et al.*, 2005; Patel *et al.*, 2012). Τα εργαλεία επίσης που βελτιώνουν τις εικόνες περιλαμβάνουν: τους πίνακες αναζήτησης (μετατρέπουν τις τιμές της κλίμακας του γκρι από τη ληφθείσα εικόνα, σε άλλες τιμές της κλίμακας του γκρι στη μετασχηματισμένη εικόνα), τα χωρικά φίλτρα (βελτιώνουν την ποιότητα της εικόνας αφαιρώντας το θόρυβο, εξομαλύνοντας την εικόνα και βελτιώνοντας την ευκρίνειά της), καθώς και την

επεξεργασία του πεδίου συχνότητας (αφαιρεί την ανεπιθύμητη πληροφορία συχνότητας) (Patel *et al.*, 2012).

2.1.4.Υλικό και Λογισμικό:

Οι εξελίξεις των τελευταίων χρόνων στο υλικό (hardware) και το λογισμικό (software) των υπολογιστών, βοήθησαν στην επέκταση της χρήσης της ανάλυσης εικόνας, με την παροχή λύσεων χαμηλού κόστους, που οδήγησαν σε περισσότερες μελέτες σχετικά με την ανάπτυξη συστημάτων υπολογιστικής όρασης στη βιομηχανία τροφίμων (Sun, 2000). Για αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνων, η εφαρμογή ενός λογισμικού στον υπολογιστή επιτρέπει τη γρήγορη ανάπτυξη, τον εντοπισμό σφαλμάτων και τη δοκιμή. Όμως, κάποιες φορές, τα μεγέθη των εικόνων είναι πολύ μεγάλα και οι αλγόριθμοι περιπλέκονται, άρα η ταχύτητα μειώνεται και δεν ικανοποιούνται οι απαιτήσεις για υψηλές ταχύτητες σε συστήματα πραγματικού χρόνου. Τη λύση μπορεί να προσφέρει το υλικό (hardware), που επιτρέπει την ανάπτυξη υψηλότερων ταχυτήτων. Υπάρχουν πολλές βιώσιμες επιλογές για τη εφαρμογή hardware με αλγόριθμους επεξεργασίας εικόνας. Η εφαρμογή του υλικού παρόλα αυτά, συνεπάγεται αύξηση του κόστους ανάπτυξης, αφού χρειάζεται η δημιουργία ενός προσαρμοσμένου σχεδιασμού. Για το λόγο αυτό οι σχεδιαστές υλικού συνήθως χρησιμοποιούν κάποια είδη περιβάλλοντος προγραμματισμού υπολογιστών για να εφαρμόσουν ένα σχέδιο ώστε να επαληθεύσουν τη λειτουργικότητά του πριν από μια μακρά σχεδίαση υλικού (Du & Sun, 2006).

Γενικώς, έχει φανεί χρήσιμη η εφαρμογή αρκετών λογισμικών, όπως το Adobe Photoshop για τη μέτρηση και παρακολούθηση χρωμάτων (Vyawahare *et al.*, 2013), το Win ISI 1,50, με χρήση της τεχνικής NIR, για ελέγχους σε φέτες τυριού (González-Martín *et al.*, 2011), καθώς και το Unscrambler X έκδοση 9.7 (Rahman, *et al.*, 2020).

2.1.5.Χρήση Ηλεκτρονικού Υπολογιστή:

Η βασική τεχνική στην υπολογιστική όραση είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την επεξεργασία και την ανάλυση εικόνας. Οι κύριοι τύποι μετρήσεων των αντικειμένων (μέγεθος, σχήμα, χρώμα και υφή) μπορούν να ληφθούν από διάφορες εικόνες (Du & Sun, 2004a; Du & Sun, 2004b). Στους υπολογιστές, οι εικόνες αποθηκεύονται και επεξεργάζονται με τη μορφή πινάκων των οποίων τα στοιχεία είναι σε μορφή pixel. Δύο τύποι πληροφοριών αποθηκεύονται σε pixel, οι πληροφορίες γεωμετρίας, δηλαδή η θέση των εικονοστοιχείων στην εικόνα, και οι πληροφορίες επιφάνειας, δηλαδή τιμές έντασης που σχετίζονται με τα εικονοστοιχεία. Από τις πληροφορίες γεωμετρίας, μπορεί να ληφθεί συμπέρασμα σχετικά με το μέγεθος και το σχήμα του αντικειμένου. Για το χρώμα

και την υφή μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα μέσω των πληροφοριών της επιφάνειας του αντικειμένου. Αυτή η τεχνική έχει εφαρμοστεί με επιτυχία στη μελέτη διάφορων οπτικών ιδιοτήτων τροφίμων (Lukinac *et al.*, 2018).

3. Μέθοδοι Με Τις Οποίες Συνδυάζεται Η Ανάλυση Εικόνας:

3.1. Χρωματομετρία:

Στα τρόφιμα, η εμφάνιση είναι ένα κύριο κριτήριο όσον αφορά τη λήψη αποφάσεων για την αγορά (Kays, 1991; Wu & Sun, 2013a). Η εμφάνιση χρησιμοποιείται ως πρωταρχικό μέσο για την αξιολόγηση της ποιότητας σε όλη την αλυσίδα παραγωγής και αποθήκευσης (Kays, 1999; Wu & Sun, 2013a). Αξιολογείται λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος, τη μορφή, το σχήμα, το χρώμα, τη φρεσκότητα, αλλά και την απουσία οπτικών ελαττωμάτων (Costa *et al.*, 2011; Wu & Sun, 2013a).

Το χρώμα δεν είναι εγγενής ιδιότητα ενός αντικειμένου, καθώς αν αλλάξει η πηγή φωτός, αλλάζει και το χρώμα του αντικειμένου που μελετάται (Melendez-Martinez *et al.*, 2005; Wu & Sun, 2013a). Η αντίληψη του χρώματος είναι περίπλοκη και εξαρτάται από τη σύνθεση του αντικειμένου στο περιβάλλον στο οποίο φωτίζεται, από τα χαρακτηριστικά του ματιού και εγκεφάλου του ατόμου που το αντιλαμβάνεται, καθώς και από τις γωνίες φωτισμού και θέασης (Wu & Sun, 2013a). Το χρώμα, ωστόσο, είναι η πρώτη αίσθηση που θα αντιληφθεί ένας καταναλωτής και θα το χρησιμοποιήσει για την αποδοχή ή μη, ενός προϊόντος, επειδή με την παρατήρηση του χρώματος βρίσκονται και ορισμένες ανωμαλίες και ελαττώματα (Gokmen, 2007; Vyawahare *et al.*, 2013). Ο καταναλωτής πρώτα κρίνει ένα προϊόν βάσει του χρώματος, και στη συνέχεια από τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του, όπως η γεύση και το άρωμα (Iqbal *et al.*, 2010; Pallottino *et al.*, 2010). Είναι, επομένως, σημαντικό αισθητηριακό χαρακτηριστικό, το οποίο παρέχει τις βασικές ποιοτικές πληροφορίες για την ανθρώπινη αντίληψη και συνδέεται άρρηκτα με ποιοτικούς παράγοντες, όπως είναι η φρεσκότητα, η ωριμότητα, η ποικιλία και η ασφάλεια των τροφίμων, άρα είναι απαραίτητος παράγοντας βαθμολόγησης για την πλειοψηφία των τροφίμων (McCaig, 2002; Wu & Sun, 2013a). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί λοιπόν ως μέσο παρακολούθησης για ορισμένες συνθήκες επεξεργασίας. Για παράδειγμα, η μέτρηση χρώματος μπορεί να συμβάλει στην παρακολούθηση των αντιδράσεων Maillard που συμβαίνουν στο γάλα (Tossavainen & Kallioinen, 2008; Vyawahare *et al.*, 2013).

Η συνολική εμφάνιση οποιουδήποτε αντικειμένου είναι συνδυασμός χρωματικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Αυτά τα χαρακτηριστικά λαμβάνονται υπ' όψη σε οπτικές ή οργανοληπτικές αξιολογήσεις της εμφάνισης. Ένα συχνό φαινόμενο σε προϊόντα διατροφής, είναι το χρώμα να αναπτύσσεται λόγω διαφόρων χημικών αντιδράσεων που συμβαίνουν έμφυτα, ειδικά σε επεξεργασμένα τρόφιμα, ενώ πολλές φορές, μια ελκυστική εμφάνιση είναι δυνατόν να καλύπτει ελλείψεις σε γεύση ή άλλα χαρακτηριστικά, ή μια θαμπή εμφάνιση να μην υποστηρίζει την εξαιρετική γεύση που έχει ένα προϊόν. Σε διάφορες έρευνες σχετικά με τα τρόφιμα, η μέτρηση χρώματος είναι απαραίτητη, διότι πολλές φορές οι αλλαγές χρώματος πρέπει να ποσοτικοποιηθούν

για το συσχετισμό με τις διεργασίες ή διάφορες αισθητηριακές παραμέτρους (Vyawahare *et al.*, 2013).

Σε ένα εργοστάσιο τροφίμων, όσο αυξάνεται η απόδοση σε τρόφιμα και η ανοχή της ποιότητας, τόσο πιο χρήσιμες είναι οι αυτόματες μέθοδοι μέτρησης και ελέγχου χρωμάτων. Για την εμπορική ταξινόμηση των προϊόντων, απαιτείται γρήγορη και αντικειμενική μέτρηση του χρώματος των τροφίμων στον έλεγχο της ποιότητας. Η υπολογιστική όραση είναι μια τεχνική που διερευνάται για τη μέτρηση του χρώματος των τροφίμων, και κυρίως ερευνάται για την ικανότητα να παρέχει λεπτομερή χαρακτηρισμό της ομοιομορφίας των χρωμάτων, με βάση τα pixels. Ένα γρήγορο, ελαφρύ και οικονομικό υλικό μπορεί να μειώσει το χρόνο λήψης και ανάλυσης της εικόνας, να βελτιώσει την ταχύτητα και το χώρο αποθήκευσης και να αυξήσει την ανάλυση της εικόνας για λεπτομερή μέτρηση χρώματος (Wu & Sun, 2013a).

Για τη διατήρηση ομοιόμορφου χρώματος και εμφάνισης των προϊόντων, είναι απαραίτητες οι κατάλληλες μέθοδοι μέτρησης χρώματος. Μερικά από τα όργανα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα χρωματόμετρα, τα φασματοφωτόμετρα, τα διαγράμματα σύγκρισης ή οι χρωματικοί δίσκοι που αποδείχθηκαν χρήσιμα εργαλεία για τη μέτρηση των χρωμάτων. Ωστόσο, οι αντικειμενικές μέθοδοι μέτρησης χρώματος έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές τα τελευταία χρόνια με τις εξελίξεις στο υλικό του υπολογιστή και το λογισμικό και στην τεχνολογία ψηφιοποίησης. Με τις εξελίξεις στην ψηφιακή τεχνολογία έχει επιτραπεί η χρήση διαφόρων συσκευών, όπως σαρωτές επίπεδης βάσης, κάμερες, καθώς και αρκετών λογισμικών, όπως το Adobe Photoshop για τη μέτρηση και παρακολούθηση χρωμάτων (Hutchings, 1999; Vyawahare *et al.*, 2013). Η ψηφιακή φωτογραφία, οι σαρωτές επιτραπέζιων υπολογιστών και διάφορα λογισμικά που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία έγχρωμων εικόνων, παρέχουν μία ταχεία, αντικειμενική και αυτοματοποιημένη μέθοδο για την εκτίμηση χρωματομετρικών παραμέτρων από έγχρωμα δείγματα (Vyawahare *et al.*, 2013).

Τρία χρωματικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον ορισμό του χρώματος. Αυτά είναι το μοντέλο $L^* a^* b^*$, το μοντέλο RGB (κόκκινο, πράσινο και μπλε), και το μοντέλο CMYK (κυανό, ματζέντα, κίτρινο και μαύρο) (Vyawahare *et al.*, 2013).

Το 1931 ιδρύθηκε η Διεθνής Επιτροπή Φωτισμού, CIE. Αυτή είναι η διεθνής αρχή σε χώρους φωτισμού και χρωμάτων. Συνιστά τη μέτρηση χρωμάτων με τις τιμές L, a, b. Ο χρωματικός χώρος $L^* a^* b^*$ είναι το πληρέστερο μοντέλο που ορίστηκε από το CIE, το 1976. Βασίζεται στο χώρο χρωμάτων XYZ, και αναφέρεται ως μία προσπάθεια γραμμικοποίησης της αντιληπτότητας των διαφορών χρώματος, με τη χρήση πίνακα διαφοράς χρώματος. Οι μη γραμμικές σχέσεις για τα L^* , a^* και b^* ουσιαστικά μιμούνται τη λογαριθμική απόκριση του ανθρώπινου ματιού. Το L^* μετράει

τη φωτεινότητα, η οποία κυμαίνεται από 0 έως 100, ενώ τα a^* (από πράσινο σε κόκκινο) και b^* (από μπλε σε κίτρινο) είναι τα δύο χρωματικά συστατικά και κυμαίνονται από -120 έως 120 (Papadakis, Abdul-Malek, Kamdem & Yam, 2000; Yam & Papadakis, 2004).

Το RGB είναι προσθετικό μοντέλο που χρησιμοποιεί μεταδιδόμενο φως για να εμφανίσει χρώματα όπου το κόκκινο, το πράσινο και το μπλε φως προστίθενται, σε διάφορους συνδυασμούς, για την παραγωγή διαφόρων χρωμάτων. Το όνομα προέρχεται από τα αρχικά των βασικών χρωμάτων, κόκκινο, πράσινο, μπλε (Red, Green, Blue) (Vyawahare *et al.*, 2013). Με τη διαίρεση RGB εικόνας, δημιουργείται ο χρωματικός χώρος HSI (Hue, Saturation, Intensity), με τέσσερα χρώματα: μαύρο, λευκό και δύο επίπεδα γκρι, ανοιχτό και σκούρο (Danev *et al.*, 2019). Με διάφορες εντάσεις και αναλογίες των τριών χρωμάτων του RGB, δημιουργούνται επίσης τα χρώματα κυανό, ματζέντα, κίτρινο, μαύρο, άσπρο. Για το σχηματισμό χρώματος με RGB, τοποθετούνται τρεις χρωματιστές ακτίνες φωτός. Η μηδενική ένταση των στοιχείων δίνει μαύρο χρώμα και η πλήρης, δίνει λευκό. Όταν οι εντάσεις είναι ίδιες, παράγεται γκρι χρώμα. Όταν οι εντάσεις είναι διαφορετικές, παράγονται άλλα χρώματα, ανάλογα με την ένταση. Ένα δευτερεύον χρώμα προκύπτει επίσης από το άθροισμα δύο χρωμάτων ίδιας έντασης. Δηλαδή, με πράσινο και μπλε σχηματίζεται το κυανό, με κόκκινο και μπλε το μαντζέντα, και με κόκκινο και πράσινο το κίτρινο (Vyawahare *et al.*, 2013).

Το μοντέλο CMYK, αφορά στα τέσσερα μελάνια που χρησιμοποιούνται στις πιο πολλές έγχρωμες εκτυπώσεις: κυανό, μαντζέντα, κίτρινο, μαύρο. Αυτό το μοντέλο λέγεται αφαιρετικό γιατί τα μελάνια αφαιρούν τη φωτεινότητα από το λευκό. Σε πρόσθετα χρωματικά μοντέλα όπως το RGB, το λευκό είναι το "πρόσθετο", ως συνδυασμός όλων των κύριων χρωμάτων, ενώ το μαύρο είναι η απουσία φωτός. Στο μοντέλο CMYK, το λευκό είναι το φυσικό χρώμα του χαρτιού ή άλλου φόντου, ενώ το μαύρο προκύπτει από έναν πλήρη συνδυασμό χρωματιστών μελανιών. Επειδή τα συστήματα RGB και CMYK εξαρτώνται από τη συσκευή, δεν υπάρχει απλός ή γενικός τύπος μετατροπής του ενός συστήματος στο άλλο (Adobe Systems 2002. Adobe Systems. Adobe PhotoShop 7.0 User Guide, Adobe Systems Inc, San Jose, CA.; Vyawahare *et al.*, 2013).

Το μοντέλο $L^* a^* b^*$ αντίθετα, είναι ανεξάρτητο από τη συσκευή, παρέχοντας σταθερό χρώμα ανεξάρτητα από τη συσκευή εισόδου ή εξόδου, όπως ψηφιακή φωτογραφική μηχανή, σαρωτής, οθόνη και εκτυπωτής (Joshi, 2004; Vyawahare *et al.*, 2013). Μεταξύ των τριών μοντέλων, το μοντέλο $L^* a^* b^*$ έχει τη μεγαλύτερη γκάμα χρωμάτων, που περιλαμβάνει όλα τα χρώματα των μοντέλων RGB και CMYK (Adobe Systems 2002. Adobe Systems. Adobe PhotoShop 7.0 User Guide, Adobe Systems Inc, San Jose, CA). Οι τιμές $L^* a^* b^*$ χρησιμοποιούνται συχνά σε ερευνητικές μελέτες τροφίμων. Είναι οι συντεταγμένες του

χρωματικού χώρου Hunter (Hunter, 1948; Vyawahare *et al.*, 2013). Ωστόσο, το Lab χρησιμοποιείται πλέον συχνότερα ως άτυπη συντομογραφία για τον χρωματικό χώρο CIE 1976 (L^* , a^* , b^*) (ονομάζεται επίσης CIELAB, του οποίου οι συντεταγμένες είναι στην πραγματικότητα L^* , a^* και b^*). Έτσι, τα αρχικά Lab είναι από μόνα τους ασαφή. Οι χρωματικοί χώροι σχετίζονται ως προς τον σκοπό, αλλά διαφέρουν ως προς την εφαρμογή τους (Vyawahare *et al.*, 2013).

Σε αντίθεση με τα μοντέλα χρωμάτων RGB και CMYK, το μοντέλο Lab έχει σχεδιαστεί για να προσεγγίζει την ανθρώπινη όραση. Επιδιώκει την αντιληπτική ομοιομορφία και το συστατικό του L, ταιριάζει απόλυτα με την ανθρώπινη αντίληψη της ελαφρότητας. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κάνει ακριβείς διορθώσεις ισορροπίας χρώματος τροποποιώντας τις καμπύλες εξόδου στα στοιχεία a και b ή για να ρυθμιστεί η αντίθεση φωτεινότητας χρησιμοποιώντας το στοιχείο L (Vyawahare *et al.*, 2013).

Το μοντέλο RGB χρησιμοποιείται ευρέως στην περίπτωση των επίπεδων σαρωτών. Συνήθως οι σαρωτές διαβάζουν 3 χρώματα, κόκκινο, πράσινο και μπλε (RGB) από τη συστοιχία. Τα δεδομένα επεξεργάζονται με κάποιον αλγόριθμο για διόρθωση και στέλνονται στον υπολογιστή. Το αποτέλεσμα της σάρωσης αυτής είναι μια συμπιεσμένη εικόνα RGB, η οποία μπορεί να υποστεί επεξεργασία μόλις βρεθεί στον υπολογιστή, και να αποθηκευτεί. Κατά την επεξεργασία, κάθε εικονοστοιχείο μπορεί να αναπαρασταθεί ως δυαδικές τιμές για τα στοιχεία των τριών προαναφερθέντων χρωμάτων. Με σωστή διαχείριση, οι τιμές μετατρέπονται σε εντάσεις ή τάσεις μέσω διόρθωσης γάμμα. Η διόρθωση γάμμα επιτρέπει στους χρήστες να ταιριάζουν καλύτερα την ένταση των εκτυπώσεών τους με αυτό που βλέπουν στην οθόνη του υπολογιστή τους (CRT) (KKa *et al.*, 2015). Διορθώνεται η μη γραμμικότητα ορισμένων συσκευών και τελικά οι προβλεπόμενες εντάσεις αναπαράγονται στην οθόνη (Vyawahare *et al.*, 2013); <http://computer.howstuffworks.com/scanner2.htm>).

Τρεις είναι οι παράγοντες που καθορίζουν το χρώμα και αυτοί είναι, ο τύπος της πηγής εκπομπής που ακτινοβολεί ένα αντικείμενο, οι φυσικές ιδιότητες του αντικειμένου, και το ενδιάμεσο μέσο (όπως αέρας ή νερό) (Menesatti *et al.*, 2012; Saldaña *et al.*, 2013). Γενικώς, ένα σύστημα υπολογιστικής όρασης καταγράφει το χρώμα κάθε εικονοστοιχείου στην εικόνα του αντικειμένου, με τη χρήση τριών αισθητήρων χρώματος, ή ενός αισθητήρα με τρία εναλλακτικά φίλτρα, ανά εικονοστοιχείο (Forsyth & Ponce, 2003; Saldaña *et al.*, 2013).

Η ποιότητα που θα έχει η αποκτηθείσα εικόνα καθορίζεται από την επαναληψιμότητα και την ακρίβεια. Χωρίς αυτές τις παραμέτρους, οποιαδήποτε προσπάθεια μέτρησης χρωμάτων ή γεωμετρικών ιδιοτήτων των εικόνων, δεν έχει μεγάλη χρησιμότητα (Van Rousck *et al.*, 2010; Saldaña *et al.*, 2013). Η κάμερα που χρησιμοποιείται, χρησιμοποιεί μια μοναδική συστοιχία από

ευαίσθητα στο φως στοιχεία, σε ένα CCD τσιπ, με μια συστοιχία από φίλτρα που επιτρέπει σε άλλα στοιχεία να βλέπουν το κόκκινο χρώμα, σε άλλα το πράσινο και σε άλλα το μπλε. Η ισορροπία του λευκού, γίνεται για να μετρηθούν οι σχετικές εντάσεις χειροκίνητα ή αυτόματα (Mendoza *et al.*, 2006; Saldaña *et al.*, 2013). Εν συνεχεία, δημιουργείται μια ψηφιακή έγχρωμη εικόνα, με το συνδυασμό τριών εικόνων έντασης στην περιοχή 0-255. Λόγω εξάρτησης από τη συσκευή, τα σήματα RGB που παράγονται από διαφορετικές κάμερες, είναι διαφορετικά για την απεικόνιση του ίδιου αντικειμένου. Αυτά τα σήματα αλλάζουν και με την πάροδο του χρόνου, αφού εξαρτώνται και από τις ρυθμίσεις της κάμερας (Van Poucke *et al.*, 2010; Saldaña *et al.*, 2013).

Η σταθερότητα των χρωμάτων είναι ένα φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο το αντιληπτό χρώμα του αντικειμένου τείνει να μένει σταθερό σε αλλαγές του φωτισμού (Hurlbert, 2007; Saldaña *et al.*, 2013). Είναι σημαντική για την αναγνώριση των υπό εξέταση αντικειμένων, την κατανόηση της σκηνής και την αναπαραγωγή εικόνων, καθώς και για την ψηφιακή φωτογραφία (Li *et al.*, 2009; Saldaña *et al.*, 2013). Η διαδικασία με την οποία γίνεται αντιληπτή η σταθερότητα του χρώματος, εμπεριέχει δύο βήματα: την εκτίμηση των παραμέτρων φωτισμού και τη χρήση των παραμέτρων αυτών για τη λήψη του χρώματος υπό γνωστή και κανονική πηγή φωτός. Το πρώτο βήμα συμβάλει αρκετά στον υπολογισμό της σταθερότητας. Μέχρι σήμερα έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός αλγορίθμων για την εκτίμηση φωτισμού και χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες: εποπτευόμενες και μη εποπτευόμενες προσεγγίσεις. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει λύσεις βασισμένες στην εκπαίδευση όπως η σταθερότητα χρώματος Bayesian, η μέθοδος νευρικών δικτύων και η παλινδρόμηση φορέα υποστήριξης. Οι αλγόριθμοι της δεύτερης κατηγορίας περιλαμβάνουν το Max RGB, τον αλγόριθμο του γκριζού κόσμου, τις αποχρώσεις του γκρι (SoG) και την ταυτοποίηση της επιφάνειας του γκρι (GSI) (Saldaña *et al.*, 2013).

Η μέτρηση χρώματος από συστήματα υπολογιστικής όρασης προσφέρει τεράστιες ευκαιρίες, διότι μπορεί να σταθεί επάξια τόσο στη βιομηχανία τροφίμων, όσο και στον ερευνητικό τομέα (Vyawahare *et al.*, 2013).

3.2.Τεχνικές Απεικόνισης:

Δύο τεχνολογίες οι οποίες είναι δημοφιλείς και έχουν επιδείξει δυναμικότητα όσον αφορά τον έλεγχο της ποιότητας και ασφάλειας των γεωργικών προϊόντων και των τροφίμων, είναι οι τεχνικές που βασίζονται στην απεικόνιση και στη φασματοσκοπία (Abasi *et al.*, 2018; Adebayo *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2013; Elmasry & Nakauchi, 2016; Sanchez *et al.*, 2020). Οι διάφορες τεχνικές απεικόνισης, έδειξαν μια οικονομικά συμφέρουσα λύση στα συνήθη μειονεκτήματα που παρέχουν οι συμβατικές μέθοδοι ανάλυσης εικόνας. Επίσης, η λήψη ψηφιακών φωτογραφιών και η

επεξεργασία των εικόνων για την αξιολόγηση των εσωτερικών και εξωτερικών ποιοτικών χαρακτηριστικών πολλών τροφίμων, αποδείχθηκε αποτελεσματική, ακριβής και είναι πολύ πιθανό να αυξήσει την αποτελεσματικότητα της βιομηχανίας τροφίμων στο σύνολό της (Abasi *et al.*, 2018; Chen *et al.*, 2013; Sanchez *et al.*, 2020). Η απεικόνιση και η φασματοσκοπία είναι δύο έξυπνα εργαλεία ανάλυσης, τα οποία λαμβάνουν χωρικές και φασματικές πληροφορίες από κάποιο αντικείμενο (Chen *et al.*, 2013; Elmasry & Nakauchi, 2016; Sanchez *et al.*, 2020).

Ανάμεσα στις γνωστές αναδύμενες τεχνικές απεικόνισης που εφαρμόζονται στον έλεγχο της ποιότητας και ασφάλειας, περιλαμβάνονται: η παραδοσιακή απεικόνιση (Traditional Imaging- TI), η υπερφασματική απεικόνιση (HyperSpectral Imaging- HSI), η απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού (Magnetic Resonance Imaging- MRI), η θερμική απεικόνιση (Thermal Imaging- TI), η απεικόνιση οπίσθιου λέιζερ (Laser Backscattering Imaging- LBI), η απεικόνιση υπερήχων (Ultrasound Imaging- UI), η απεικόνιση με ακτινογραφία (X-ray Imaging- XRI), η απεικόνιση με φθορισμό (Fluorescence Imaging- FI), η απεικόνιση Raman (Raman Imaging- RI) και η οσφρητική απεικόνιση (Odor Imaging- OI). Όλες αυτές οι τεχνικές έχουν δείξει πολλές δυνατότητες στη μη καταστρεπτική παρακολούθηση της ποιότητας σε διάφορα προϊόντα διατροφής (Sanchez *et al.*, 2020).

Η μηχανική όραση, ή αλλιώς, η παραδοσιακή απεικόνιση, είναι από τους κορυφαίους κλάδους οπτικής απεικόνισης, οι οποίοι πρωτοεμφανίστηκαν στη δεκαετία του 1960 (Zhang *et al.*, 2014). Αναφέρεται σε μία μη καταστρεπτική τεχνολογία για ταξινόμηση, ενώ είναι και οικονομικά συμφέρουσα, υψηλής ακρίβειας και χρησιμοποιείται για διάφορες λειτουργίες, όπως η πρόβλεψη μήκους, πλάτους, μάζας, καθώς και η εύρεση ελαττωμάτων στο εσωτερικό και εξωτερικό του δείγματος, με τη χρήση διαφόρων καμερών (Su *et al.*, 2018). Η κύρια χρήση της μεθόδου είναι συνήθως η λήψη εικόνων βασιζόμενες σε έγχρωμες κάμερες RGB, που παρομοιάζονται με τα ανθρώπινα μάτια, τα οποία έχουν ευαισθησία στα μήκη κύματος του ορατού φωτός (Lorente *et al.*, 2012; Sanchez *et al.*, 2020). Η τεχνική αυτή δεν δίνει πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση των δειγμάτων τροφίμων που εξετάζονται, ενώ ταυτόχρονα, και η φασματοσκοπία μόνο δεν μπορεί να δώσει ουσιαστικά χωρικά χαρακτηριστικά σχετικά με το περιεχόμενο των τροφίμων, ενώ ταυτόχρονα δεν είναι ικανή να παραγάγει πληροφορίες σε οπτικοποιημένη μορφή, κυρίως όταν πρόκειται για ετερογενή τρόφιμα (Sanchez *et al.*, 2020).

Επομένως, αυξάνεται όλο και περισσότερο η χρήση των υπολοίπων τεχνικών απεικόνισης, ορισμένες από τις οποίες αναλύονται στη συνέχεια.

3.2.1. Υπερφασματική Απεικόνιση:

Η υπερφασματική απεικόνιση (Hyper-Spectral Imaging- HSI) είναι μια μέθοδος που συνδυάζει την απεικόνιση και τη φασματοσκοπική τεχνολογία και αποτελεί ένα μη καταστρεπτικό εργαλείο ανίχνευσης σε πραγματικό χρόνο, με στόχο την αξιολόγηση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων. Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία και τη μηχανική των οργάνων, έχουν συμβεί πολλαπλές βελτιώσεις στις τεχνικές αξιολόγησης της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων (Huang *et al.*, 2014). Η υπερφασματική απεικόνιση παρέχει τη δυνατότητα ταχείας παρακολούθησης, χωρίς παρεμβάσεις στα φυσικά και μορφολογικά χαρακτηριστικά και στις εγγενείς χημικές και μοριακές πληροφορίες ενός τροφίμου, με σκοπό την ανάλυση και την αξιολόγηση της ποιότητας και ασφάλειας (Wu & Sun, 2013c). Είναι μια μέθοδος που διευκόλυνε την κάλυψη των κενών που υπήρχαν ανάμεσα στις τεχνικές απεικόνισης και φασματοσκοπίας και αποτελεί λύση για την απόκτηση πληροφοριών για τη χωρική κατανομή αλλά και για τη χημική σύνθεση δειγμάτων τροφίμων (Chen *et al.*, 2013; Elmasry & Nakauchi, 2016; Ruiz-Altisent *et al.*, 2010).

Λόγω των περιορισμών της υπολογιστικής όρασης και των φασματοσκοπικών τεχνικών, ήταν αναγκαία η ανάπτυξη μιας πιο εξελιγμένης τεχνικής, όπως είναι η υπερφασματική απεικόνιση. Αρχικώς, εφαρμόστηκε στα πλαίσια της τηλεπισκόπησης (Goetz *et al.*, 1985), όμως πλέον έχει αναπτυχθεί κάνοντας ολοκληρωμένες και αξιόπιστες αναλύσεις στις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά δειγμάτων τροφίμων (Mahesh *et al.*, 2015). Η υπερφασματική απεικόνιση λαμβάνει φάσματα και χωρικές πληροφορίες αντικειμένων πάνω από τις υπεριώδεις, ορατές και εγγύς υπέρυθρες περιοχές του φάσματος (300 nm-2600 nm) (Bannon, 2009). Τα πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες τεχνικές, όπως η χρήση του μοντέλου RGB, η φασματοσκοπία NIR και η πολυφασματική απεικόνιση, περιλαμβάνουν τη δυνατότητα συλλογής μεγάλων και λεπτομερών φασματικών και χωρικών πληροφοριών. Χρησιμοποιείται πλέον σε πολλούς τομείς, όπως η γεωργία (Huang *et al.*, 2013; Lara *et al.*, 2013), η φαρμακευτική (Gendrin *et al.*, 2007; Cruz *et al.*, 2009) και η επιστήμη των υλικών (Garcia-Allende *et al.*, 2008). Όσον αφορά την εκτίμηση της ποιότητας και της ασφάλειας τροφίμων, βοηθά στην ανίχνευση μολύνσεων (Yao *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2004), στον εντοπισμό ελαττωμάτων (Xing *et al.*, 2005, Nagata *et al.*, 2006) και στον ποσοτικό προσδιορισμό των συστατικών (Qiao *et al.*, 2007). Αποκτά συνεχώς δημοφιλία, ώστε να σταθεί επάξια απέναντι στις καταναλωτικές απαιτήσεις και στις προκλήσεις της αγοράς (Huang *et al.*, 2014).

Είναι γνωστό ότι μοριακά, όλα τα δείγματα από τρόφιμα εκπέμπουν συνέχεια και απορροφούν ενέργεια με ταυτόχρονη μείωση ή αύξηση των επιπέδων μοριακής ενέργειας. Τα μόρια

απορροφούν, αντανακλούν και μεταδίδουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε μήκη κύματος συγκεκριμένα, χαρακτηριστικά για κάθε δομή (Sun, 2010). Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συνήθως περιλαμβάνουν υπεριώδη ακτινοβολία, ορατό φως, NIR, εγγύς υπέρυθρη ακτινοβολία και υπέρυθρες. Κάθε περιοχή σχετίζεται με ένα καθορισμένο είδος ατομικής ή μοριακής μετάβασης, που αντιστοιχεί σε διαφορετικές συχνότητες. Όταν ένα δείγμα τροφής εκτίθεται στο φως, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταδίδονται μέσω αυτού, και η ενέργεια του ηλεκτρομαγνητικού κύματος αλλάζει λόγω των δονήσεων που υφίστανται οι χημικοί δεσμοί. Έτσι λοιπόν, η φασματοσκοπία καθίσταται ικανή να παρέχει χαρακτηριστικά και λεπτομερή δακτυλικά αποτυπώματα από δείγματα των τροφίμων, χρησιμοποιώντας τις αλλαγές που συμβαίνουν στα επίπεδα μοριακής ενέργειας (Huang *et al.*, 2014).

Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα παρατηρείται ως φως και η μετάβαση του προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος εμφανίζεται ως αντανάκλαση, σκέδαση και μετάδοση φωτός. Το απορροφούμενο φως διεισδύει στον ιστό των δειγμάτων, οπότε η αντοχή και τα μήκη κύματος της εκπομπής και της απορρόφησης εξαρτώνται από τις φυσικές και χημικές καταστάσεις του υλικού. Το αναδύομενο φως μετατρέπεται σε φάσμα και αναδιαμορφώνεται σε εικόνα με υπερφασματόμετρα με υψηλές αναλογίες σήματος προς θόρυβο. Οι εικόνες αυτές μπορούν να υποδείξουν τα χημικά συστατικά και τις φυσικές ιδιότητες των δειγμάτων τροφίμων. Τα συστήματα υπερφασματικής απεικόνισης παρέχουν εικόνες με πολλά επίπεδα χωρικής εικόνας του ίδιου αντικειμένου σε διαφορετικά μήκη κύματος. Η προκύπτουσα εικόνα λαμβάνεται με την υπέρθεση των χωρικών εικόνων που συλλέγονται από τους υπερφασματικούς αισθητήρες και δημιουργείται ένας τρισδιάστατος κύβος δεδομένων, που λέγεται hypercube, ο οποίος αναλύεται περισσότερο. Οι εικόνες αποτελούνται από διανυσματικά εικονοστοιχεία και αντιπροσωπεύουν τη σύνθεση και την εμφάνιση ενός συγκεκριμένου δείγματος τροφίμου. Ομοιότητες μεταξύ των φασμάτων εικόνας από δύο δείγματα συνεπάγονται ομοιότητα στη χημική σύνθεση και τα φυσικά χαρακτηριστικά (Gowen *et al.*, 2007).

Ο hypercube κατασκευάζεται με τρεις τρόπους: σάρωση περιοχής, σάρωση σημείων και σάρωση γραμμής (Gowen *et al.*, 2007). Στα πιο πολλά εργοστάσια επεξεργασίας τροφίμων υπάρχουν μεταφορικοί ιμάντες για επιτόπια επιθεώρηση, επομένως η μέθοδος που προτιμάται είναι η σάρωση γραμμής (ή pushbroom). Ο hypercube αποκτάται με τη σύνθεση πολλών ολόκληρων γραμμών μιας εικόνας αντί ενός εικονοστοιχείου τη φορά, και αποθηκεύεται με τη μορφή BIL, που είναι σχήμα για την αποθήκευση των πραγματικών τιμών των pixel μιας εικόνας. Οι χωρικές και φασματικές πληροφορίες που έχουν αποθηκευτεί με τη μορφή αυτή, αναλύονται ταυτόχρονα (Huang *et al.*, 2014).

Τα υπερφασματικά συστήματα απεικόνισης μπορούν να λειτουργήσουν με τρόπους ανάκλασης ή μετάδοσης. Για να αποκτηθούν εικόνες σε λειτουργία μετάδοσης, γίνεται χρήση λεπτών μεγεθών δείγματος για να μπορεί το φως να διέρχεται στο δείγμα. Πιο παχιά δείγματα χρησιμοποιούνται στη λειτουργία ανάκλασης. Με τον τρόπο αυτό, τα υλικά ελέγχονται στο σύνολό τους σε κατάσταση ανάκλασης, χωρίς τη χρήση φετών. Έτσι είναι δυνατή η επιθεώρηση σε τρόφιμα, όπως μήλα (Peng & Lu, 2008), αγγούρια (Ariana & Lu, 2010), μανιτάρια (Gowen *et al.*, 2009), κοτόπουλα (Chao *et al.*, 2008). Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα, σε διάφορες έρευνες, όπως είναι η επιθεώρηση της ποιότητας των εσπεριδοειδών (Molto *et al.*, 2010), ανίχνευση ζημιών στα μανιτάρια (Gowen *et al.*, 2008) , ανάλυση μόλυνσης κοπράνων στα μήλα (Liu *et al.*, 2007), παρακολούθηση ποιότητας σε αποθηκευμένα αβοκάντο (Maftoonazad *et al.*, 2011), ανάλυση κατανομής υγρασίας στο φιλέτο ψαριού σολομού (He, Wu, & Sun, 2013), προσδιορισμός ξένων ουσιών στο φρέσκο μαρούλι (Mo *et al.*, 2017; Sanchez *et al.*, 2020).

Μια παράμετρος που θα μπορούσε να έχει επιπτώσεις κατά την υπερφασματική απεικόνιση είναι το βάθος διείσδυσης του φωτός, επειδή εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες. Είναι το βάθος όπου το προσπίπτον φως μειώθηκε σε ποσοστό 99%. Αυτό φυσικά μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την κατάσταση, τον τύπο του δείγματος και τη ζώνη ανίχνευσης (Huang *et al.*, 2014).

Τα όργανα τα οποία χρησιμοποιούνται στην υπερφασματική απεικόνιση είναι βασικά και έχουν μεγάλη σημασία για να αποκτηθούν υψηλής ποιότητας υπερφασματικές εικόνες. Η επιλογή και ο σχεδιασμός τους απαιτούν καλή γνώση της διαμόρφωσης και της βαθμονόμησης του συστήματος της υπερφασματικής απεικόνισης (Wu & Sun, 2013c). Ένα τυπικό σύστημα υπερφασματικής απεικόνισης περιλαμβάνει υλικό και λογισμικό. Η διαμόρφωση μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το εξεταζόμενο αντικείμενο και την τεχνική απόκτησης εικόνας. Οι πιο πολλές πλατφόρμες υπερφασματικού συστήματος έχουν κοινά βασικά στοιχεία, δηλαδή μια πηγή φωτός για φωτισμό, που παράγεται συνήθως από λαμπτήρες αλογόνου-βολφραμίου, ελαφριά ακτινοβολία είτε απευθείας στα δείγματα είτε μέσω οπτικής ίνας, έναν ανιχνευτή για τη λήψη φασματικών και χωρικών πληροφοριών, έναν υπερφασματογράφο για τη διασπορά των μηκών κύματος του φωτός και την παροχή σημάτων στη φωτοευαίσθητη επιφάνεια του ανιχνευτή, έναν αντικειμενικό φακό για την προσαρμογή του εύρους απόκτησης φωτός, έναν αντικειμενικό πίνακα που συγκρατεί και μεταφέρει το δείγμα και είναι στερεωμένος σε έναν μάντα μεταφοράς, και έναν υπολογιστή που συνθέτει και αποθηκεύει το τρισδιάστατο hypercube (Huang *et al.*, 2014).

Οι πηγές φωτός αποτελούν ένα ουσιαστικό μέρος των εν λόγω συστημάτων. Οι τυπικές πηγές φωτός εμπεριέχουν λαμπτήρες αλογόνου, διόδους εκπομπής φωτός, λέιζερ, καθώς και συντονιζόμενες πηγές φωτός (Wu & Sun, 2013c).

Οι λαμπτήρες αλογόνου, τυπικά, χρησιμοποιούνται στις φασματικές περιοχές του ορατού (VIS) και εγγύς υπέρυθρου (NIR). Το φως είναι ένα συνεχές φάσμα, που εκτείνεται στην περιοχή του ορατού μέχρι του υπέρυθρου, χωρίς αιχμηρές κορυφές. Οι λαμπτήρες αυτοί έχουν χαμηλή τάση και θεωρούνται πηγές φωτός γενικής χρήσης. Οι λαμπτήρες αλογόνου-βολφραμίου έχουν χρησιμοποιηθεί ως πηγές φωτισμού σε μετρήσεις υπερφασματικής ανάκλασης (Wu, Shi *et al.*, 2012; Wu & Sun, 2013c). Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν λαμπτήρες αλογόνου υψηλής έντασης για τον εντοπισμό εσωτερικών χαρακτηριστικών τροφίμων (Ariana & Lu, 2008). Οι δίοδοι εκπομπής φωτός (Light Emitting Diodes-LED) είναι πηγές φωτός ημιαγωγών, οι οποίες έχουν αναγνωρίσει ταχεία ανάπτυξη λόγω του μικρού τους μεγέθους, του χαμηλού κόστους, της ταχείας απόκρισης και της μεγάλης διάρκειας ζωής, καθώς και εξ' αιτίας της χαμηλής συχνότητας αντικατάστασης των λαμπτήρων, της χαμηλής παραγωγής θερμότητας, της χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, της ευρωστίας, της χαμηλής θερμοκρασίας κατά την αφή και της ανθεκτικότητας στους κραδασμούς. Τέτοιες λυχνίες, αναλόγως και με τα υλικά που χρησιμοποιούνται, εκτός από φως στενής ζώνης σε μήκη κύματος υπεριώδους και ορατού ή υπέρυθρου, παράγουν και ευρείας ζώνης λευκό φως, υψηλής έντασης (Wu & Sun, 2013c).

Σε πρόσφατες μελέτες, τα λέιζερ έχουν χρησιμοποιηθεί ως πηγές διέγερσης σε εφαρμογές απεικόνισης υπερφασματικού φθορισμού (Cho *et al.*, 2009) αλλά και για την απεικόνιση Raman (Qin *et al.*, 2011), για έλεγχο της ποιότητας των τροφίμων. Επίσης, σε διάφορα συστήματα υπερφασματικής απεικόνισης, μια συσκευή διασποράς μήκους κύματος μπορεί να τοποθετηθεί ανάμεσα στον ανιχνευτή και το δείγμα, ώστε το φως να διασκορπίζεται σε διαφορετικά μήκη κύματος μετά την αλληλεπίδρασή του με το δείγμα. Ένας ισοδύναμος τρόπος είναι η ρυθμιζόμενη πηγή φωτός, η οποία συνδυάζει το φωτισμό ευρείας ζώνης και την προαναφερθείσα συσκευή. Τέτοιες συσκευές επιτρέπουν την άμεση σάρωση περιοχής για τη λήψη χωρικών και φασματικών πληροφοριών του δείγματος. Μόνο το φως στενής ζώνης προσπίπτει στο αντικείμενο, επομένως η ένταση του φωτός αυτού δεν είναι πολύ μεγάλη, άρα μπορεί να μειωθεί και η ακτινοβολία και οι συνέπειες της θερμότητας επάνω στο δείγμα. Τέτοιου είδους πηγές χρησιμοποιούνται κυρίως για σάρωση περιοχής. Επομένως, οι ρυθμιζόμενες πηγές φωτός πρακτικά δεν είναι κατάλληλες για συστήματα μεταφορικών ιμάντων (Wu & Sun, 2013c).

Όσον αφορά τον ανιχνευτή, υπάρχουν τρεις επιλογές κάμερας, που περιλαμβάνουν τις συσκευές συζευγμένης φόρτισης (CCD) με βάση το πυρίτιο, ή συμπληρωματικές κάμερες ημιαγωγών μεταλλικού οξειδίου (CMOS), ή ανιχνευτές συστοιχίας με βάση τον τελλουριούχο υδράργυρο. Η επιλογή εξαρτάται από το επιθυμητό μήκος κύματος, την κβαντική απόδοση η οποία εκπροσωπεί την ευαισθησία, και το κόστος. Μέχρι τώρα, η πρώτη κάμερα έχει την πιο μεγάλη χρήση

VIS/NIR για την ανάλυση της ποιότητας και ασφάλειας, λόγω χαμηλού κόστους και μεγάλης διαθεσιμότητας (Lefcourt *et al.*, 2013).

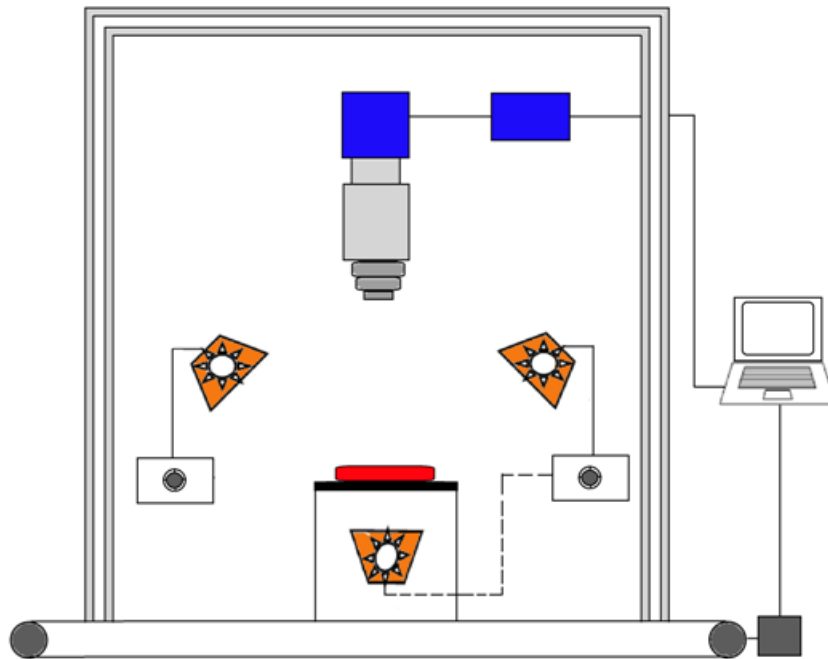
Είναι εύκολη τεχνική, με εύκολες εγκαταστάσεις, ωστόσο έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα. Οι διαδικασίες επεξεργασίας της εικόνας απαιτούν τεχνικές γνώσεις και χρειάζονται εξειδικευμένο προσωπικό. Ως αποτέλεσμα, πολλοί δεν χρησιμοποιούν τέτοια συστήματα και συνεχίζουν να χρησιμοποιούν τις συμβατικές μεθόδους. Για να ξεπεραστεί το εμπόδιο αυτό, γίνονται συνεχώς μελέτες για ενίσχυση των τεχνικών αυτών, με την ανάπτυξη λιγότερων διαδικασιών μετά τη διαδικασία της απεικόνισης (Sanchez *et al.*, 2020).

Πρόσφατα, προτάθηκε η χρήση ενός συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης χειρός (400-720nm), ώστε να βοηθήσει στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας τροφίμων (Lefcourt *et al.*, 2013). Αυτό μπορεί να φανεί χρήσιμο στην ανίχνευση φθοράς σε HDPE επιφάνειες αλλά και στην ανίχνευση παρουσίας υπολειμμάτων προϊόντων. Αυτός ο φορητός εξοπλισμός μπορεί να φανεί εξαιρετικά χρήσιμος και στον έλεγχο της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων (Huang *et al.*, 2014).

Λόγω της πληθώρας πληροφοριών που αντλούνται από τρισδιάστατα υπερφασματικά δεδομένα, τα σημαντικά χαρακτηριστικά εξάγονται και συγκρίνονται με στοχευμένα χαρακτηριστικά αντικειμένων. Τέτοιες μέθοδοι εξαγωγής χαρακτηριστικών είναι το φίλτρο Gabor, καθώς και η PCA. Η βασική φασματική επεξεργασία είναι ο μέσος όρος του φάσματος. Το μέσο φάσμα υπολογίζεται με μέσο όρο την τιμή των pixel που συμπεριλαμβάνονται στην απόδοση ενδιαφέροντος. Ένα μεμονωμένο φάσμα, αντιστοιχεί σε μεμονωμένα δείγματα. Σήμα παρεμβολής, όπως η μετατόπιση βάσης, η απόκλιση σωματιδίων, ή η ετερογένεια επιφανείας, θα μπορούσε να υπάρχει στο φάσμα. Επομένως, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τεχνικές φασματικής προεπεξεργασίας για την αφαίρεση αυτών των μη χημικών προκαταλήψεων από τις φασματικές πληροφορίες. Ο hypercube που προκύπτει, είναι υπολογιστικά μεγάλος. Επομένως, εξάγεται το χαρακτηριστικό μήκος κύματος με τη χρήση ποιοτικής ή ποσοτικής ανάλυσης. Τέτοιες αναλύσεις στοχεύουν στον εντοπισμό της σχέσης ανάμεσα στα χαρακτηριστικά των τροφίμων και στα φασματικά χαρακτηριστικά. Σημαντικό επίσης στην επεξεργασία είναι να βελτιστοποιηθούν τα μήκη κύματος (Huang *et al.*, 2014).

Για την ποιοτική ανάλυση γίνεται χρήση αναλυτικών εργαλείων διάκρισης, όπως χειροκίνητη παρατήρηση, ανάλυση αρχικών συστατικών (PCA), ανάλυση γραμμικής διάκρισης (LDA) και ομαδοποίηση μέσων-k για την ταξινόμηση ή αξιολόγηση των δειγμάτων (Feng & Sun, 2012; Camps-Valls & Bruzzone, 2005). Για την ποσοτική ανάλυση, πολυπαραγοντικά αναλυτικά εργαλεία όπως PCA, PLSR, σταδιακή πολυγραμμική παλινδρόμηση (SMLR), χρησιμοποιούνται

συνήθως για την πρόβλεψη χημικού περιεχομένου (Qin *et al.*, 2013; Cen & He, 2007). Τα PCA και PLSR είναι οι μέθοδοι μοντελοποίησης με τη μεγαλύτερη χρήση. Έχει εφαρμοστεί και μια άλλη μέθοδος, αυτή της μηχανής φορέα υποστήριξης (SVM) σε ορισμένες μελέτες ελέγχου ποιότητας και ασφάλειας μη παρεμβατικών τροφίμων (Huang *et al.*, 2013; Sonka *et al.*, 1998; Nakariyakul & Casasent, 2011).



Εικόνα 2: Αναπαράσταση συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης

3.2.2. Απεικόνιση Μαγνητικού Συντονισμού:

Η απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού (Magnetic Resonance Imaging-MRI) έχει ευρεία χρήση στην ιατρική διαγνωστική και στις χειρουργικές επεμβάσεις για να εντοπίζεται η σύνθεση ιστών στο εσωτερικό ενός σώματος (Robb, 1985; Cernadas *et al.*, 2005), καθώς αποδίδει ψηφιακές πληροφορίες για μύες, οστά ή άλλους μαλακούς ιστούς (Duncan & Ayache, 2000; Cernadas *et al.*, 2005). Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της μαγνητικής τομογραφίας είναι οι μη επεμβατικές και μη καταστρεπτικές δυνατότητες. Η τεχνική αυτή δίνει ένα τρισδιάστατο σύνολο δεδομένων (3D), το οποίο αποτελείται από δισδιάστατες φέτες του προς μελέτη αντικειμένου (Cernadas *et al.*, 2005).

Η MRI, εκτός από τις ιατρικές και εργαστηριακές εφαρμογές, έχει κερδίσει μεγάλη σπουδαιότητα και στην ασφάλεια των τροφίμων. Είναι μια τεχνική απεικόνισης, η οποία ακολουθεί τη αρχή του μαγνητικού πεδίου και του συστήματος ραδιοσυχνότητας, μεταδίδοντας τις ιδιότητες

σήματος από κάποιο συγκεκριμένο προϊόν, καθιστώντας έτσι τις φυσικές και χημικές πληροφορίες ορατές. Κατά τη χρήση της τεχνικής αυτής, όταν ένα προϊόν διατροφής με μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό τοποθετηθεί σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο, η μέση μαγνητική ροπή πολλών πρωτονίων ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση του πεδίου και έτσι δημιουργούνται μαγνητικές ιδιότητες (Chen *et al.*, 2013). Κάθε μόριο νερού έχει δύο πυρήνες υδρογόνου ή πρωτόνια. Όταν η τροφή τοποθετείται σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο, η μέση μαγνητική ροπή πολλών πρωτονίων συμπίπτει με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου. Ο πομπός ραδιοσυχνότητας ενεργοποιείται για μικρό χρονικό διάστημα για να παράγει ένα μεταβαλλόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο έχει μια συχνότητα, τη συχνότητα συντονισμού, η οποία μπορεί να απορροφήσει και να αντιστρέψει την περιστροφή των πρωτονίων στο μαγνητικό πεδίο. Αφού απενεργοποιηθεί το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, η περιστροφή των πρωτονίων επιστρέφει σε θερμοδυναμική ισορροπία και ο μαγνητισμός της μάζας ευθυγραμμίζεται ξανά με το στατικό μαγνητικό πεδίο. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας χαλάρωσης, δημιουργείται ένα σήμα ραδιοσυχνότητας και το πηνίο δέκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μέτρηση (Chen *et al.*, 2013).

Οι μαγνητικές ιδιότητες που παράγονται συσχετίζονται με τις φυσικές ή τις χημικές ιδιότητες του προϊόντος τροφής που είναι χρήσιμο για ανάλυση (Sanchez *et al.*, 2020). Υπάρχουν ακόμα πολυάριθμες πιθανές εφαρμογές της μαγνητικής τομογραφίας στην επιστήμη τροφίμων, όπως είναι η χρήση της για βελτιστοποίηση των διαδικασιών της ζωικής παραγωγής, με εφαρμογές που αφορούν τη διατροφή των ζώων και το γενετικό τους τύπο, αλλά και για την ικανοποίηση των καταναλωτών (Cernadas *et al.*, 2005).

Ένα σύστημα μαγνητικής τομογραφίας αποτελείται από έναν μαγνήτη και έναν εξοπλισμό τροφοδοσίας, ο οποίος παράγει ένα μεγάλο φάσμα ομοιόμορφου και σταθερού μαγνητικού πεδίου, ένα πηνίο μαγνητικού πεδίου, ένα σύστημα ραδιοσυχνότητας και ένα σύστημα υπολογιστών με μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης μέσω των οποίων γίνεται συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων (Sanchez *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2013)

Κατά τη χρήση αυτής της τεχνικής, υπάρχει ένας αισθητήρας, ο MRI scanner, που μετατρέπει την είσοδο των ψηφιακών δεδομένων. Κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας, τα ψηφιακά δεδομένα μετατρέπονται σε κατάλληλη μορφή. Πραγματοποιείται μέτρηση των ιδιοτήτων των αντικειμένων, οι οποίες θα φανούν χρήσιμες στην ταξινόμηση. Κατά την επιλογή των χαρακτηριστικών, επιλέγεται κάποιο υποσύνολο χαρακτηριστικών το οποίο θα είναι πιο ιδανικό. Ένας ταξινομητής καταχωρεί με αυτό τον τρόπο το αντικείμενο που έχει εισαχθεί σε μια συγκεκριμένη κατηγορία. Μετά το σχεδιασμό του ταξινομητή, υπάρχει το στάδιο αξιολόγησης, για την αξιολόγηση της απόδοσης του ταξινομητή που χρησιμοποιήθηκε. Όλα αυτά τα στάδια έχουν τη δυνατότητα

αλληλοσύνδεσης και ανάλογα με το εξερχόμενο αποτέλεσμα, μπορεί κανείς να επανασχεδιάσει τα προηγούμενα στάδια ώστε να βελτιωθεί η απόδοση (Cernadas *et al.*, 2005).

Για το στάδιο προεπεξεργασίας, εισάγεται ένας αλγόριθμος ο οποίος εξάγει την ακανόνιστη περιοχή ενδιαφέροντος (ROI) από τις ληφθείσες MRI εικόνες. Οι εικόνες χωρίζονται σε δύο περιοχές, το δείγμα και το φόντο. Η περιοχή του δείγματος είναι εκείνη που περιέχει πληροφορίες για την υφή της εικόνας. Ο όρος υφή, αναφέρεται σε ιδιότητες που αντιπροσωπεύουν την επιφάνεια ή τη δομή ενός αντικειμένου. Συνήθως περιγράφεται με χαρακτηρισμούς όπως λεπτή, χονδροειδής, κοκκώδης, λεία. Υπάρχουν πέντε μεγάλες κατηγορίες χαρακτηριστικών με σκοπό την αναγνώριση της υφής, και είναι στατιστικά, γεωμετρικά, χαρακτηριστικά βασιζόμενα σε μοντέλα και χαρακτηριστικά επεξεργασίας σήματος. Τα στατιστικά, και τα χαρακτηριστικά επεξεργασίας σήματος, έχουν την πιο ευρεία χρήση. Κοινό σημείο σε πολλές προσεγγίσεις είναι ότι η υφή της εικόνας περιγράφεται από ένα φορέα χαρακτηριστικών ιδιοτήτων ο οποίος αντιπροσωπεύει ένα σημείο σε έναν πολυδιάστατο χώρο χαρακτηριστικών. Ο επόμενος στόχος είναι η εύρεση ενός κριτηρίου διάκρισης που αποδίδει κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηρισμό υφής. Ένα μειονέκτημα είναι πως οι MRI εικόνες είναι εγγενώς θορυβώδεις. Επομένως, γίνεται προεπεξεργασία των πρωτότυπων εικόνων για τη μείωση του θορύβου πριν από τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της υφής. Η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί *in situ*, είναι αυτόματη, διακατέχεται από αντικειμενικότητα και δεν καταστρέφει τα προϊόντα (πχ κρέας) (Cernadas *et al.*, 2005).

Η μαγνητική τομογραφία έχει μεγάλη συμβολή στην ταχεία και μη καταστρεπτική αξιολόγηση διαφόρων ιδιοτήτων σε διάφορα τρόφιμα, όπως είναι οι κόνδυλοι (Sanchez *et al.*, 2020). Για την αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων έχουν εφαρμοστεί τόσο ποιοτικές, όσο και ποσοτικές τεχνικές μαγνητικής τομογραφίας πρωτονίων. Έχει μελετηθεί η παρακολούθηση της ωρίμανσης των φρούτων σε λωτούς (Clark & MacFall, 2003), εσπεριδοειδή (Galed *et al.*, 2004) και φοινικόδεντρα (Shaarani *et al.*, 2010), για τον εντοπισμό της δομής του ιστού, της κατάστασης του νερού, των εσωτερικών ιδιοτήτων ή για την αναστολή των μυκήτων χρησιμοποιώντας την τεχνική MRI (Chen *et al.*, 2013). Επίσης, έχει μελετηθεί η χρήση της μαγνητικής τομογραφίας για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ξηρή ουσία σε πατάτες, αλλά και για τον προσδιορισμό διαφόρων ποικιλιών πατάτας (Thybo *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2013), ενώ επίσης και για το χαρακτηρισμό της κινητικότητας και της κατανομής νερού σε μπισκότα και δημητριακά που έχουν χαμηλή υγρασία (Cornillon *et al.*, 2000; Chen *et al.*, 2013). Η τεχνική μαγνητικής τομογραφίας έχει αποτελέσει καλό εργαλείο και για την παρακολούθηση της διαδικασίας κατάψυξης (Chen *et al.*, 2013). Συμπερασματικά, έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως για τον έλεγχο ποιότητας σε διάφορα τρόφιμα που περιλαμβάνουν δημητριακά, προϊόντα κρέατος, φρούτα, λαχανικά, ενώ ως επί το πλείστον οι

εφαρμογές αφορούν την κατάσταση του νερού που σχετίζεται με την ποιότητα των τροφίμων (Wold *et al.*, 2011; Ballerini *et al.*, 2002; Hills *et al.*, 1997; Hindmarsh *et al.*, 2004; Mahdjoub *et al.*, 2006; Otero *et al.*, 2009; Haishi *et al.*, 2011).

3.2.3.Θερμική Απεικόνιση:

Η θερμοκρασία αποτελεί έναν υψίστης σημασίας παράγοντα στην πλειοψηφία των γεωργικών και διατροφικών διαδικασιών. Γενικώς, η παρακολούθησή της στα τρόφιμα γίνεται με τη χρήση κλασικών ανιχνευτών, οι οποίοι περιλαμβάνουν θερμοστοιχεία, θερμίστορ, θερμόμετρα, αισθητήρες θερμοκρασίας αντίστασης (Vadivambal & Jayas, 2011; Ali *et al.*, 2020a). Τέτοιου είδους συσκευές όμως είναι περιοριστικές, καθώς χρειάζονται άμεση επαφή με το δείγμα, κάτι που συνήθως περιορίζει την εφαρμογή τους ως προς την επιλογή εύρους θερμοκρασίας και μοναδικής θέσης μέτρησης. Η θερμική απεικόνιση εξαλείφει τέτοιους περιορισμούς, παρέχοντας ένα μέσο το οποίο δεν απαιτεί επαφή, ούτε καταστροφή του προϊόντος για τη μέτρηση της κατανομής θερμοκρασίας ενός δείγματος. Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται σε αυτή την τεχνική είναι απλές (πολλές είναι συσκευές “point and shoot”). Η τεχνική αυτή είναι δημοφιλής, με ευρεία χρήση στους τομείς των ιατρών, των πολιτικών μηχανικών, αλλά και σε βιομηχανικούς τομείς, στον αγροτικό τομέα, στις βιομηχανίες τροφίμων, όπως επίσης και στην αεροδιαστημική (Ali *et al.*, 2020a).

Η θερμική εικόνα έχει σύντομο χρόνο λήψης, κάτι που δεν μπορεί να συμβεί με τους συμβατικούς ανιχνευτές της θερμοκρασίας. Οι συσκευές είναι εύκολες στη χρήση και με βάση τις θερμικές εικόνες γίνεται αντιληπτή η κατανομή της θερμοκρασίας. Με την τεχνική αυτή, πραγματοποιείται ταυτόχρονη παρακολούθηση μιας ευρείας επιφάνειας και μετράται η δυναμική διακύμανση της θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο. Απαιτεί ελάχιστα, απλά και άμεσα όργανα, και με τη βοήθεια προηγμένων τεχνικών επεξεργασίας εικόνας, είναι δυνατή η σύγκριση διαφορετικών περιοχών θερμικών εικόνων, μία διαδικασία που είναι χρήσιμη για την ερμηνεία διαφόρων δεδομένων. Ένα ακόμη πλεονέκτημα είναι πως η θερμική απεικόνιση δεν περιλαμβάνει βλαβερές ακτινοβολίες, επομένως είναι κατάλληλη για επαναλαμβανόμενη και μακροχρόνια χρήση (Ali *et al.*, 2020a).

Η θερμική απεικόνιση, αποτελεί μια αξιόπιστη μέθοδο με σκοπό την αξιολόγηση της ποιότητας και την επιθεώρηση της ασφάλειας των τροφίμων. Έχει ως στόχο την παρακολούθηση της θερμοκρασίας, η οποία βασίζεται στην υπέρυθη ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα αντικείμενο. Η αξιολόγηση με τη χρήση της τεχνικής αυτής, παρέχει βασικά στοιχεία για τη διάσταση, την κατανομή θερμότητας και τη δομή του αντικειμένου (Ali *et al.*, 2020a). Η αρχή ανίχνευσης ανάμεσα στη θερμική απεικόνιση και τους δείκτες ποιότητας των τροφίμων,

συμπεριλαμβάνει την παρακολούθηση των διαδικασιών, το περιβάλλον του δείγματος και την τεχνολογική πρόοδο της συσκευής. Έτσι, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διασφάλιση της ποιότητας των τροφίμων κατά τη διάρκεια της παραγωγής, καθώς και για την παρακολούθηση της ποιότητας σε πραγματικό χρόνο. Παρακολουθείται η κατανομή της θερμοκρασίας, στην οποία περιλαμβάνεται τόσο η χρονική, όσο και η χωρική χαρτογράφηση της θερμοκρασίας στο υπό παρακολούθηση υλικό (Gowen *et al.*, 2010). Με τη συμβολή της χημειομετρίας, έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος στην αποδοτικότητα και την αξιοπιστία της θερμικής απεικόνισης (Ali *et al.*, 2020a).

Με τη χρήση μη καταστρεπτικών τεχνικών, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που διέρχεται από το υλικό αντιδρά διαφορετικά ανάλογα με την τεχνική που εφαρμόζεται. Τα τελευταία χρόνια, η πρόοδος που έχει πραγματοποιηθεί στη θερμική απεικόνιση έχει χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική των συμβατικών μεθόδων για την ποιοτική και ποσοτική αξιολόγηση σε διάφορων ειδών τρόφιμα. Μια αξιολόγηση που είναι ολοκληρωμένη, περιλαμβάνει τον προσδιορισμό εσωτερικών και εξωτερικών χαρακτηριστικών. Επομένως, η θερμική απεικόνιση χρησιμοποιείται για τη γρήγορη ανίχνευση και τον εντοπισμό ποιοτικών χαρακτηριστικών με σκοπό την αξιολόγηση της ποιότητας, με ελάχιστη προετοιμασία δειγμάτων (Qin *et al.*, 2019). Για την αύξηση της αποτελεσματικότητας και την εξαφάνιση των σφαλμάτων υπολογισμού, έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες έρευνες για να εμπλουτιστεί η θερμική απεικόνιση, σε διάφορες πτυχές της βιομηχανίας τροφίμων (Ali *et al.*, 2020a).

Υπάρχουν δύο τύποι υπέρυθρων αισθητήρων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συνήθως στα συστήματα θερμικής απεικόνισης. Είναι οι θερμικοί και οι φωτονικοί αισθητήρες (Du *et al.*, 2020). Η υπέρυθρη ακτινοβολία ενεργοποιεί την αύξηση της θερμότητας στο θερμικό αισθητήρα. Αντιδρά με το μόριο του αισθητήρα, ώστε να παραχθεί τάση στον φωτονικό αισθητήρα. Ανάμεσα στα δύο είδη αισθητήρων, ο φωτονικός παρέχει υψηλότερη ευαισθησία. Η ηλεκτρική απόκριση περνά από τη μονάδα επεξεργασίας σήματος, και παρέχονται πληροφορίες σχετικές με τη θερμική εικόνα. Η φασματική ανάλυση είναι σημαντική σε τέτοιου είδους τεχνικές, για να ερμηνευτούν τα φασματικά σήματα. Η χωρική ανάλυση των συσκευών θερμικής απεικόνισης έχει σχετικά μεγάλο μήκος κύματος θερμικής ακτινοβολίας σε σχέση με την ορατή ακτινοβολία, η οποία εξαρτάται από την απόσταση που έχει η συσκευή από το αντικείμενο, το μέγεθος που έχει ο ανιχνευτής και από το σύστημα φακών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τη λήψη εικόνας υψηλής ποιότητας (Ali *et al.*, 2020a).

Ένας κρίσιμος παράγοντας που αφορά τη βαθμονόμηση των συσκευών της θερμικής απεικόνισης είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας. Η συσκευή μετρά τη θερμοκρασία δειγμάτων

πάνω από το απόλυτο 0 (-273,15 °C), και εκπέμπεται ακτινοβολία στο υπέρυθρο φάσμα (Ishimwe *et al.*, 2014). Οι συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη θερμική απεικόνιση χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, τις μη ψυγμένες και τις ψυγμένες. Οι μη ψυγμένες, λειτουργούν σε θερμοκρασίες δωματίου, ενώ οι ψυγμένες, σε θερμοκρασίες κάτω των 0 °C. Συχνά, οι θερμικές κάμερες μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέσα σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, -20 έως 500 °C, και είναι δυνατό να ενισχυθούν με φίλτρα εικόνας (Bagavathiappan *et al.*, 2013). Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε τη μέρα είτε τη νύχτα, αφού η ακτινοβολία δεν αντανακλάται στο αντικείμενο. Επίσης, δεν υπάρχουν διαφορές στα θερμικά δεδομένα, ανεξαρτήτως οπτικού πεδίου και χρόνου, κατά τον οποίο το υπό εξέταση αντικείμενο βρίσκεται σε ισορροπία με το περιβάλλον (Doshvarpassand *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2020a).

Βασική αρχή της είναι ότι όλα τα υλικά εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία (IR), η οποία είναι μια ζώνη μη ορατού φωτός του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος με μήκη κύματος 0,75-100μm. Η ακτινοβολία αυτή χωρίζεται σε πέντε περιοχές, την περιοχή του κοντινού (0,75-2,5μm), του βραχέος (1,4-3μm), του μέσου (3-8μm), του μακρού (>8μm) και του ακραίου μήκους κύματος (15-100μm). Η θερμική απεικόνιση λοιπόν αποτελεί μια ανέπαφη μέθοδο καταγραφής της κατανομής θερμότητας, μέσω της μέτρησης της ακτινοβολίας IR η οποία εκπέμπεται από την επιφάνεια του δείγματος για την παραγωγή ψευδοεικόνας που παρουσιάζει την κατανομή της θερμοκρασίας της επιφάνειας (Aroga *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2013). Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από το βραχύ έως το μακρύ μήκος κύματος είναι ανιχνεύσιμη από ένα τέτοιο σύστημα. Τα συνήθη συστήματα IR μεγάλου μήκους κύματος παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία σε θερμοκρασίες δωματίου, ενώ εκείνα του μέσου μήκους κύματος είναι ευαίσθητα σε πολύ μεγαλύτερες θερμοκρασίες (π.χ. 400°C) (Chen *et al.*, 2013) και προτιμώνται στην πλειοψηφία των εφαρμογών από τη βιομηχανία τροφίμων (Ali *et al.*, 2020a).

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζονται από την ποσότητα της ακτινοβολίας βασίζονται στην εκπομπή και στη θερμοκρασία. Ως εκπομπή ορίζεται η αναλογία της ενέργειας που εκπέμπεται από ένα δείγμα προς την ενέργεια που εκπέμπεται από ένα μαύρο σώμα, και κυμαίνεται από 0 (τέλειο λευκό σώμα) μέχρι 1 (τέλειο μαύρο σώμα). Η εκπομπή μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με το μήκος κύματος, τη θερμοκρασία και την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η επιφάνεια του προς εξέταση δείγματος (Chen *et al.*, 2013). Για να υπολογιστεί η τιμή εκπομπής, χρειάζεται κατάλληλη βαθμονόμηση, που επιτυγχάνεται από δύο μετρήσεις θερμοκρασίας, με βάση τις θερμικές εικόνες. Επίσης, οι πληροφορίες που εξάγονται από μια θερμική εικόνα μπορούν να φανούν χρήσιμες για την περιγραφή της θερμικής κατανομής χωρίς να χρειαστεί να ασκηθεί κάποια

ενέργεια στο δείγμα. Με τη χρήση της θερμικής κατανομής παράγεται ένας θερμικός χάρτης ή θερμόγραμμα του αντικειμένου (Still *et al.*, 2019; Ali *et al.*, 2020a)

Οι θερμικές εικόνες λαμβάνονται με τη χρήση δύο ειδών συστημάτων, τα παθητικά και τα ενεργά. Η παθητική θερμογραφία δεν περιλαμβάνει την εφαρμογή εξωτερικής ενέργειας πάνω στο αντικείμενο και τα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν κατά την ανάλυση είναι σε υψηλότερη ή χαμηλότερη θερμοκρασία από το φόντο. Η συγκεκριμένη θερμογραφία έχει πολυάριθμες εφαρμογές, όπως στην ιατρική διάγνωση και μπορεί να μετρήσει τη θερμοκρασία των τροφίμων κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Στην ενεργή θερμογραφία χρειάζεται η εφαρμογή θερμικής ενέργειας ώστε να δημιουργηθεί θερμική αντίθεση ανάμεσα στα υπό μελέτη χαρακτηριστικά και στο υπόβαθρο. Τα ενεργά συστήματα θερμογραφίας χρησιμοποιούνται εκτενώς, αφού συνήθως τα υπό έλεγχο σημεία βρίσκονται σε ισορροπία με το περιβάλλον. Χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ελαττωμάτων τροφίμων στην επιφάνειά τους αλλά και κάτω από αυτή (Chen *et al.*, 2013).

Ένα σύστημα θερμικής απεικόνισης, περιλαμβάνει συνήθως μια θερμική κάμερα με αισθητήρες υπέρυθρων, ένα οπτικό σύστημα (π.χ. φακοί εστίασης, φίλτρα), συστοιχία ανιχνευτή, μονάδα επεξεργασίας σήματος και σύστημα επεξεργασίας εικόνας (Rahkonen *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2013). Ο αισθητήρας υπέρυθρων ανιχνεύει την ακτινοβολία που εκπέμπει το δείγμα, η οποία εν συνεχεία μετατρέπεται σε ηλεκτρική απόκριση, πριν επεξεργαστεί για να παραχθεί η εικόνα. Η θερμική εικόνα έχει τη μορφή μήτρας πολλών επιπέδων χρώματος, τα οποία ορίζουν μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, δείχνοντας το μοτίβο θερμοκρασίας του δείγματος (Chandel *et al.*, 2018). Η λειτουργία του αισθητήρα υπέρυθρων είναι τέτοια, ώστε η θερμοκρασία να αυξάνεται όταν θερμαίνεται από την υπέρυθρη ακτινοβολία η οποία διέρχεται από τη συσκευή της θερμικής απεικόνισης. Επίσης, σε ένα τέτοιο σύστημα δεν απαιτείται μονάδα φωτισμού, όπως χρειάζονται υπερφασματικές και πολυφασματικές μέθοδοι απεικόνισης, αφού ενσωματώνει μία πηγή θέρμανσης/ψύξης για την παροχή θερμικής κατανομής. Η επιλογή των μηκών κύματος καθορίζεται από διάφορες πτυχές, ενώ τα κριτήρια της ανάλυσης επεξεργασίας εικόνας είναι βασισμένα στην εφαρμογή που προτείνεται από το σύστημα (Ali *et al.*, 2020a)

Τυπικά, η επεξεργασία και η ανάλυση εικόνας γίνονται με σκοπό να αξιολογηθεί το σύστημα της θερμικής απεικόνισης. Μετράται η ένταση του χρώματος ή της κλίμακας του γκρι σε μια θερμική εικόνα (Mahesh *et al.*, 2015). Πολλές από τις εμπορικές συσκευές θερμικής απεικόνισης, οι οποίες βρίσκονται στην αγορά εμπεριέχουν αλγορίθμους για την παρακολούθηση της χαρτογράφησης της θερμοκρασίας, ανάλογα με τη συσκευή και την καταλληλότητά της. Είναι σημαντικό επίσης να ενισχυθούν οι υπολογιστικές ανάγκες για την επεξεργασία της εικόνας, με

σκοπό την αύξηση της ταχύτητας κατά τη φόρτωση των δεδομένων (Ali *et al.*, 2020a). Για παράδειγμα, η ταξινόμηση για υγιή και μελανιασμένα φρούτα αξιολογήθηκε με βάση την υψηλότερη ακρίβεια ταξινόμησης στην οποία το σύστημα θερμικής απεικόνισης μπόρεσε να προσδιορίσει σωστά μεταξύ αυτών των δύο ομάδων (Ali *et al.*, 2020a)

Οι θερμικές εικόνες αντισταθμίζονται μεταξύ τους, λόγω της φυσικής κίνησης του χειριστή. Η πλειοψηφία των θερμικών συσκευών καταγράφουν εικόνες με ρυθμό 30 φορές ανά δευτερόλεπτο (Vadivambal & Jayas, 2011), ενώ υπάρχουν και συστήματα με 50 και 60 εικόνες ανά δευτερόλεπτο (Gowen *et al.*, 2010), με θερμοκρασία που κυμαίνεται από -20 έως 500 °C (Vadivambal & Jayas, 2011; Ali *et al.*, 2020a). Η προεπεξεργασία της εικόνας, είναι ένα στάδιο που πραγματοποιείται κανονικά, με σκοπό την εξαφάνιση περιττών πληροφοριών για καλύτερη επεξεργασία της εικόνας. Μερικές από τις διαδικασίες της προεπεξεργασίας περιλαμβάνουν το threshold, την αφαίρεση του θορύβου, φιλτράρισμα της εικόνας και διόρθωση των νεκρών εικονοστοιχείων (Moreda *et al.*, 2009; Ali *et al.*, 2020a). Σχετικά με την ανάλυση της εικόνας από θερμικές συσκευές, το ιστόγραμμα από την προεπεξεργασμένη εικόνα δίνει πληροφορίες με στατιστικά στοιχεία, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εντοπιστεί η περιοχή ενδιαφέροντος (ROI) (Ali *et al.*, 2020a).

Η θερμική απεικόνιση αρχικά αναπτύχθηκε για στρατιωτικές εφαρμογές και για παρακολούθηση με νυχτερινή όραση. Λόγω των τεχνολογικών εξελίξεων, πλέον χρησιμοποιείται σε αρκετούς τομείς, όπως η ιατρική, η επιστήμη των υλικών και η πυρασφάλεια. Φυσικά, εμφανίζουν καταλληλότητα και για εφαρμογές στη βιομηχανία τροφίμων, λόγω της φορητότητάς τους, της ικανότητας για ανέπαφη μέτρηση θερμοκρασίας και της απεικόνισης σε πραγματικό χρόνο. Υπάρχουν πιθανές εφαρμογές τόσο στον έλεγχο της ποιότητας των τροφίμων, όσο και στην επιθεώρηση της συμμόρφωσης με τη νομοθεσία. Η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της ποιότητας και της ασφάλειας τροφίμων, με ελέγχους στη θερμοκρασία, με την ανίχνευση ελαττωμάτων και ξένων σωμάτων. Διάφορες έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί με τη χρήση της θερμικής απεικόνισης, όπως η ανίχνευση ελαττωμάτων σε μώλωπες ντομάτας (Vereycken *et al.*, 2002), ο έλεγχος της ποιότητας κρέατος και η ανίχνευση ελαττωμάτων στη γραμμή σφαγής (Gariery *et al.*, 1989; Costa *et al.*, 2007), η παρακολούθηση της διαδικασίας ξήρανσης εσπεριδοειδών (Fito *et al.*, 2004) και η ανίχνευση της ποιότητας κόκκων (Manickavasagan *et al.*, 2006; Manickavasagan *et al.*, 2008).

3.2.4. Άλλες Μέθοδοι Απεικόνισης:

Laser Backlight Imaging:

Η τεχνική απεικόνισης οπίσθιου λέιζερ (LBI) είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική. Η ρύθμιση του συστήματος είναι οικονομική, ενώ προσφέρει τη δυνατότητα επιθεώρησης των δειγμάτων σε πραγματικό χρόνο, χωρίς επαφή, ενώ η κάθε διαδικασία είναι ακριβής και γρήγορη (Adebayo *et al.*, 2016; Hashim *et al.*, 2013; Mollazade & Arefi, 2017; Sanchez *et al.*, 2020). Η μέθοδος αυτή έχει την ικανότητα απόκτησης χιλιάδων φασμάτων ανά δείγμα, ενώ χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την πηγή φωτός και τη μονάδα απεικόνισης, την απεικόνιση με οπίσθιο φωτισμό λέιζερ (LLBI), που αποκτά φασματικές πληροφορίες από ένα δείγμα μέσω διείσδυσης του φωτός (Sanchez *et al.*, 2020), την οπίσθια υπερφασματική απεικόνιση (HBI) και την πολυφασματική απεικόνιση οπίσθιας διασποράς (MBI) (Onwude *et al.*, 2018; Sanchez *et al.*, 2020). Ένα σύστημα LBI αποτελείται από έναν υπολογιστή, ένα πλαίσιο στήριξης, μια κάμερα CCD, λαμπτήρες αλογόνου, υποδοχές για τους λαμπτήρες, εκπομπή φωτός λέιζερ, υποδοχή φωτός λέιζερ, το υπό εξέταση δείγμα, ένα πλαίσιο ελέγχου και πλατφόρμα λήψης δειγμάτων (Onwude *et al.*, 2018; Sanchez *et al.*, 2020).

Η LBI έχει αρκετές εφαρμογές στη μη καταστρεπτική ποιοτική αξιολόγηση διαφόρων γεωργικών προϊόντων και προϊόντων διατροφής, όπως είναι τα μήλα (Qing *et al.*, 2008), η μπανάνα (Hashim *et al.*, 2013; Hashim *et al.*, 2014; Zulkifli *et al.*, 2019), τα εσπεριδοειδή (Lorente *et al.*, 2013), το ξηρό ωριμασμένο ζαμπόν (Fulladosa *et al.*, 2017), τα μανιτάρια και η ντομάτα (Mollazade *et al.*, 2013), η παπάγια (Udomkun *et al.*, 2014), τα δαμάσκηνα (Kalaj *et al.*, 2016), τα αγγούρια (Adebayo *et al.*, 2017; Zude-Sasse *et al.*, 2019), οι κρέμες με βάση τα λαχανικά (Verdu *et al.*, 2019) και τα καρπούζια (Ali *et al.*, 2017; Sanchez *et al.*, 2020). Είναι απλή και με εύκολη εφαρμογή και παρέχει τη δυνατότητα παράλληλης σύνδεσης με διάφορες διαδικασίες μετά τη συγκομιδή και παραγωγή τροφίμων (Mollazade *et al.* 2013; Sanchez *et al.*, 2020).

Απεικόνιση με Υπέρηχους (Ultrasound Imaging - UI):

Ο υπέρηχος περιλαμβάνει μηχανικά κύματα με συχνότητα μεγαλύτερη από 20 kHz, η οποία υπερβαίνει το ανώτερο όριο της ακουστικής περιοχής συχνοτήτων (20-20000 Hz). Οι υπέρηχοι διαδίδονται μέσω της δόνησης των σωματιδίων στο μέσο και μπορούν να ανακλαστούν και να μεταδοθούν καθώς περνούν από το ένα μέσο στο άλλο (Cho & Irudayaraj, 2003). Σύμφωνα με τη σχετική ακουστική αντίσταση του υλικού, λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τις διαφορετικές φυσικές ιδιότητες του υλικού μπορούν να ληφθούν μέσω της ποσότητας ενέργειας που αντανακλάται ή μεταδίδεται από το υλικό. Επιπλέον, ο χρόνος και η ταχύτητα μετάδοσης μπορούν

να υποδεικνύουν συγκεκριμένες ιδιότητες υλικού ή αλλαγές στις ιδιότητες του υλικού, επειδή η ταχύτητα υπερήχων εξαρτάται από την πυκνότητα και την ελαστικότητα του μέσου (Povey & McClements, 1988; Chen *et al.*, 2013). Όταν ο υπερηχογράφος προσπίπτει πάνω σε ένα αντικείμενο, η εξασθένιση της ενέργειας υπερήχων παράγει διαφορετικούς ήχους λόγω της διαφορετικής εσωτερικής δομής του αντικειμένου, με αποτέλεσμα μια σειρά φωτεινών κηλίδων στην οθόνη, δηλαδή εικόνες υπερήχων. Η αντίθεση της εικόνας εξαρτάται κυρίως από τις διαφορές πυκνότητας και ταχύτητας του ήχου, επειδή αυτές οι ιδιότητες καθορίζουν τη σκέδαση και την ανακλαστικότητα του ιστού.

Από τη δεκαετία του 1960, η UI γνώρισε πρόοδο λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας, της τεχνολογίας υπολογιστών και των τεχνικών επεξεργασίας σήματος. Σε σύγκριση με άλλες τεχνικές απεικόνισης, είναι φθηνή, εύκολη και χωρίς πολύπλοκες διαδικασίες επεξεργασίας της εικόνας (Cho & Irudayaraj, 2003). Τελευταία, η UI έχει αναδειχθεί σε μια από τις πιο ελπιδοφόρες τεχνικές που ασχολούνται με την αξιολόγηση ποιότητας και ασφάλειας των τροφίμων εξ αιτίας της μη καταστρεπτικής φύσης, της ταχύτητας και της δυναμικότητάς της σε πραγματικό χρόνο (Chen *et al.*, 2013).

Εφαρμόζεται σταδιακά στην ανίχνευση αγροτικών και κτηνοτροφικών προϊόντων από τη δεκαετία του 1990. Οι εφαρμογές στα τρόφιμα περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τον εντοπισμό ελαττωμάτων σφράγισης σε συσκευασίες τροφίμων (Shah *et al.*, 2001), την ανίχνευση των λιπαρών ζωικών προϊόντων για τη διάκριση των μαλακών ιστών (Youssao *et al.*, 2002), τον εντοπισμό φυσικοχημικών αλλαγών και διακυμάνσεων της πυκνότητας τροφίμων (Gan *et al.*, 2006). Στην ασφάλεια των τροφίμων, η UI αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο. Έχει χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό και την ταξινόμηση ξένων σωμάτων σε εμπορικά δείγματα τροφίμων (Haggstrom & Luukkala, 2001; Zhao *et al.*, 2003), για την ανίχνευση ξένων αντικειμένων και εσωτερικών ελαττωμάτων σε τυριά και πουλερικά (Cho & Irudayaraj, 2003), αλλά και για τον εντοπισμό ξένων σωμάτων και προσθέτων σε προϊόντα τροφίμων (Pallav *et al.*, 2009) με χρήση συστήματος συζευγμένο με αέρα που θα επέτρεπε τη χρήση σε εργοστάσια παραγωγής σε γραμμές παραγωγής για δειγματοληψία χωρίς επαφή.

Η αρχή του UI είναι παρόμοια με εκείνη των μαλακών XRI, MRI και HSI, καθώς βασίζονται όλα στην ποσότητα ενέργειας που ανακλάται και μεταδίδεται μέσω υλικών. Η εφαρμογή της UI επικεντρώνεται στη συσκευασία τροφίμων και σε ξένα αντικείμενα. Η UI αναδύεται και τείνει να αντικαταστήσει την ανίχνευση ξένων σωμάτων και προσθέτων σε πραγματικό χρόνο (Chen *et al.*, 2013).

Απεικόνιση με ακτίνες X (X-ray Imaging- XRI):

Η απεικόνιση με ακτινογραφία, μέθοδος γνωστή και ως ακτίνες X (X-ray Imaging-XRI), είναι μια ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος 0,01-10 nm. Η ενέργεια φωτονίων μιας ακτίνας X κυμαίνεται από 0,1-120 keV, που σημαίνει πως έχει ισχυρή διεισδυτικότητα. Μπορεί να δείξει φαινόμενα όπως η ανάκλαση, η διάθλαση, η σκέδαση, η περίθλαση, η παρεμβολή, η πόλωση και η απορρόφηση. Συνήθως οι ακτίνες X ανάλογα με τη φωτονική τους ενέργεια ταξινομούνται ως «μαλακές» (10 keV, μήκος κύματος 10–0,10 nm) και «σκληρές» (10–120 keV, μήκος κύματος 0,10-0,01 nm), λόγω της διεισδυτικής τους ικανότητας. Επειδή όμως οι ακτίνες X μολύνουν τα τρόφιμα, μόνο οι μαλακές ακτίνες X μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατά τον έλεγχο τροφίμων. Η αρχή της XRI βασίζεται στην πυκνότητα που έχει το προϊόν και στο μολυσματικό παράγοντα. Όταν η ακτίνα X διαπερνά ένα τρόφιμο, χάνει ένα μέρος της ενέργειάς της. Μια πυκνή περιοχή, όπως περιοχή μολυσμένη, μειώνει ακόμη περισσότερο την ενέργεια. Με την έξοδό της από το προϊόν, η ακτίνα φτάνει σε έναν αισθητήρα, ο οποίος μετατρέπει το ενεργειακό σήμα της ακτινογραφίας σε εικόνα του εσωτερικού του τροφίμου. Η ξένη ύλη είναι μια σκούρα απόχρωση του γκρι και με τον τρόπο αυτό εντοπίζονται ξένοι ρύποι. Το σύστημα «μαλακών» ακτινών X περιλαμβάνει μια ηλεκτρονική γεννήτρια ακτινών X, έναν αισθητήρα σάρωσης γραμμής για ανίχνευση των ακτινών, έναν ιμάντα μεταφοράς, ένα βηματικό μοτέρ, μια κάρτα απόκτησης εικόνας και έναν υπολογιστή. Είναι μια μέθοδος γρήγορη, μη καταστρεπτική και παράγει τρισδιάστατες πληροφορίες. Είναι σχετικά οικονομική και απλή τεχνική (Bischof *et al.*, 2007), αποτελεσματική στον έλεγχο του εσωτερικού των τροφίμων και με ισχυρή διεισδυτική ικανότητα (Chen *et al.*, 2013).

Η XRI έχει χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση μήλων με βάση μώλωπες της επιφάνειας (Shahin *et al.*, 2002), για την ανίχνευση εσωτερικής βλάβης στον πυρήνα του νερού σε μήλα (Kim & Schatzki, 2000), ενώ έχει φανεί χρήσιμη και κατά την αξιολόγηση κατεψυγμένων προϊόντων (Mousavi *et al.*, 2005). Επίσης, η XRI έχει χρησιμοποιηθεί και στην παραγωγή, με την ανάπτυξη μεθόδων επεξεργασίας εικόνας, που βασίζονται σε όργανα ακτινογραφίας, με σκοπό τον έλεγχο τυριών κατά την ωρίμανση (Kraggerud *et al.*, 2009; Chen *et al.*, 2013).

Fluorescence Imaging:

Φθορισμός είναι η εκπομπή φωτός από μια ουσία η οποία έχει απορροφήσει κάποιο φως ή άλλη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Είναι μια μορφή φωταύγειας και συνήθως, το φως που εκπέμπεται έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος και άρα χαμηλότερη ενέργεια, από την απορροφούμενη ακτινοβολία. Χωρίς το προσπίπτον φως, ο φθορισμός εξαφανίζεται αμέσως. Δύο είναι τα είδη του φθορισμού, ο αυτοφθορισμός και ο φθορισμός με τη βοήθεια φθορίζουσας

χρωστικής. Όταν η απορροφούμενη ακτινοβολία είναι στην υπεριώδη περιοχή του φάσματος και το εκπεμπόμενο φως στην ορατή, συμβαίνουν τα εντυπωσιακότερα δείγματα φθορισμού. Κατά τη διαδικασία της απεικόνισης με φθορισμό (Fluorescence Imaging –FI), όταν το προσπίπτον φως απορροφάται, τα αντικείμενα παράγουν φθορισμό. Υπάρχει ένας εξοπλισμός απεικόνισης, όπως οι συσκευές πολλαπλασιασμού ηλεκτρονίων που συνδέονται με κάποιο φορτίο, οι οποίες συλλαμβάνουν το εκπέμπον φως και με τον τρόπο αυτόν παράγονται οι εικόνες, ενώ στη συνέχεια πραγματοποιείται εφαρμογή διαφόρων μεθόδων επεξεργασίας εικόνας (Chen *et al.*, 2013).

Συνήθως, για την τεχνική αυτή χρησιμοποιείται η μικροσκοπία εστιακής σάρωσης λέιζερ (LCSM), όπου συνδυάζεται η οπτικοποίηση και το μικροσκόπιο. Στην περίπτωση αυτή γίνεται καλή μικροβιακή ανίχνευση σε διάφορα δείγματα τροφίμων (Jun *et al.*, 2009). Επίσης, η υπερφασματική ή πολυφασματική FI έχει πολλές δυνατότητες για εφαρμογή με στόχο την αξιολόγηση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων.

Συγκριτικά με τις τεχνικές ανάκλασης, ο φθορισμός θεωρείται μια πιο ευαίσθητη τεχνική για την οπτική ανίχνευση. Έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες εφαρμογές, όπως η οπτικοποίηση των κατανομών της γλουτένης, του αμύλου και των φυσαλίδων αέρα σε ζύμη, με απεικόνιση δακτυλικών αποτυπωμάτων φθορισμού, με πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα (Kokawa *et al.*, 2011; Kokawa *et al.*, 2012). Επιπλέον, έχει διερευνηθεί η δυναμική μιας τεχνικής FI που συνδυάζεται με φωτοδιόδους (LED-induced FI) για τη γρήγορη επιθεώρηση οργανικών υπολειμμάτων σε επιφάνειες εξοπλισμού, σε μονάδες επεξεργασίας πουλερικών.

Συμπερασματικά, η τεχνική FI έχει πολλές δυνατότητες εφαρμογής για την ανίχνευση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων. Μελλοντικά, μπορεί να συνδυαστεί με άλλες μεθόδους απεικόνισης, όπως η μικροσκοπική και η υπερφασματική απεικόνιση, με σκοπό τη διεύρυνση των εφαρμογών της (Chen *et al.*, 2013).

Odor Imaging:

Η οσφρητική απεικόνιση (Odor Imaging- OI) είναι βασισμένη στη χρωματομετρική διάταξη αισθητήρων και είναι η πιο πρόσφατη τεχνολογία για τον εντοπισμό μη ορατών ουσιών (οσμών). Βασική αρχή της τεχνικής αυτής είναι η χρήση της αλλαγής χρώματος, η οποία προκαλείται από την αντίδραση ανάμεσα σε ένα πτητικό υλικό και σε μια σειρά από χημικά αποκριτικά χρώματα, κατά την ανίχνευση και διαφοροποίηση χημικών ατμών. Οι χημικά αποκρινόμενες χρωστικές επιλέγονται βάσει της ευαισθησίας τους στις πτητικές ενώσεις οι οποίες πρέπει να ανιχνευθούν. Μια φυσική επιλογή για την ανίχνευση ατμών που συνδέουν μέταλλα, είναι οι μεταλλοπορφυρίνες (Rakow & Suslick, 2000). Επιπλέον, οι κοινές χρωστικές που λειτουργούν ως δείκτες pH έχουν

επιλεχθεί λόγω της αλλαγής χρώματος κατά τις αλλαγές της οξύτητας ή της αλκαλικότητας του πρωτονίου του περιβάλλοντός τους (Huang *et al.*, 2011). Το διοξείδιο του πυριτίου αντίστροφης φάσης έχει αποτελέσει επίσης ένα μέσο αλληλεπίδρασης και μια κατάλληλη επιφάνεια για φασματικές μετρήσεις διάχυτης αντίδρασης (Chen *et al.*, 2013).

Η χρωματομετρική διάταξη των αισθητήρων μπορεί να γίνει με την εκτύπωση επιλεγμένων χρωστικών σε πλάκα πυριτικής πηκτής αντίστροφης φάσης. Οι αποκρίσεις του πίνακα προέρχονται από επιλεκτικές και ειδικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ατμών που μελετώνται και της βιβλιοθήκης της μεταλλοπορφυρίνης. Ένα προφίλ αλλαγής χρώματος μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διαφοροποίησης των εικόνων του πίνακα αισθητήρων πριν και μετά την έκθεση στις πτητικές ενώσεις συγκεκριμένων αντικειμένων. Τα ψηφιακά δεδομένα αναλύονται με τη χρήση μεθόδων επεξεργασίας δεδομένων και τεχνικών αναγνώρισης προτύπων (Luo *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2013).

Σε ένα σύστημα ΟΙ, η συστοιχία αισθητήρων λαμβάνεται από μια CCD κάμερα πριν από την έκθεση στο δείγμα και προκύπτει μια αρχική εικόνα που αφορά τη συστοιχία αισθητήρων. Έπειτα, ο πίνακας εκτίθεται στο δείγμα και αρχίζει να αλλάζει χρώμα, δηλαδή αποκρίνεται στις πτητικές οργανικές ενώσεις (Volatile Organic Compounds – VOC's), οι οποίες απελευθερώνονται από το δείγμα. Μετά την σχεδόν πλήρη εξισορρόπηση, η συστοιχία αισθητήρων λαμβάνεται ξανά από την κάμερα CCD και έτσι λαμβάνεται μια «τελική» εικόνα. Μπορεί να ληφθεί και μια εικόνα διαφοράς χρώματος, αν αφαιρεθεί η «αρχική» εικόνα από την «τελική» εικόνα και η εικόνα διαφοράς παρέχει ένα προφίλ αλλαγής χρώματος που είναι χαρακτηριστικό δακτυλικών αποτυπωμάτων των VOCs στο δείγμα. Η χρωματομετρική σειρά αισθητήρων σε αυτό το σύστημα ηλεκτρονικής μύτης μπορεί να δημιουργήσει ένα χαρακτηριστικό δακτυλικό αποτύπωμα σε κάποιο ερέθισμα οσμής. Για τη δημιουργία μιας βάσης δεδομένων και την εκπαίδευση ενός συστήματος αναγνώρισης προτύπων, χρησιμοποιούνται συχνά μοτίβα ή δακτυλικά αποτυπώματα από γνωστές οσμές, και με τον τρόπο αυτόν, μπορεί μετά να γίνει ταξινόμηση και αναγνώριση άγνωστων οσμών. Άρα, ένα τέτοιο σύστημα απεικόνισης, που χρησιμοποιείται για την επιθεώρηση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων, χρειάζεται συνήθως τη βοήθεια πολυμεταβλητής βαθμονόμησης. Ένα συμβατικό τεχνητό οσφρητικό σύστημα για την ανίχνευση και τη διαφοροποίηση χημικά διαφορετικών αναλυτών μπορεί να ανιχνεύει μη συντονιστικούς οργανικούς ατμούς. Η χρωματομετρική διάταξη αισθητήρων επιτρέπει την οπτική ταυτοποίηση μιας μεγάλης ποικιλίας ατμών (Rakow & Suslick, 2000). Έτσι, με την εκμετάλλευση των αλλαγών χρώματος που συμβαίνουν στις μεταλλοπορφυρίνες κατά τη σύνδεση συνδετήρα, λαμβάνονται μοναδικές υπογραφές αλλαγής χρώματος για αναλύτες. Λόγω της υδρόφοβης φύσης του πυριτίου αντίστροφης φάσης, οι υδρατμοί δεν επηρεάζουν την απόδοση της συσκευής. Αυτή η

χρωματομετρική τεχνική χαρακτηρίζεται από υψηλή ακρίβεια και μειώνει την ανάγκη για εκτεταμένο υλικό μεταγωγής σήματος (Chen *et al.*, 2013)

Η τεχνική ΟΙ έχει εφαρμοστεί για την αξιολόγηση της ποιότητας και ασφάλειας των τροφίμων, όπως για την ταξινόμηση ποικιλιών τσαγιού σε υγρή και αέρια φάση (Hou *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2013) και για τον έλεγχο ποιότητας σε αναψυκτικά (Zhang & Suslick, 2007), αλλά και για τη διάκριση διαφορετικών μαρκών εμφιαλωμένου νερού (Chan *et al.*, 2009). Έχουν επίσης πραγματοποιηθεί μελέτες για την ανάλυση αλκοόλ με τη χρωματομετρική διάταξη αισθητήρων, όπως είναι η ανάλυση μπύρας (Zhang *et al.*, 2006) και η ταξινόμηση κινέζικων τύπων ποτών (Ya *et al.*, 2012; Qin *et al.*, 2012; Dan-Qun *et al.*, 2011; Ouyang *et al.*, 2013). Είναι μια τεχνική που διαφέρει από τις υπόλοιπες τεχνικές απεικόνισης, καθώς εμφανίζει σήματα ανάλογα με το άρωμα των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση, άρα μόνο τα οσμηρά τρόφιμα είναι κατάλληλα για χρήση. Είναι μια μέθοδος ευαίσθητη και με απλή λειτουργία, και συμφέρουσα για τον έλεγχο της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων (Chen *et al.*, 2013).

3.3. Φασματοσκοπικές Τεχνικές:

3.3.1. Φασματοσκοπία Εγγύς Υπέρυθρου:

Η εγγύς υπέρυθη φασματοσκοπία (Near-Infrared Spectroscopy-NIRS) έχει μετατραπεί σε μια από τις πιο αποτελεσματικές και προηγμένες τεχνικές που έχουν σκοπό την ανάλυση των τροφίμων (Wang *et al.*, 2017a). Βασίζεται στην απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην περιοχή 400nm - 2500nm. Αλληλεπιδρά με δείγματα και έχει τη δυνατότητα απορρόφησης, μετάδοσης και ανάκλασης, ενώ μπορεί να γίνει και χρήση διαφορετικών τρόπων μετρήσεων με τον εξοπλισμό της NIRS. Τα εν λόγω φάσματα περιλαμβάνουν τρεις ευρείες ζώνες, που σχετίζονται με τους συνδυασμούς των τρόπων δόνησης (O-H, N-H, C-H), καθώς και με τις εντάσεις των μοριακών δονήσεων. Κατά συνέπεια, η ποιότητα των δειγμάτων μπορεί να εκτιμηθεί με την ανάλυση ενός τέτοιου φάσματος (Qiao *et al.*, 2015).

Η φασματοσκοπία NIR πλεονεκτεί στο γεγονός ότι δεν χρειάζεται προετοιμασία δειγμάτων, και έχει μικρότερο χρόνο ανάλυσης από τη βασική μεθοδολογία σύνθεσης μετάλλων (main mineral composition methodology) (González-Martín *et al.*, 2011). Μεταξύ των τεχνικών που βασίζονται στη φασματοσκοπία, η φασματοσκοπία NIR είναι η πιο προηγμένη, όσον αφορά την οργάνωση και την καταλληλότητα του χημειομετρικού λογισμικού. Παρέχει τη δυνατότητα μη καταστρεπτικής μέτρησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών και των φυσιολογικών ελαττωμάτων και σε γεωργικά προϊόντα (Ali *et al.*, 2017; Sanchez *et al.*, 2020). Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες για την εφαρμογή της φασματοσκοπίας NIR στον ποιοτικό έλεγχο τροφίμων και ποτών σε πραγματικό χρόνο (Wang

& Paliwal, 2007; Huang *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2017a). Η εν λόγω φασματοσκοπία είναι ικανή να ανιχνεύσει βασικά χαρακτηριστικά υγρών τροφίμων, όπως είναι τα ποτά, τα γαλακτοκομικά προϊόντα και τα έλαια, ενώ μέσω της ανάλυσης των χαρακτηριστικών ποιότητας, μπορεί να τα ταξινομήσει και να τα ταυτοποιήσει (Wang *et al.*, 2017a).

Μπορεί επίσης να ανιχνεύσει διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά και να ταξινομήσει τα τρόφιμα ανάλογα με τη γεωγραφική τους προέλευση (Wang *et al.*, 2017a). Τέτοιου είδους μελέτες έχουν γίνει για τη διάκριση της γεωγραφικής προέλευσης σε γαλακτοκομικά προϊόντα αγελάδας προστατευμένης προέλευσης στην Ιταλία (Brescia *et al.*, 2005) και στα τυριά Gruyere (Karoui *et al.*, 2007), όπως επίσης για τον προσδιορισμό των κύριων συστατικών στο βούτυρο (Brennan *et al.*, 2003), για διαφοροποίηση τυριών που παράγονται με μείξη αγελαδινού, πρόβειου και κατσικίσιου γάλακτος, μεταξύ άλλων παραμέτρων, για τον προσδιορισμό των αισθητηριακών χαρακτηριστικών κατά την ωρίμανση, για τη μέτρηση χρώματος ή αντιοξειδωτικής ικανότητας (Lucas *et al.*, 2008; González-Martín *et al.*, 2011), καθώς και για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας του αβοκάντο σε ξηρά στερεά (Clark *et al.*, 2003). Η φασματοσκοπία NIR μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμη, για την παρατήρηση και αξιολόγηση των ποιοτικών αλλαγών που συμβαίνουν στις πρώτες ύλες των τελικών προϊόντων με ακρίβεια, με τη συμβολή μιας απλής προετοιμασίας δειγμάτων (Zhu *et al.*, 2013).

Λόγω των ταχύτατων εξελίξεων της χημειομετρίας, η μέθοδος NIR εφαρμόζεται όλο και πιο πολύ στην ανάλυση της ποιότητας των υγρών τροφίμων, ενώ είναι δυνατή επίσης η ανάλυση αλκοολών (Ghasemi-Varnamkhasti & Forina, 2014), διαλυτού στερεού περιεχομένου (SSC) (Wu *et al.*, 2010), λίπους, πρωτεϊνών, λακτόζης (Kawasaki *et al.*, 2008) και τιμής οξέος (Acid Value - AV), ιξώδους (Yavari *et al.*, 2009), ιχνοστοιχείων, αμινοξέων, πτητικών, αρωματικών, φαινολικών ενώσεων και μετάλλων (Dugo *et al.*, 2005; Yu *et al.*, 2007b; Meng *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2017a).

Για να αποφευχθεί η χαμηλή απόδοση της τεχνικής αυτής στην απορρόφηση μετάλλων, μπορεί και συνδυάζεται με διάφορες τεχνικές, όπως οι ηλεκτρονικές μύτες, η υπεριώδης φασματοσκοπία και η φασματοσκοπία φθορισμού X-ray (Wang *et al.*, 2017a). Μαζί με την ορατή φασματοσκοπία, τη φασματοσκοπία Raman και τη φασματοσκοπία μαγνητικού συντονισμού (MRS), αποτελεί μία από τις πιο προσιτές τεχνικές για σκοπούς ανάλυσης εικόνας (Ruiz-Altisent *et al.*, 2010).

3.3.2. Φασματοσκοπία Μέσου Υπέρυθρου:

Η φασματοσκοπία μέσου υπέρυθρου, καθώς και οι άλλες φασματοσκοπίες δόνησης, όπως η υπερφασματική απεικόνιση, η φασματοσκοπία εγγύς υπέρυθρου, και η φασματοσκοπία Raman, είναι μη επεμβατικές τεχνικές, μέσω των οποίων γίνεται ταυτοποίηση με σκοπό την εύρεση της μοριακής δομής και τη μέτρηση της ενέργειας δόνησης ενώσεων, ενώ παρέχουν σπουδαίες πληροφορίες που αφορούν τις ενδομοριακές δυνάμεις μεταξύ των ατόμων ενός μορίου, τις διαμοριακές δυνάμεις σε συμπυκνωμένη φάση, αλλά και τη φύση του χημικού δεσμού (Lohumi *et al.*, 2015; Gupta, 2015; Su & Sun, 2018; Su & Sun, 2019).

Η φασματοσκοπία μέσου υπέρυθρου (Mid-Infrared Spectroscopy-MIR) είναι μια δονητική τεχνική φασματοσκοπίας, που χρησιμοποιεί μια δέσμη φωτός του μέσου υπέρυθρου ($4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$) σε ένα δείγμα και μετρά τη μετάδοση και την απορρόφηση του φωτός (Su *et al.*, 2018). Τα όργανα μετασχηματισμού Fourier (FT) είναι ικανά να ενισχύσουν την ευαισθησία της τεχνικής, επιτρέπουν υψηλότερη απόδοση σε ενέργεια και αυξάνουν δραματικά την ταχύτητα της απόκτησης του φάσματος (Davis & Mauer, 2010; Bell, 2012). Οι κύριες μέθοδοι δειγματοληψίας στη φασματοσκοπία MIR είναι με μετάδοση, μετατόπιση και εξασθενημένη ολική ανακλαστικότητα (Attenuated Total Reflectance - ATR) (Su & Sun, 2019).

Η μέθοδος αυτή είναι μια βιώσιμη εναλλακτική, για ανάλυση υγρών τροφίμων. Η φασματοσκοπία αυτή αναγνωρίζει χημικές ουσίες υγρών τροφίμων, βάσει του γεγονότος ότι τα μόρια μπορούν να απορροφούν συχνότητες χαρακτηριστικές για τη δομή τους. Κάθε χημικός δεσμός από κάθε μόριο έχει μία μοναδική ενέργεια δόνησης, κάτι που δείχνει πως η κάθε ένωση έχει και ένα μοναδικό δακτυλικό αποτύπωμα για τον προσδιορισμό της δομής της (Coates, 2000; Su & Sun, 2019). Τα MIR φάσματα λοιπόν ($4000 - 400 \text{ cm}^{-1}$), μπορούν να παράξουν ποσοτικές πληροφορίες για τη σύνθεση υγρών συστατικών μορίων. Το φάσμα αυτό μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις περιοχές, δηλαδή στο εύρος του δακτυλικού αποτυπώματος ($1500 - 400 \text{ cm}^{-1}$), στην περιοχή του εύρους του διπλού δεσμού ($2000 - 1500 \text{ cm}^{-1}$), στην περιοχή εύρους του τριπλού δεσμού ($2500 - 2000 \text{ cm}^{-1}$) και στο εύρος της έκτασης X-H ($4000 - 2500 \text{ cm}^{-1}$) (Su *et al.*, 2018; Stuart, 2005; Su & Sun, 2019). Με τα φάσματα MIR είναι δυνατή η λήψη φασμάτων στην περιοχή του δακτυλικού αποτυπώματος για οργανικά και ανόργανα συστατικά, ενώ παρουσιάζει πλεονεκτήματα και στην ανίχνευση σύνθετων υγρών δειγμάτων με παρεμβαλλόμενα συστατικά, τα οποία εμφανίζονται συχνά σε πολλές διαφορετικές πρακτικές εφαρμογές (Haas & Mizaikoff, 2016). Για παράδειγμα, τα μόρια σακχάρου αντιστοιχούν σε δονήσεις που προκύπτουν από C-O και C-H στην περιοχή των $1100-1000 \text{ cm}^{-1}$ (Bernazzani *et al.*, 2000; Su & Sun, 2019). Ζώνες στα 1345 cm^{-1} , 1357 cm^{-1} , 1429 cm^{-1} , αντικατοπτρίζουν την παρουσία ασπαραγίνης και γλουταμίνης, λόγω των παραμορφώσεων των δεσμών C-H και του τεντώματος του δεσμού C-N, ενώ τα φάσματα στα 1653

cm^{-1} και 1567 cm^{-1} σχετίζονται με τις αλλαγές στη δευτερογενή δομή των πρωτεϊνών (Barth, 2000; Pelton & McLean, 2000). Οι φασματικές απορροφήσεις στα $2930 - 2850 \text{ cm}^{-1}$, αποδίδονται στο συμμετρικό και ασύμμετρο τέντωμα του δεσμού C-H (Luna *et al.*, 2015). Οι απορροφήσεις στα $3750 - 2800 \text{ cm}^{-1}$ και $1800 - 1500 \text{ cm}^{-1}$ είναι σχετικές με την επίδραση της ισχυρής απορρόφησης του νερού λόγω δονήσεων των O-H (Ayvaz *et al.*, 2016; Su *et al.*, 2019). Παράλληλα, υπάρχει και μια εμφανής ζώνη συνδυασμού νερού με αιχμή απορρόφησης στα 2125 cm^{-1} (Rahmelow & Hubner, 1997; Su & Sun, 2019). Για την αποφυγή των παρεμβολών που συμβαίνουν λόγω της υψηλής απορρόφησης του νερού στην περιοχή του MIR για τη μέτρηση των υδατικών δειγμάτων, η συνεισφορά του νερού στο φάσμα μπορεί να αφαιρεθεί, με βάση τη διαφορά μεταξύ του κλιμακούμενου φάσματος νερού αναφοράς και του μετρούμενου φάσματος των δειγμάτων πριν τη χημειομετρική ανάλυση (Etzion *et al.*, 2004; Su & Sun, 2019).

Η τεχνολογία MIR έχει ευρεία εφαρμογή όσον αφορά στη μέτρηση των παραμέτρων ποιότητας του γάλακτος, οι οποίες σχετίζονται με λιπαρά οξέα, πρωτεΐνες (όπως είναι η καζεΐνη, η γαλακταλβουμίνη, η γαλακτοσφαιρίνη), χαρακτηριστικά πήξεως, χαρακτηριστικά οξύτητας (pH, TA), μέταλλα (Ca, Mg, Zn) και με τη γεωγραφική προέλευση. Είναι αποτελεσματική στον ποιοτικό έλεγχο του βρώσιμου ελαίου, για έλεγχο των επιπέδων νοθείας, των εμπορικών βαθμών, για την επιθεώρηση των φαινολικών ενώσεων, της αντιοξειδωτικής δράσης, των τιμών ιωδίου, των λιπαρών οξέων, καθώς επίσης και στον ποιοτικό έλεγχο αλκοολούχων ποτών, όσον αφορά τις ανθεκτικές και SO₂ χρωστικές, τις ολικές ανθοκυανίνες, την πυκνότητα χρώματος, τα συνολικά φαινολικά, τα αμινοξέα, το φαινόμενο όριο εξασθένησης, τη διαλυτή πρωτεΐνη, το ιξώδες, τα φλαβονοειδή, τα σάκχαρα, την αιθανόλη, τη γλυκερόλη, τις τανίνες, την αντιοξειδωτική ικανότητα, το βαθμός αλκοόλης και τα ολικά οξέα. Έχει δείξει καλά αποτελέσματα στον έλεγχο του μελιού, όσον αφορά την αντιμικροβιακή δραστηριότητα, τα μεθυλογλυκόξυ- οξέα, τη βοτανική προέλευση και τη νοθεία, αλλά και στον έλεγχο χυμών φρούτων και λαχανικών, ως προς τη σακχαρόζη, τη φρουκτόζη, τη γλυκόζη, τα αναγωγικά σάκχαρα, το pH, την ολική φαινόλη, την ολική ανθοκυανίνη, τα διαλυτά στερεά, το ιξώδες ορού, την τιμή Ostwald. Η MIR σε συνδυασμό με τη χημειομετρία, έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για την αξιολόγηση της ποιότητας και της ασφάλειας προϊόντων όπως είναι το κρέας, τα υγρά τρόφιμα, τα ψάρια (Cozzolino & Murray, 2012) το κοτόπουλο (Sahar & Dufour, 2014) το βόειο κρέας (Alamprese *et al.*, 2013), το γάλα (Bonfatti *et al.*, 2011), το λάδι (Javidnia *et al.*, 2013) και το κρασί (Versari *et al.*, 2011; Su & Sun, 2019).

Η φασματοσκοπία μέσης υπέρυθρης ακτινοβολίας (MIR) προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως είναι η μη παρεμβατική λειτουργία και η ανίχνευση υψηλής απόδοσης. Επομένως προτείνεται

ως μια εναλλακτική λύση με πολλές προοπτικές, σε αντίθεση με τις συμβατικές τεχνικές για την αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων (Su & Sun, 2019).

3.3.3. Φασματοσκοπία Πολλαπλών Μοριακών Υπέρυθρων:

Η φασματοσκοπία πολλαπλών μοριακών υπέρυθρων (Multi-Molecular Infrared Spectroscopy - MM-IR), εμπεριέχει τη μεθοδολογία μακροδακτυλικών αποτυπωμάτων που ακολουθεί η φασματοσκοπία υπέρυθρου. Η υπέρυθρη ακτινοβολία, παραδοσιακά παρέχει πληροφορίες δόνησης από μεμονωμένες ή από συγκεκριμένες λειτουργικές ομάδες. Κατά τη φασματική ερμηνεία σε πολύπλοκα δείγματα ωστόσο, τα σήματα μπορούν να επικαλύπτονται λόγω της πολυπλοκότητας της σύνθεσης (Xu *et al.*, 2013). Για το λόγο αυτό, για την ανάλυση σύνθετων μειγμάτων ποιοτικά και ποσοτικά, έχει εισαχθεί η μεθοδολογία IR μακροδακτυλικών αποτυπωμάτων, που αποτελείται από τη φασματοσκοπία υπέρυθρου μετασχηματισμού Fourier (FT-IR), δεύτερο παράγωγο IR (SD-IR) και δισδιάστατο συσχετισμό IR (2DCOS-IR). Η μέθοδος είναι βασισμένη στην παραλλαγή των λειτουργικών ομάδων κατά τις χημικές αλλαγές, αλλά και στην παράλληλη εμφάνιση μοριακών δονήσεων (Xu *et al.*, 2015a; Xie *et al.*, 2021). Η MM-IR μπορεί να βελτιώσει την ανάλυση συστατικών και τον υπάρχον περιορισμό στην ανίχνευση ενώσεων με χαμηλή συγκέντρωση σε ορισμένα συστατικά, ενώ έχει τη δυνατότητα ακόμα και να εντοπίσει παράγοντες μόλυνσης (Gonzalvez *et al.*, 2011). Είναι ιδανική για την παράλληλη και αποτελεσματική ανάλυση σε πολλά σύνθετα συστήματα (Xie *et al.*, 2021).

Η MM-IR ενσωματώνει τα μακροδακτυλικά αποτυπώματα IR σε μια σειρά τεχνικών ανάλυσης, εργαλεία φασματικής απεικόνισης και χημειομετρίας. Αποδίδει καλά αποτελέσματα στην ταυτόχρονη ανάλυση στοχευμένων πολλαπλών συστατικών και έχει τη δυνατότητα ανίχνευσης ιχνοστοιχείων χωρίς κάποια εξαντλητική προκατεργασία. Είναι αποτελεσματική, απλή και οικονομική και εφαρμόζεται στον προσδιορισμό σύνθετων συστημάτων (Xie *et al.*, 2021).

3.3.4. Φασματοσκοπία Raman:

Το 1928, δύο Ινδοί φυσικοί, ο C. V. Raman και ο K. S. Krishnan, παρατήρησαν πειραματικά για πρώτη φορά το φαινόμενο σκέδασης του Raman, που κέρδισε και το Νόμπελ Φυσικής το 1930. Στις δεκαετίες που ακολούθησαν η φασματοσκοπία σκέδασης Raman εξελίχθηκε σε μια από τις πιο προηγμένες και ισχυρές τεχνολογίες ανίχνευσης. Αρχικά, υπήρχαν διαφόρων ειδών τεχνικά εμπόδια τα οποία ξεπεράστηκαν μέσα από την εξέλιξη της τεχνολογίας, με την εισαγωγή μικρών διόδων λέιζερ, σύγχρονες οπτικές ίνες, φίλτρα απόρριψης λέιζερ, μετασχηματισμό Fourier και με τα διασκορπιστικά φασματόμετρα Raman, με συσκευές συζευγμένης φόρτισης, ηλεκτρονικούς

υπολογιστές και ισχυρά λογισμικά ανάλυσης δεδομένων (McCreery, 2000). Είναι μια τεχνική που αναπτύχθηκε ταχύτατα με σκοπό να καλύψει απαιτήσεις σε διάφορες εφαρμογές σε κλάδους όπως η γεωργία, η αρχαιολογία, η βιοϊατρική, η ιατροδικαστική, η ορυκτολογία, η φαρμακευτική (Qin *et al.*, 2019).

Η Raman είναι μια τεχνική φασματοσκοπίας κραδασμών, βασισμένη στην αλληλεπίδραση φωτός με υψηλή ακτινοβολία με μοριακές δονήσεις. Όταν μια μονοχρωματική δέσμη λέιζερ προσπίπτει σε ένα δείγμα, το φως διασκορπίζεται και σε αυτό μπορεί να περιλαμβάνεται είτε ελαστική είτε ανελαστική σκέδαση. Κατά πλειοψηφία, η διασπορά είναι ελαστικά διάσπαρτο φως (σκέδαση Rayleigh) και έχει συχνότητα ίδια με το προσπίπτον λέιζερ. Επίσης, παράγεται και ανελαστικά διάσπαρτο φως, εξ' αιτίας της μεταφοράς ενέργειας ανάμεσα σε μόρια και φωτόνια. Τα φωτόνια χάνουν ενέργεια κατά τη σκέδαση μορίων από τη θεμελιώδη κατάσταση (σκέδαση Stokes, χαμηλότερη συχνότητα ή μεγαλύτερο μήκος κύματος), ή αποκτούν ενέργεια σε αντίθετη διαδικασία (σκέδαση anti-Stokes, υψηλότερη συχνότητα ή μικρότερο μήκος κύματος). Οι δύο αυτές περιπτώσεις λέγονται διασκόρπιση Raman (Smith & Dent, 2005). Η ένταση διασποράς Stokes είναι πολύ υψηλότερη από την anti-Stokes, επομένως οι συνήθεις τεχνικές Raman αποκτούν μόνο τις πληροφορίες σκέδασης Stokes σε μεγάλο μήκος κύματος (Qin *et al.*, 2019)

Ένα τυπικό φάσμα Raman περιλαμβάνει τυπικά στενές και αιχμηρές φασματικές κορυφές. Στις κορυφές γίνεται ποσοτικοποίηση με μετατοπίσεις Raman που σχετίζονται με συγκεκριμένες μοριακές δονήσεις σε σταθερές συχνότητες, με τη βοήθεια των οποίων αναλύονται οι σύνθεση των δειγμάτων. Η μέγιστη ένταση Raman είναι γραμμικά ανάλογη με τη συγκέντρωση των μορίων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ποσοτική ανάλυση της αναλυόμενης ουσίας (Pelletier, 2003; Qin *et al.*, 2019).

Ένα συνηθισμένο σύστημα Raman περιλαμβάνει μια πηγή διέγερσης, μια συσκευή διαχωρισμού μήκους κύματος και έναν ανιχνευτή. Ως πηγές διέγερσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ισχυρά μονοχρωματικά λέιζερ. Τα σήματα ενισχύονται με την αύξηση της έντασης της διέγερσης ή με τη μείωση του μήκους κύματος του λέιζερ. Επειδή όμως μια υψηλή ένταση και ένα μικρό μήκος κύματος μπορούν να δημιουργήσουν ισχυρό φθορισμό, που θα υποβαθμίσει ή θα κάψει το δείγμα, χρησιμοποιούνται δίοδοι λέιζερ που λειτουργούν σε μήκη κύματος 785 και 830 nm. Επίσης, στα συστήματα Fourier Transform Raman χρησιμοποιούνται λέιζερ στα 1064 nm για την ελαχιστοποίηση των παρεμβολών που προκαλεί ο φθορισμός με ταυτόχρονη μείωση της έντασης του σήματος Raman. Είναι πρακτικά μια συμβιβαστική διαδικασία, για να μεγιστοποιηθεί η ένταση του σήματος Raman και να μειωθούν οι παρεμβολές

του φθορισμού, που θα έχουν ως αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση της ευαισθησίας του ανιχνευτή (Qin *et al.*, 2019).

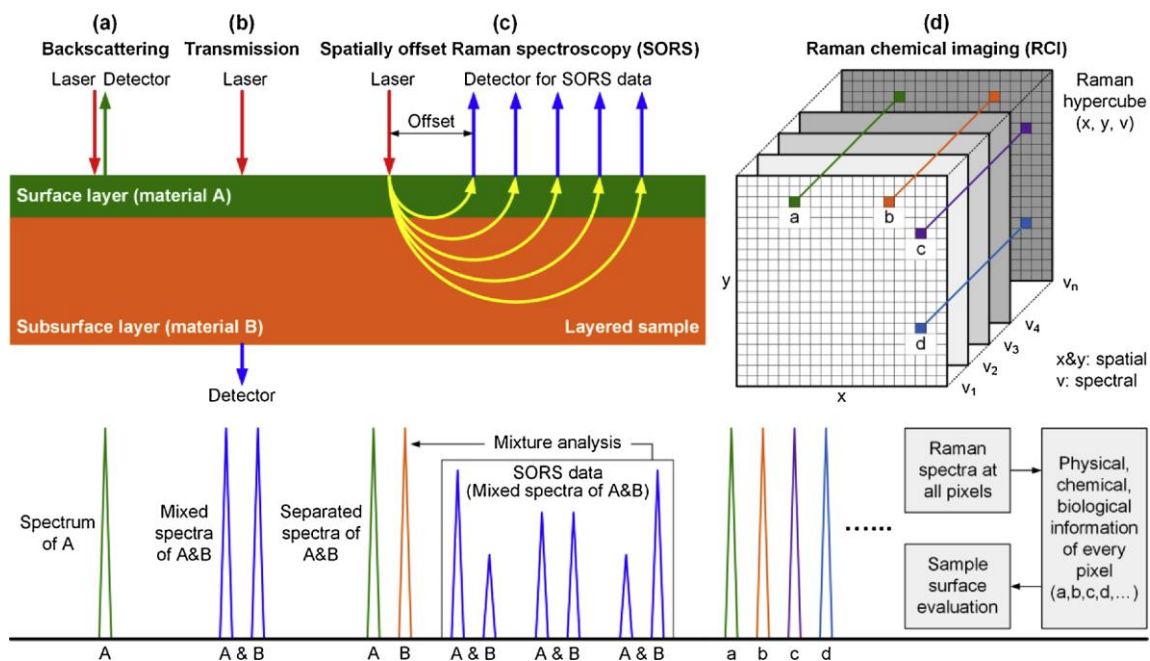
Ως πηγές διέγερσης στα συστήματα απεικόνισης γραμμικής σάρωσης Raman, χρησιμοποιούνται λέιζερ εστιασμένης γραμμής. Τα λέιζερ αυτά σχηματίζονται με την εξάπλωση ενός σημείου λέιζερ με τη χρήση ενός καθρέφτη σάρωσης (Markwort *et al.*, 1995; Qin *et al.*, 2019) ή με την επέκταση μιας δέσμης λέιζερ με χρήση κυλινδρικών ή παρόμοιων οπτικών (Christensen & Morris, 1998; Qin *et al.*, 2019). Οι συσκευές διαχωρισμού μήκους κύματος διασκορπίζουν τα σήματα Raman πριν αυτά φτάσουν σε κάποιον ανιχνευτή. Τρεις είναι οι γενικές κατηγορίες για τις συσκευές διαχωρισμού μήκους κύματος: οι φασματογράφοι διασποράς, οι φασματογράφοι μετασχηματισμού Fourier (FT) και ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενα φίλτρα. Οι φασματογράφοι διασποράς χρησιμοποιούν σχάρες περίθλασης για το χωρικό διαχωρισμό του φωτός σε διαφορετικά μήκη κύματος. Συχνά για να κατασκευαστεί ένας τέτοιος φασματογράφος, γίνεται χρήση σχάρας μετάδοσης ή σχάρας αντανάκλασης. Το εύρος του μήκους κύματος είναι στενά, 770-980nm.

Τέτοιοι φασματογράφοι έχουν υψηλότερες απόδοση από τη φασματογραφία ορατού και εγγύς υπέρυθρου. Οι φασματογράφοι μετασχηματισμού Fourier (FT) αποκτούν φως με τη μορφή παρεμβολής. Μεταφέρονται φασματικές πληροφορίες, μέσω των οποίων ένα αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier καθορίζει τα μήκη κύματος για το φως. Οι φασματικές αναλύσεις των φασματόμετρων FT-Raman, συνήθως χρησιμοποιούν λέιζερ 1064 nm και είναι υψηλότερες από αυτές των φασματογράφων διασποράς. Επίσης, για το διαχωρισμό του μήκους κύματος μπορεί να γίνει χρήση ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενων φίλτρων. Τέτοια είναι τα οπτικοακουστικά συντονιζόμενα φίλτρα (AOTF) και τα συντονιζόμενα φίλτρα υγρών κρυστάλλων (LCTF). Τα δύο αυτά φίλτρα χρησιμοποιούνται σε συστήματα απεικόνισης Raman σάρωσης περιοχής (Morris *et al.*, 1994; Qin *et al.*, 2019).

Όσον αφορά τις συσκευές που χρησιμοποιούνται στην τεχνική Raman, από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 έχουν χρησιμοποιηθεί συσκευές με ζεύξη φορτίου (CCD) και αντικατέστησαν όλους τους υπόλοιπους ανιχνευτές που χρησιμοποιούνταν ως τότε (McCreery, 2000). Οι CCD ανιχνευτές αποτελούνται από πολλές μικρές φωτοδιόδους (pixels) που έχουν κατασκευαστεί από υλικά ευαίσθητα στο φως. Κάθε φωτοδίοδος μετατρέπει προσπίπτοντα φωτόνια σε ηλεκτρόνια για να παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με τη συνολική έκθεση στο φως. Στο σύστημα σκέδασης Raman, η θέση του ανιχνευτή CCD είναι παράλληλη με την κατεύθυνση σκέδασης μήκους κύματος σε μία διάσταση και η άλλη διάσταση είναι παράλληλη με την υποδοχή εισόδου για τη λήψη χωρικών πληροφοριών. Το CCD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για διαφορετικούς τρόπους ανάγνωσης, όπως πλήρη κατακόρυφη συστοιχία, μονή διαδρομή, πολλαπλή διαδρομή και απεικόνιση. Στο

σύστημα απεικόνισης της περιοχής Raman που χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά ρυθμιζόμενα φίλτρα, το CCD χρησιμοποιείται για τη συλλογή μιας σειράς διδιάστατων χωρικών εικόνων σε επιλεγμένο αριθμό κυμάτων. Λόγω της αδυναμίας του σήματος διασποράς Raman, το CCD που χρησιμοποιείται στο σύστημα Raman απαιτεί συνήθως υψηλή κβαντική απόδοση (QE) και χαμηλό σκοτεινό θόρυβο για να μεγιστοποιήσει την ποιότητα του σήματος Raman. Ο σκοτεινός θόρυβος ελαχιστοποιείται αποκλείοντας τα εικονοστοιχεία που δεν βρίσκονται στην φωτιζόμενη περιοχή (Qin *et al.*, 2019).

Ως μέθοδος ανάλυσης, η Raman έχει πλεονεκτήματα, όπως η μη επεμβατική μέτρηση, η υψηλή ευαισθησία και η εξειδίκευση. Δεν χρειάζεται χρονοβόρα προετοιμασία δειγμάτων, και είναι ικανή να αξιολογήσει φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες τροφίμων και γεωργικών προϊόντων, όπως τα φρούτα, τα λαχανικά, το κρέας, οι σκόνες τροφίμων, τα ποτά, τα έλαια, τα δημητριακά (Yang and Ying, 2011; Qin *et al.*, 2017). Επίσης, η Raman δεν έχει την απαίτηση για οπτικά καθαρά δείγματα, επομένως μπορεί να γίνει η μέτρηση ακόμη και σε χρωματιστά γυάλινα φιαλίδια. (Sanchez *et al.*, 2020). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο ποιότητας των τροφίμων, με την ανάλυση ενδογενών συστατικών όπως λίπη, πρωτεΐνες, υδατάνθρακες, λιπαρά οξέα και ανόργανα συστατικά, αλλά και εξωγενών, με στόχο την επιθεώρηση της ασφάλειας των τροφίμων, όπως βακτήρια, φυτοφάρμακα και προσθήκες που αποτελούν νοθευτικά (Qin *et al.*, 2019).



Εικόνα 3: Βασικές τεχνικές με τη φασματοσκοπία Raman

4. Εφαρμογές Σε Τρόφιμα:

Όπως έχει γίνει αντιληπτό, η ανάλυση εικόνας έχει αρχίσει να γίνεται αντικείμενο ενδιαφέροντος για πολλούς ερευνητές. Έχουν πραγματοποιηθεί εκτεταμένες μελέτες σε πολλών ειδών τρόφιμα, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ακρίβεια, ταχύτητα και ευελιξία. Ορισμένες εφαρμογές αναφέρονται στη συνέχεια.

4.1. Φρούτα και Λαχανικά:

Τα εσωτερικά ελαττώματα τροφίμων, όπως ο διαχωρισμός καρπών σε αγγουράκια τουρσί, δεν μπορούν εύκολα να εντοπιστούν. Στο πρόβλημα αυτό, μπορεί να δώσει λύση η υπερφασματική απεικόνιση ως ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό μέσο. Λόγω του κόστους, εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος απεικόνισης με σκέδαση λέιζερ. Σε μελέτη με 50 αγγούρια, χρησιμοποιήθηκε δίοδος λέιζερ με μήκος κύματος 808 nm. Λήφθηκαν εικόνες από τα δείγματα και επιτεύχθηκε ακρίβεια στην ανίχνευση ελαττωμάτων σε ποσοστό 96%. Μια τέτοια τεχνική με λέιζερ αποδείχθηκε οικονομική και γρήγορη για την ανίχνευση ελαττωμάτων (Ariana & Lu, 2010).

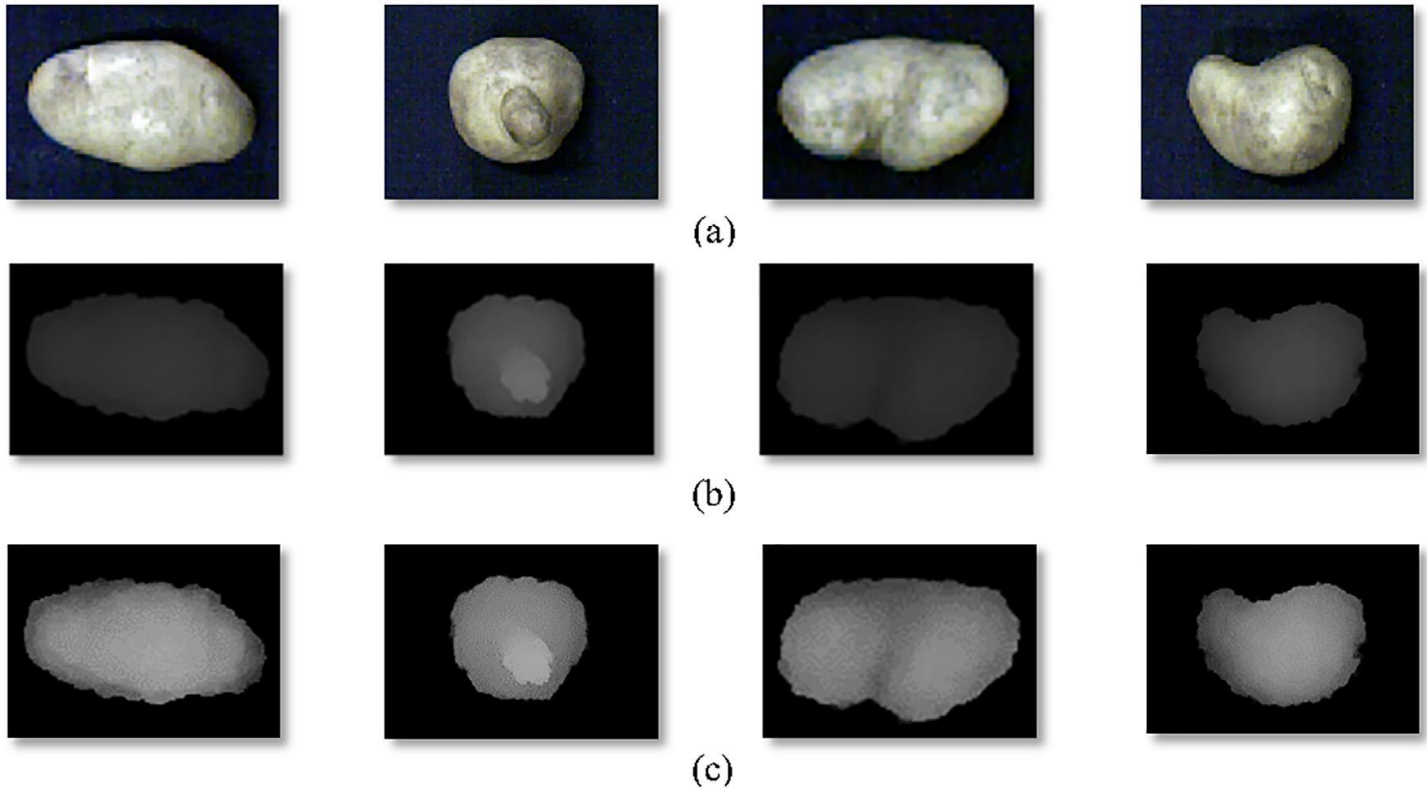
Η υπερφασματική απεικόνιση έχει φανεί χρήσιμη και σε ανίχνευση ελαττωμάτων λόγω κατάψυξης σεμανιτάρια. Σε σχετική έρευνα, χρησιμοποιήθηκε υπερφασματική απεικόνιση με σάρωση γραμμής σε μήκος κύματος 400-1000 nm. Με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε, ταξινομήθηκαν σωστάμανιτάρια έως και 100%. Μανιτάρια με βλάβες λόγω κατάψυξης ταξινομήθηκαν σε ποσοστό >95% μετά από ολιγόλεπτη απόψυξη (Gowen *et al.*, 2009).

Εκτός από τα προαναφερθέντα, η υπερφασματική ανάκλαση έχει εφαρμοστεί σε μαρούλια με σκοπό τη μέτρηση της ποιότητας και την ανίχνευση ξένων ουσιών. Βρέθηκαν μολυσματικοί παράγοντες με σύστημα ανίχνευσης που χρησιμοποιούσε μία κάμερα, στην περιοχή 400-1000 nm. Ανιχνεύθηκαν επίσης ξένα σώματα, όπως γυμνοσάλιαγκες και σκουλήκια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σύστημα αυτό, δυνητικά έχει τη δυνατότητα χρήσης με στόχο την ταυτόχρονη διάκριση ξένων σωμάτων σε φρεσκοκομμένα μαρούλια (Mo *et al.*, 2017).

Η απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού έχει επίσης ευρεία εφαρμογή σε φρούτα, όπως η φράουλα. Σε μελέτη, συνδυάστηκαν αποτελέσματα της τεχνικής NMR (Nuclear Magnetic Resonance), για την εκτίμηση της έκτασης της βλάβης που προκαλείται έπειτα από την άσκηση μικρής πίεσης στη φράουλα. Από τη μαγνητική τομογραφία εξάχθηκε το συμπέρασμα πως η συμπεριφορά χαλάρωσης των μορίων νερού σε δείγματα υπό πίεση, άλλαξε. Ανάλογα με το βαθμό πίεσης, αυξήθηκε κι η αλλαγή (Otero & Préstamo, 2009).

Σχετικά με την ασφάλεια, έχει εφαρμοστεί η MRI για την ανίχνευση προσβολής μύλων από σκώρο ροδάκινου (*Carposina sasakii* Matsumura). Έγινε διάκριση ανάμεσα σε υγιείς και προσβεβλημένους καρπούς, κάτι που ανέδειξε την MRI ως αξιόπιστη μέθοδο εντοπισμού μολύνσεων σε φυτά (Haishi *et al.*, 2011). Πολλές φορές επίσης, στα κηπευτικά προϊόντα προκαλούνται μώλωπες λόγω χειρισμού. Οι μαλακές κηλίδες τομάτας (*Lycopersicon esculentum*) είναι ένα παράδειγμα μώλωπα, ο οποίος είναι ελάχιστα ορατός. Με τη χρήση της θερμικής απεικόνισης, μπορούν να ανιχνευτούν μώλωπες ως κρύες κηλίδες στην επιφάνεια του καρπού, και είναι ένα εύρημα που μελλοντικά μπορεί να ευνοήσει τον αυτόματο εντοπισμό ελαττωμάτων (Vereycken *et al.*, 2002).

Για τη πρόβλεψη της μάζας σε πατάτες, αναπτύχθηκε επίσης μια μέθοδος για τη λήψη δεδομένων που αφορούν την ποιότητα δειγμάτων σε 3D χώρο (πάχος, όγκος και διαβάθμιση κλίσης επιφάνειας) και για την πρόβλεψη της μάζας. Καταγράφηκαν εικόνες βάθους από 110 πατάτες. Υπολογίστηκαν οι παράμετροι μήκους, πλάτους, πάχους και όγκου και χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση παραμορφώσεων στις πατάτες. Λήφθηκαν πολύ καλά αποτελέσματα πρόβλεψης, επομένως η μέθοδος λήψης εικόνων βάθους είναι μια ακόμη μέθοδος η οποία μελλοντικά μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη στη ανάλυση των τροφίμων (Su *et al.*, 2018).



Εικόνα 4.1. Εικόνες δειγμάτων πατάτας: (α) Έγχρωμες εικόνες κανονικής, εξογκωμένης, κοίλης και λυγισμένης πατάτας. (β) Εικόνες βάθους κανονικής, εξογκωμένης, κοίλης και λυγισμένης πατάτας. (γ) Ενισχυμένες εικόνες βάθους κανονικής, εξογκωμένης, κοίλης και λυγισμένης πατάτας (Su *et al.*, 2018).

Έρευνες με χρήση της LBI έχουν πραγματοποιηθεί σε πολλές κατηγορίες τροφίμων. Για παράδειγμα, έχει χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση καρπουζιών με και χωρίς κουκούτσια. Εικόνες οπίσθιας σκέδασης λήφθηκαν από δείγματα με τη βοήθεια διόδου λέιζερ στα 658nm και επιτεύχθηκε ταξινόμηση έως και 100% (Ali *et al.*, 2017). Επιπλέον, η LLBI μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ποιότητας γλυκοπατάτας κατά την ξήρανση. Μια πειραματική διαδικασία περιλάμβανε τη λήψη εικόνων σε κάθε ώρα ξήρανσης με ταυτόχρονη μέτρηση διαφόρων χαρακτηριστικών ποιότητας όπως η υγρασία, και συντεταγμένων χρώματος, στο χρωματικό χώρο Lab. Οι εικόνες επηρεάστηκαν από τη θερμοκρασία και το χρόνο ξήρανσης και είχαν καλή συσχέτιση με την περιεκτικότητα σε υγρασία και τις παραμέτρους L*, a*, b*. Έγινε λοιπόν αντιληπτό πως μια τέτοια μέθοδος μπορεί να σταθεί επάξια για τον έλεγχο της ποιότητας της γλυκοπατάτας κατά την ξήρανση (Onwude *et al.*, 2018).

Οι τεχνικές με φθορισμό έχουν πολλές δυνατότητες όσον αφορά την ανίχνευση περιττωμάτων ζώων σε τρόφιμα. Μια τεχνική με πολυφασματικό φθορισμό έχει προταθεί για τη λήψη εικόνων φθορισμού για τον έλεγχο σε μολυσμένα μήλα. Είκοσι μήλα Red delicious χρησιμοποιήθηκαν για αυτό το σκοπό και μολύνθηκαν με τεχνητό τρόπο για τη δημιουργία 5 κηλίδων μόλυνσης σε κάθε μήλο. Στο ανθρώπινο μάτι, οι κηλίδες ήταν άορατες. Λήφθηκαν πολυφασματικές εικόνες φθορισμού, με τις οποίες ανιχνεύθηκε η μόλυνση με ποσοστό επιτυχίας 100% (Kim *et al.*, 2005).

Η ασφάλεια των τροφίμων από τα φυτοφάρμακα είναι πολύ σημαντική, ωστόσο ακόμη δεν υπάρχει κάποιος αποτελεσματικός τρόπος που να μετρά τη διείσδυση των φυτοφαρμάκων στα τρόφιμα. Η κατανόηση της διείσδυσης όμως είναι αδήριτης σημασίας για την αποτελεσματική εφαρμογή φυτοφαρμάκων χωρίς υπολείμματά τους στα τρόφιμα. Για το λόγο αυτό, έχει αναπτυχθεί μια μέθοδος με τη χρήση της διασποράς Raman για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των φυτοφαρμάκων σε δείγματα από σπανάκι. Τα αποτελέσματα έδειξαν επιτυχία στην εφαρμογή της μεθόδου σε νωπά τρόφιμα, σε πραγματικό χρόνο, ενώ θα μπορούσαν να φανούν εξαιρετικά χρήσιμες για την ασφαλή εφαρμογή φυτοφαρμάκων σε φυτά (Yang *et al.*, 2016).

4.2.Γαλακτοκομικά:

Η NIRS έχει χρησιμοποιηθεί αρκετά σε αναλύσεις γαλακτοκομικών προϊόντων. Σε μελέτη με χρήση της μεθόδου αυτής, αναπτύχθηκαν δύο μη εξαρτώμενες μεθοδολογίες με στόχο τη διαφοροποίηση των τυριών από πρόβειο γάλα από διαφορετικά συστήματα παραγωγής, οργανικά και μη. Χρησιμοποιήθηκαν 80 τυριά (40 οργανικά και 40 μη οργανικά), από δύο διαφορετικά συστήματα παραγωγής, από διαφορετικές φυλές προβάτων, διαφορετικών μεγεθών, και σε διαφορετική εποχή, δηλαδή καλοκαίρι και χειμώνα. Οι χρόνοι ωρίμανσης ήταν έως εννέα μήνες.

Πραγματοποιήθηκε χρήση φασμάτων NIR, συνδυαστικά με χημειομετρία, για τη διαφοροποίηση των διαφορετικών ειδών τυριών. Επιτεύχθηκε ταξινόμηση σε ποσοστά 88% και 90%, με χρήση ως μεταβλητές, τα Mg, K και P επειδή αποδείχθηκαν τα πιο σημαντικά μέταλλα. Με τη χρήση NIR, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Win ISI 1,50. Τα φάσματα λήφθηκαν με άμεση εφαρμογή του ανιχνευτή στη φέτα του τυριού, χωρίς κάποια επεξεργασία ή χειρισμό του δείγματος (González-Martín *et al.*, 2011).

Για την αξιολόγηση της ποιότητας τυριών, παρουσιάστηκε ένας αλγόριθμος για την κατάτμηση εικόνων στο χρωματικό χώρο HSI με τη χρήση 19 εμπορικών δειγμάτων βουλγαρικού λευκού τυριού σε άλμη, τα οποία έχουν παραχθεί από αγελαδινό γάλα. Λήφθηκαν φωτογραφίες με ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και με έναν αλγόριθμο τμηματοποίησης, πραγματοποιήθηκε επεξεργασία των εικόνων για την αξιολόγηση της σπασμένης επιφάνειας λευκού τυριού με άλμη. Το «σπάσιμο της πορσελάνης» παρατηρείται σε σπασμένες επιφάνειες λευκού τυριού και μοιάζει με επιφάνεια σπασμένου πορσελάνινου μπολ. Η δομή της σπασμένης πορσελάνης έχει διαστάσεις σε 3D χώρο. Για το λόγο αυτό, οι τμηματοποιημένες εικόνες παρουσιάζονται με πάνω από ένα χρώματα (Danev *et al.*, 2019).

Το καφέτιασμα είναι μια ιδιότητα των τυριών, που συνεπάγεται σκούρο χρώμα στην επιφάνειά τους κατά το ψήσιμο και πριν την κατανάλωση. Πιστεύεται πως η ιδιότητα αυτή είναι απόρροια της αντίδρασης Maillard, που περιλαμβάνει την αλληλεπίδραση ανάμεσα στα ανάγοντα σάκχαρα και τις αμινο-ενώσεις. Συμβαίνει λόγω της θερμότητας, και το καστανό χρώμα του τυριού αρχίζει να κάνει την εμφάνισή του κατά τη διάρκεια επεξεργασίας (Bley *et al.*, 1985; Wang & Sun, 2003), ενώ έχει γίνει αντιληπτό και σε τυριά που αποθηκεύονται σε θερμά κλίματα (Thomas, 1969; Wang & Sun, 2003). Αναπτύχθηκε μια μέθοδος στην οποία χρησιμοποιείται η υπολογιστική όραση για τον προσδιορισμό της αλλαγής του χρώματος του τυριού κατά τη θέρμανση. Έγινε ανάλυση και σύγκριση σε δείγματα τυριών Cheddar και Mozzarella. Η θερμοκρασία (70-200°C) και ο χρόνος (0-20 λεπτά) είχαν σημαντική επίδραση για την ιδιότητα εμφάνισης καφέ χρώματος και στα δύο είδη τυριών. Διαφοροποίηση ανάμεσα στα τυριά, εμφάνισε ένας ειδικά καθορισμένος παράγοντας ροδίσματος (Browning Factor - BF). Το τυρί Mozzarella εμφάνισε καφέ χρώμα πιο σύντομα από το Cheddar, ενώ όταν η θερμοκρασία έφτασε τους 160°C σταμάτησε η εμφάνιση του χρώματος, ίσως λόγω της εξάντλησης των αναγόντων σακχάρων και των αμινομάδων. Σε θερμοκρασίες άνω των 160°C, το Cheddar εμφάνισε καψίματα. Η μέθοδος κατέστησε δυνατή τη συνεχή μέτρηση, σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους, ενώ επίσης εμφάνισε πλεονέκτημα στο χειρισμό επιφάνειας χωρίς ομοιόμορφη κατανομή χρώματος (Wang & Sun, 2003).

Επίσης, έχει ερευνηθεί η επίδραση των διαστάσεων τυριών στην ικανότητα τήξης του τυριού, με τη βοήθεια της υπολογιστικής όρασης, με χρήση τεχνικών ανάλυσης εικόνας. Μία έρευνα επί του θέματος αφορούσε τυριά Cheddar και Mozzarella. Αποδείχθηκε πως οι διαστάσεις παίζουν ρόλο στην ιδιότητα τήξης του τυριού, που συνεπάγεται την αύξηση της ανάγκης για τυποποίηση των διαστάσεων των δειγμάτων κατά τη διάρκεια τέτοιων ερευνών. Τα αποτελέσματα έδειξαν παρόμοια επίδραση του πάχους του τυριού στην τήξη του, και για τα δύο είδη τυριών που χρησιμοποιήθηκαν (Wang & Sun, 2002a).

Διάφορες μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί σχετικά με το χρώμα. Μια από αυτές, αφορά ένα σύστημα όρασης υπολογιστή (CVS) και ένα χρωματόμετρο, τα οποία συγκρίθηκαν για τις ικανότητές του να μετρούν το χρώμα σε 27 διαφορετικά γάλατα και γαλακτοκομικά προϊόντα. Στη μεταξύ τους σύγκριση, παρατηρήθηκε πως το σύστημα της υπολογιστικής όρασης ήταν αξιόπιστο, και μπορεί να αποτελέσει μία μέθοδο που θα αντικαταστήσει τα παραδοσιακά όργανα, για βελτίωση της ακρίβειας (Milovanovic *et al.*, 2021).



Εικόνα 4.2. Σύστημα υπολογιστικής όρασης (Milovanovic *et al.*, 2021).

	CVS	Sample	Colorimeter
Semi hard cheese			
Pasta filata			
Mouldy cheese (cheese parts)			
Mouldy cheese (mould parts)			
Grana padano			
Processed cheese			

Εικόνα 4.3. Χρώμα σε κίτρινα τυριά (Milovanovic *et al.*, 2021).

Η μελαμίνη είναι μια ουσία η οποία έχει απασχολήσει έντονα στο παρελθόν, καθώς έχει χρησιμοποιηθεί για νοθεία σκόνης γάλακτος, όπως στην Κίνα το 2008, οδηγώντας σε σοβαρά προβλήματα υγείας, ακόμη και θάνατο. Μια μέθοδος ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης της μελαμίνης έχει προταθεί με σκοπό να αποφευχθούν παρόμοια περιστατικά. Τρεις εμπορικοί τύποι γάλακτος χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και νοθευμένα δείγματα με μελαμίνη και επιτεύχθηκε ταξινόμηση σε ποσοστό 98,7%, δείχνοντας πολύ καλή απόδοση ως μέθοδος ελέγχου της ποιότητας και της ασφάλειας των γαλακτοκομικών (Pradana-López *et al.*, 2022).

Η τεχνική οπίσθιου λέιζερ έχει χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της πήξης κατά την παρασκευή τυριού με επιτυχία (Verdú *et al.*, 2021). Συστήματα απεικόνισης με υπέρηχους έχουν εφαρμοστεί σε γάλα και γαλακτοκομικά προϊόντα, για τον εντοπισμό φυσικοχημικών αλλαγών και διακυμάνσεων της πυκνότητας στα τρόφιμα. Έχει χρησιμοποιηθεί για την επιθεώρηση πήξης προϊόντων γάλακτος αλλά και για τον προσδιορισμό σχηματισμού γέλης (Gan *et al.*, 2006).

Επιπλέον, η XRI είναι μια ακόμη τεχνική που έχει χρησιμοποιηθεί σε τυριά, με σκοπό τον ποιοτικό έλεγχο. Σε σχετική μελέτη με ανάλυση ημίσκληρου τυριού με προπιονικά βακτήρια που ωρίμασαν σε διαφορετικές συνθήκες, η XRI αποδείχθηκε ελπιδοφόρα για την παρακολούθηση της ποιότητας των τυριών κατά την περίοδο ωρίμανσής τους (Kraggerud *et al.*, 2009).

4.3.Κρέας και Πουλερικά:

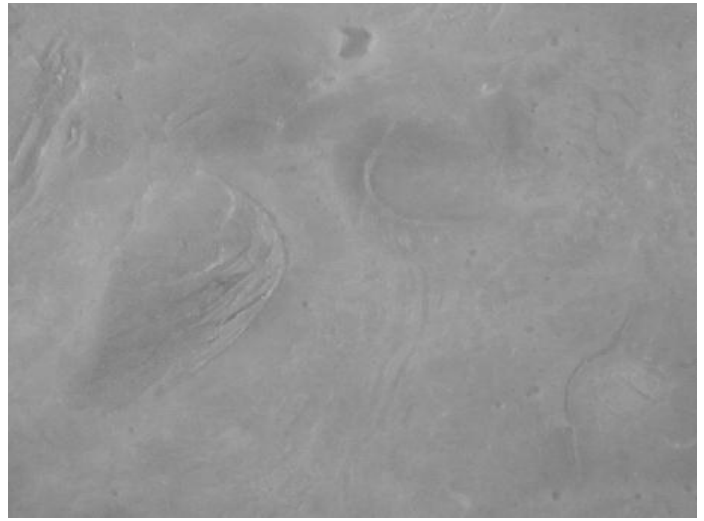
Η εφαρμογή ταχέων και μη καταστρεπτικών μεθόδων σε αλλαντικά και άλλα προϊόντα κρέατος λαμβάνει συνεχώς όλο και περισσότερη σημασία για σκοπούς αξιολόγησης της ποιότητας, σχετικά με διάφορους παράγοντες, όπως η προέλευση, ο τρόπος επεξεργασίας, η φρεσκάδα, η νοθεία, η αυθεντικότητα (Sinanoglou *et al.*, 2018).

Διαφόρων ειδών έρευνες έχουν λάβει χώρα, οι οποίες είναι σχετικές με την ποιότητα και την ασφάλεια των κρεάτων και των πουλερικών. Σε μία από αυτές, χρησιμοποιήθηκε η φασματοσκοπία υπέρυθρου μετασχηματισμού Fourier (Fourier Transform Infrared Spectroscopy - FT-IR), σε συνδυασμό με χρωματομετρία και μεθόδους ανάλυσης εικόνας, με σκοπό την ταξινόμηση και το χαρακτηρισμό αλλαντικών ως προς τον τύπο του κρέατος, την επεξεργασία και τη διάρκεια ζωής σε συνθήκες ψύξης. Χρησιμοποιήθηκαν ζαμπόν από χοιρινό και γαλοπούλα, με τρία είδη επεξεργασίας, βραστά, καπνιστά και ψητά. Με την εφαρμογή χρωματικών παραμέτρων και στατιστικής, επιτεύχθηκε πολύ καλή ταξινόμηση για τα δείγματα. Η FT-IR ανάλυση παρουσίασε ζώνες απορρόφησης πρωτεϊνών, τριγλυκεριδίων, λιπαρών οξέων και υδατανθράκων με εντάσεις ανάλογες του τύπου και της επεξεργασίας του χρησιμοποιούμενου κρέατος. Κατά την αποθήκευση σε συνθήκες ψύξης, οι παράμετροι χρώματος μεταβλήθηκαν σημαντικά και υποβαθμίστηκαν τα τριγλυκερίδια και οι πρωτεΐνες. Με τη συμβολή της ανάλυσης εικόνας αποδείχθηκε πως ο χρόνος αποθήκευσης προκάλεσε υποβάθμιση των εικόνων του ζαμπόν οι οποίες αφορούσαν την τοπική γραμμικότητα, και τη συνέχεια της δομής και της υφής. Η εν λόγω μελέτη λοιπόν, απέδειξε ότι η μεταβολή του χρώματος και της υφής μπορεί να περιγράψει τη διαφοροποίηση ανάμεσα σε ζαμπόν από διαφορετικό κρέας και από διαφορετική επεξεργασία, αλλά και να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της ποιότητας κατά την αποθήκευση, βάσει των μεταβολών που υπέστη η εικόνα της επιφάνειας των δειγμάτων. Σε συνδυασμό με το φάσμα FT-IR, έγιναν γνωστά τα κύρια συστατικά

των δειγμάτων, αλλά και η αλλοίωση αυτών, κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης σε χαμηλές θερμοκρασίες (Sinanoglou *et al.*, 2018).



Εικόνα 4.4. Ψηφιακή εικόνα από βραστό χοιρινό ζαμπόν.



Εικόνα 4.5. Ψηφιακή εικόνα από βραστό χοιρινό ζαμπόν σε κλίμακα του γκρι.

Σε άλλη μελέτη, αναπτύχθηκε μια μέθοδος, με στόχο τη διάκριση ανάμεσα σε ζαμπόν χοιρινού και γαλοπούλας, με χρήση χρωματομετρίας και χαρακτηριστικών υψής κυματοειδούς. Η ανάλυση εικόνας χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την πρόβλεψη της γευστικότητας του βόειου κρέατος, ενώ τελικά εφαρμόστηκε στον έλεγχο της ποιότητας του ζαμπόν. Με τη λήψη ψηφιακών εικόνων υψηλής ποιότητας (50-94 φέτες ανά ζαμπόν), προσδιορίστηκε η κατάλληλη κλίμακα του γκρι, για την καλύτερη διάκριση των διαφορών ανάμεσα στα ζαμπόν. Πραγματοποιήθηκε και χρήση γενετικού αλγορίθμου για τον εντοπισμό των 10 καλύτερων χαρακτηριστικών διάκρισης εικόνας. Με τη χρήση αυτών, επιτεύχθηκε 100% σωστή ταξινόμηση και για τα δύο είδη κρέατος. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων έγινε με τη χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Matlab. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ποιότητα των ζαμπόν μπορεί να γίνει αντιληπτή από την υφή της επιφάνειας και από τα χαρακτηριστικά του χρώματος (Jackman *et al.*, 2010).

Για το χαρακτηρισμό και την ταξινόμηση της εμφάνισης σε φέτες ζαμπόν χοιρινού κρέατος, γαλοπούλας και κοτόπουλου του εμπορίου, πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση με κατευθυντικές διαστάσεις fractal, ενώ έγινε χρήση και ενός ταξινομητή. Στο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν 480 φέτες λεπτού ζαμπόν από 4 τύπους ζαμπόν, οι οποίοι ήταν χοιρινό (μαγειρεμένο και καπνιστό), γαλοπούλα (καπνιστή) και κοτόπουλο ψητό. Με τη βοήθεια ψηφιακών εικόνων σε κλίμακα του γκρι, λήφθηκαν διαφορετικά χαρακτηριστικά υψής ανάμεσα στους τέσσερις τύπους ζαμπόν. Η ταξινόμηση επιτεύχθηκε με ακρίβεια 93,9% και 82,2%. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι

εύκολη στον προγραμματισμό και αποτελεσματική για τον χαρακτηρισμό σε σύνθετες εικόνες. Η DF φάνηκε ευαίσθητη τεχνική και πολλά υποσχόμενη για το χαρακτηρισμό της εμφάνισης και την πρόβλεψη της ποιότητας των ζαμπόν σε φέτες (Mendoza *et al.*, 2009).

Έρευνες έχουν πραγματοποιηθεί και για τον έλεγχο της ικανότητας της υπολογιστικής όρασης να προβλέπει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του βόειου κρέατος. Σε πείραμα βόειου κρέατος, λήφθηκαν εικόνες από μύες *longissimus dorsi*, 24 ώρες μετά από τη σφαγή του ζώου. Αξιολογήθηκαν οι παράμετροι χρώματος L^* , a^* , b^* , το pH, η απώλεια οπού, οι απώλειες κατά το μαγείρεμα, η ξηρή ύλη, η υγρασία, η ακατέργαστη πρωτεΐνη, το λίπος, η τέφρα, η δραστική ουσία του θειοβαρβιτουρικού οξέος (TBARS), η τιμή υπεροξειδίου (POV), τα ελεύθερα λιπαρά οξέα, ο συνολικός αριθμός κολοβακτηριδίων, ο συνολικός βιώσιμος αριθμός και ο συνολικός αριθμός ζύμης. Πραγματοποιήθηκε λήψη εικόνων με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Matlab. Επίσης, τιμές αναφοράς λήφθηκαν με φυσικοχημικές, βιοχημικές και μικροβιολογικές δοκιμές. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η τεχνολογία υπολογιστικής όρασης έχει τη δυνατότητα να αποτελέσει χρήσιμη μέθοδο για την πρόβλεψη της ποιότητας κρεάτων τόσο σε εργαστηριακή, όσο και σε βιομηχανική κλίμακα (Rahman *et al.*, 2020). Για το μυ *longissimus dorsi* (πλατύς ραχιαίος μυς), έχει αναπτυχθεί και αλγόριθμος για την αυτόματη κατάτμησή του και για την απεικόνιση εικόνας μαρμάρου. Αφαιρέθηκε το φόντο της εικόνας, η οποία στη συνέχεια ενισχύθηκε με αντίθεση και κατάλληλα προσαρμοσμένη κλίμακα του γκρι για την εξαγωγή της εικόνας μαρμάρου (Jackman *et al.*, 2009).

Ένα είδος χοιρινού, το οποίο έχει παρουσιάσει εξαιρετικό ενδιαφέρον στην ανάλυση, για την ταξινόμηση της ποιότητας, είναι το ιβηρικό χοιρινό. Τα ιβηρικά χοιρινά προέρχονται από γουρούνια εκτροφής της Νοτιοδυτικής Ιβηρικής Χερσονήσου. Σε αυτά παραδοσιακά γίνεται πάχυνση με βελανίδια και βοσκή. Η οσφυϊκή χώρα που έχει ξηραθεί και τα ζαμπόν αποτελούν τα κύρια άψητα προϊόντα από χοιρινό κρέας και έχουν υψηλή ποιότητα με υψηλές τιμές αγοράς. Με τη χρήση χημικών και αισθητηριακών διαδικασιών έχουν εξεταστεί διάφορες πτυχές των Ιβηρικών προϊόντων σχετικά με την ποιότητα. Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε, παρουσιάζει την ανάλυση της υφής εικόνων μαγνητικής τομογραφίας στο χοιρινό αυτό κρέας, για την ταξινόμηση των ιβηρικών οσφυϊκών μορίων. Είναι μια τεχνική που εφαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο, ενώ η ευαισθησία της στη συγκεκριμένη έρευνα ανήλθε στο 83% για το λίπος και πάνω από 70% για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά (Cernadas *et al.*, 2005).

Η ετεροφασματική δισδιάστατη ανάλυση συσχέτισης προσφέρει έναν καλό τρόπο ερμηνείας φασμάτων εγγύς υπέρυθρου. Σε μελέτη συσχέτισης δεδομένων υπερφασματικής απεικόνισης εγγύς υπέρυθρου με φάσματα μέσης υπέρυθρης ακτινοβολίας, παρακολούθηθηκε η οξειδωτική βλάβη σε

μυοϊνίδια χοιρινού κρέατος σε συνθήκες κατάψυξης. Λήφθηκαν υπερφασματικές εικόνες, σε κατεψυγμένα δείγματα και το μοντέλο που αναπτύχθηκε αποδείχθηκε αποτελεσματικό στα μήκη κύματος του εγγύς υπέρυθρου. Η NIR δηλαδή, μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη στη γρήγορη ανίχνευση οξειδωτικής βλάβης των μυοϊνιδίων χοιρινού κρέατος σε κατεψυγμένη κατάσταση (Cheng *et al.*, 2018).

Τα παθογόνα βακτήρια είναι από τις κύριες αιτίες ύπαρξης τροφιμογενών ασθενειών. Μια μελέτη στόχευσε στη χρήση της υπερφασματικής απεικόνισης ως μεθόδου για τον ποσοτικό και άμεσο προσδιορισμό των *Enterobacteriaceae* σε φιλέτα κοτόπουλου. Η υπερφασματική απεικόνιση αναδείχθηκε ως πιθανό εργαλείο για να προσδιορίζεται η υγιεινή κατάσταση των τροφίμων και η ύπαρξη παθογόνων βακτηρίων στα τρόφιμα (Feng *et al.*, 2013). Η υπερφασματική απεικόνιση έχει χρησιμοποιηθεί και για τις δυνατότητές της στον προσδιορισμό των *Pseudomonas* σε ωμά φιλέτα στήθους κοτόπουλου. Με τη χρήση συστήματος υπερφασματικής απεικόνισης γραμμικής σάρωσης (900-1700 nm), λήφθηκαν εικόνες, διορθώθηκαν, τροποποιήθηκαν και επεξεργάστηκαν και αποδείχθηκε πως η εν λόγω μέθοδος είναι αποτελεσματική για τη μέτρηση *Pseudomonas* σε ωμά φιλέτα από στήθος κοτόπουλου (Feng & Sun, 2013).

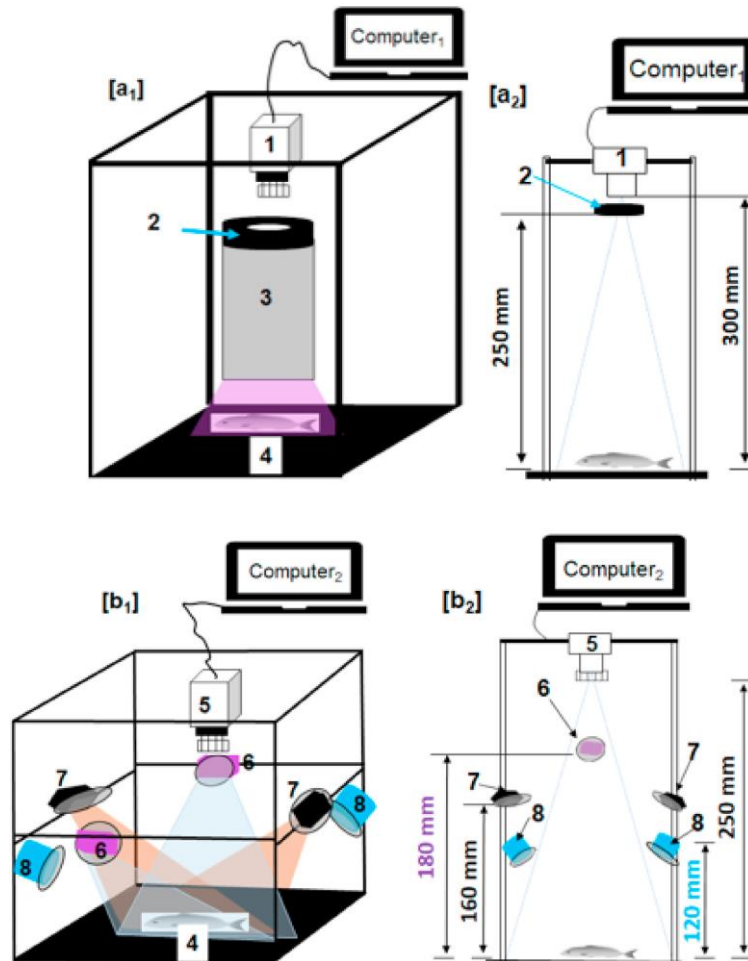
4.4.Ιχθυηρά:

Τα ιχθυηρά είναι μια ακόμη κατηγορία τροφίμων, η οποία παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον στην ανάλυση εικόνας. Η υπολογιστική όραση σε συνδυασμό με νευρωνικό δίκτυο έχει εφαρμοστεί για την αναγνώριση του είδους των υπό μελέτη ψαριών, τοποθετημένα πάνω σε ιμάντα μεταφοράς, με αποτελέσματα που δείχνουν 95% επιτυχή ταξινόμηση. Το πρόγραμμα βασίζεται σε ένα δείγμα προγράμματος του Parker (1989), το οποίο έχει τροποποιηθεί για την εκτέλεση τεσσάρων εργασιών, οι οποίες είναι: η δημιουργία δικτύου, η εκπαίδευσή του, η δοκιμή του και η εξαγωγή του δικτύου. Το αρχείο που εξάγεται μπορεί να εισαχθεί από το πρόγραμμα του υπολογιστή και να μετρήσει τον όγκο στα ψάρια, ενώ χρησιμοποιεί το δίκτυο για να μαντέψει τα είδη των ψαριών. Επειδή οι υπολογισμοί ήταν αργοί, υιοθετήθηκε μια στρατηγική για την εξάλειψη των συνδέσεων των οποίων το βάρος ήταν κάτω από ένα συγκεκριμένο όριο. Με τον τρόπο αυτό ο χρόνος υπολογισμού μειώθηκε και η σύγκλιση στα σύνολα των μαθησιακών επαναλήψεων αυξήθηκε. Το σύστημα δεν επηρεάστηκε από φυσικές δυνάμεις, επομένως είναι δυνατή η χρήση του και σε κινούμενο πλοίο. Είναι επίσης ανθεκτικό για χρήση σε περιβάλλον παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα τα πρόσφατα αλιευμένα ψάρια μπορούν να επεξεργαστούν άμεσα χωρίς προετοιμασία (Storbeck & Daan, 2001).

Είναι γνωστό πως η ποιότητα των ιχθυηρών επηρεάζεται από παράγοντες όπως η επεξεργασία, ο χειρισμός, η αποθήκευση, οι μολυσματικοί παράγοντες και οι περιβαλλοντικές αλλαγές. Τα φυτοφάρμακα είναι μία πολύ σημαντική απειλή για την ποιότητα των ψαριών. Έχει προταθεί μια μη καταστρεπτική μέθοδος για τον προσδιορισμό των διαφορών ποιότητας ανάμεσα σε ψάρια εκτεθειμένα σε φυτοφάρμακα και ψάρια του γλυκού νερού. Η ταξινόμηση ήταν επιτυχής με ακρίβεια 96,87%. Η μέθοδος απαιτεί μικρό χρόνο, επομένως είναι κατάλληλη για αξιολόγηση ποιότητας σε πραγματικό χρόνο. Μια πρόσφατη μέθοδος χρησιμοποιεί το προφίλ αλλαγής χρώματος κάθε δείγματος και χρησιμοποιεί την ανάλυση βασικών στοιχείων για την ανάλυση των ψηφιακών δεδομένων (Dutta *et al.*, 2015). Το χρώμα μπορεί να θεωρηθεί ως μια σημαντική παράμετρος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανθρώπινη αντίληψη σχετικά με τον προσδιορισμό της ποιότητας και της ασφάλειας των δειγμάτων. Ως εκ τούτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημαντικό χαρακτηριστικό της ταξινόμησης δειγμάτων τροφίμων (Sengar *et al.*, 2017).

Η ποιότητα των ψαριών, εκτός από το χειρισμό τους, την επεξεργασία στην οποία υποβάλλονται και τις συνθήκες αποθήκευσής τους, επηρεάζονται και από το χρόνο συντήρησης και τη θερμοκρασία στην οποία αποθηκεύονται τα ψάρια μετά την αλίευση. Τέτοια στοιχεία είναι βασικά, ώστε να διατηρηθεί η ποιότητά τους. Έχει προταθεί μια αυτόματη μέθοδος επεξεργασίας, αποτελεσματική και μη παρεμβατική, με στόχο την κατάτμηση των ιστών και κατ' επέκταση την πρόβλεψη της φρεσκότητας σε δείγματα ψαριών. Πραγματοποιήθηκε αυτόματη κατάταξη των ιστών των βραγχίων των ψαριών και πρόβλεψη της φρεσκότητας με ειδικά προγράμματα ανάλυσης εικόνας (Dutta *et al.*, 2016).

Η φρεσκότητα των ψαριών μπορεί να ανιχνευθεί με τη χρήση πολυφασματικής απεικόνισης συνδυασμένη με τεχνικές ανάλυσης πολλαπλών μεταβλητών. Σε σχετική έρευνα που έγινε σε ιαπωνικό ψάρι (*Tribolodon hakonensis*), ψυγμένο σε θερμοκρασία <math><5^{\circ}</math> C, με φωτισμό LED, UV και έγχρωμη κάμερα, αποδείχθηκε πως πολυφασματική απεικόνιση φθορισμού είναι μια κατάλληλη μέθοδος για τον έλεγχο της φρεσκότητας ιχθυηρών κατά την αποθήκευση (Omwange *et al.*, 2021).



Εικόνα 4.6. Συστήματα λήψης εικόνας: (a1) Σύστημα απεικόνισης 3D κάμερας UV με LED, (a2) σύστημα κάμερας UV 2D που δείχνει αντίστοιχα ύψη LED και ύψος κάμερας. (b1) Σύστημα απεικόνισης έγχρωμης κάμερας 3D με LED, (b2) Σύστημα έγχρωμης κάμερας 2D με LED και ύψη κάμερας. Οι αριθμοί υποδηλώνουν: 1. UV-κάμερα, LED δακτυλίου 2.280 nm, 3. Ασπίδα, 4. Επιφάνεια δείγματος, 5. Έγχρωμη κάμερα, LED LED 6.365 nm, 7. LED λευκής μπάρας και LED 8.395 nm.

Ένα σύστημα ορατής / εγγύς υπέρυθρης υπερφασματικής απεικόνισης συνδυαστικά με ανάλυση κυματοειδών, έχει χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του πτητικού βασικού αζώτου σε γαρίδες, κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, με τα αποτελέσματα να είναι ελπιδοφόρα για τη χρήση της τεχνικής (Dai *et al.*, 2016).

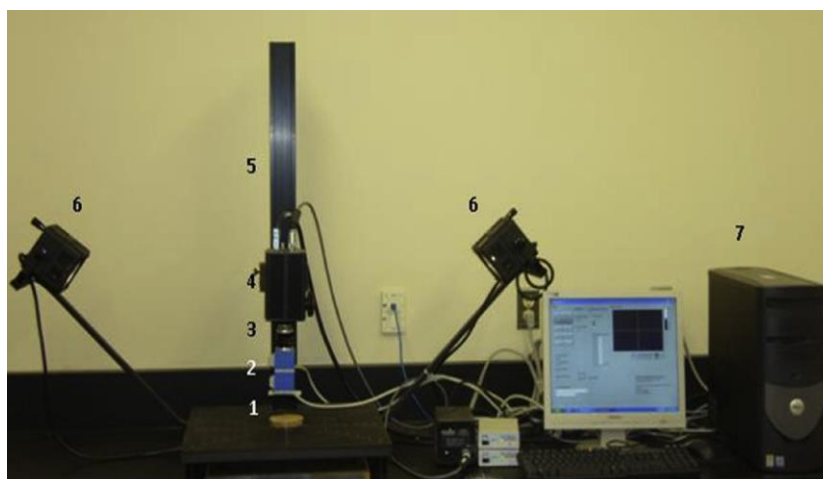
4.5. Δημητριακά και Προϊόντα τους:

Πολλές χώρες όπως ο Καναδάς, έχουν μηδενική ανοχή για ύπαρξη εντόμων σε σιτηρά. Έτσι λοιπόν έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι για την ακριβή ανίχνευσή τους. Για παράδειγμα, η θερμική απεικόνιση έχει χρησιμοποιηθεί για να ανιχνευθεί η προσβολή από το *Cryptolestes ferrugineus*, σε 6 επίπεδα ανάπτυξης, τέσσερα προνυμφικά, νύμφες και ενήλικες, σε πυρήνες από σιτάρι. Επιτεύχθηκε ταξινόμηση μέχρι ποσοστό 83,5%, ενώ χρειάζονται περαιτέρω μελέτες για τον προσδιορισμό του σταδίου ανάπτυξης του εντόμου που έχει προσβάλει το σπόρο (Manickavasagan

et al., 2008).

Μία τεχνική με πολύ ελπιδοφόρα αποτελέσματα είναι η χρήση τεχνικών εικόνας με νευρωνικά δίκτυα για την εκτίμηση του βαθμού μόλυνσης των δημητριακών, κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας σιτηρών. Σκοπός ήταν να βελτιωθεί η διαδικασία αξιολόγησης μολυσματικών παραγόντων στους κόκκους, με στόχο την επιτάχυνσή της. Με τη μέθοδο αυτή τα μοντέλα που παρουσιάστηκαν αποδείχθηκαν πολύ καλής ποιότητας ($R^2=0,999$), ενώ επιτεύχθηκε και εξοικονόμηση στις περαιτέρω διαδικασίες παραγωγής (Szwedziak *et al.*, 2020). Η επεξεργασία εικόνων έχει φανεί χρήσιμη και σε περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται παραδοσιακές μέθοδοι για τον έλεγχο της ποιότητας. Μία τέτοια περίπτωση είναι και ο τομέας της γεωργίας στην Ινδία. Πρόσφατα, η ανάλυση εικόνας αναδείχθηκε ως ένα χρήσιμο εργαλείο ανίχνευσης της ποιότητας ρυζιού, που μπορεί να αντικαταστήσει παλαιές μεθόδους, όπως είναι το κοσκίνισμα, μια μέθοδος ανακριβής και χρονοβόρα (Nalla *et al.*, 2018).

Για την απεικόνιση της κατανομής γλουτένης και αμύλου σε ζύμες, έχει χρησιμοποιηθεί μια μέθοδος, η οποία συνδύασε τη μέτρηση δακτυλικών αποτυπωμάτων φθορισμού, με τεχνική απεικόνισης. Λόγω της μη αναγκαίας προετοιμασίας δειγμάτων, η τεχνική αυτή έχει πλεονέκτημα έναντι των συνηθισμένων μεθόδων (Kokawa *et al.*, 2012). Η πρόβλεψη της περιεκτικότητας σε πρωτεΐνες και της σκληρότητας σιταριού, έχει επιτευχθεί με την υπερφασματική απεικόνιση στο NIR. Αποτελέσματα σε τέτοιου είδους έρευνα έδειξαν πολύ καλή ικανότητα της εν λόγω μεθόδου στην πρόβλεψη χαρακτηριστικών σιταριού (Mahesh *et al.*, 2015).



Εικόνα 4.7. Το υπερφασματικό σύστημα απεικόνισης NIR. 1. Δείγμα σίτου χύμα, 2. Ρυθμιζόμενο φίλτρο υγρών κρυστάλλων (LCTF), 3. Φακός, 4. Κάμερα NIR, 5. Βάση αντιγραφής, 6. Φωτισμός (λαμπτήρες αλογόνου), 7. Σύστημα επεξεργασίας δεδομένων.

Σχετικά με την ασφάλεια αλεύρων, ένας βιομηχανικός λευκός παράγοντας που ονομάζεται φθορίζον λευκαντικό, έχει χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς παράνομα, με στόχο τη λεύκανση αλεύρου σίτου. Η υπολογιστική όραση σε συνδυασμό με τη χρωματομετρία, έχουν προταθεί ως εργαλείο για τον εντοπισμό της διαφοράς χρώματος ανάμεσα σε διαφορετικές συγκεντρώσεις της ουσίας αυτής. Χρησιμοποιήθηκε επίσης φασματοσκοπία υπέρυθρου μετασχηματισμού Fourier συνδυαστικά με φασματοσκοπία υπέρυθρου. Η τεχνολογία υπολογιστικής όρασης και η χρωματομετρία αποδείχθηκαν αποτελεσματικές στην εκτίμηση της νοθείας και προτείνεται για την ταχεία και μη καταστρεπτική ταυτοποίηση και ποσοτικοποίηση φθορίζουσών ουσιών (Guo *et al.*, 2015).

4.6. Λίπη και Έλαια:

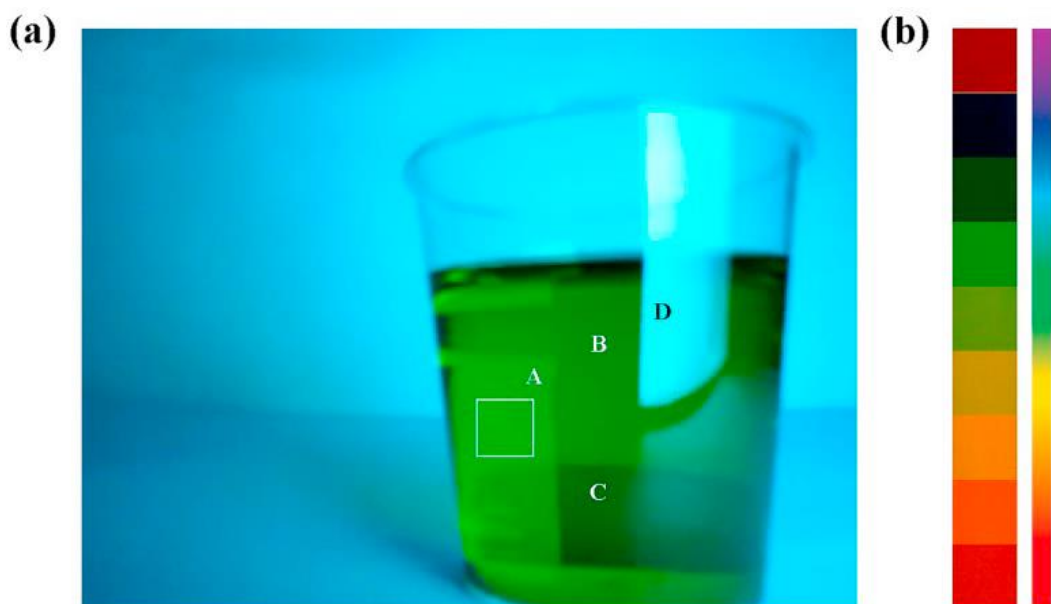
Μια σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό της ποιότητας των φρούτων φοίνικα, είναι η ταξινόμηση των τσαμπιών σχετικά με το επίπεδο ωριμότητας. Για το σκοπό αυτό, έχει προταθεί μια τεχνική που αξιολογεί την LBI σε συνδυασμό με υπολογιστική όραση για να προσδιοριστεί η περιεκτικότητα των φρούτων σε λάδι και η αλλαγή χρώματος για κάθε επίπεδο ωρίμανσης (άγουρα, ώριμα, υπερώριμα). Οι εικόνες αποκτήθηκαν στο χρωματικό χώρο RGB και χρησιμοποιήθηκαν 90 δείγματα, 30 για κάθε επίπεδο ωρίμανσης. Επιτεύχθηκε ταξινόμηση πάνω από 85%, που σημαίνει πως ο συνδυασμός της LBI με ένα σύστημα υπολογιστών θα μπορούσε εύκολα να χρησιμοποιηθεί για την ταξινόμηση ελαίου (Ali *et al.*, 2020b).

Μια ακόμη εργασία, προτείνει μοντέλα για ταξινόμηση με σκοπό την πρόβλεψη του δείκτη ωριμότητας της ελιάς, και βασίζεται σε φάσματα FT-NIR σε συνδυασμό με ανάλυση εικόνας. Χρησιμοποιήθηκαν 13 ποικιλίες ελιάς και τα αποτελέσματα έδειξαν ευαισθησία και ακρίβεια σε ποσοστό έως και πάνω από 81%. Μία τέτοια μέθοδος μπορεί να προσφέρει στην ταχεία διαλογή ελιάς, με σκοπό την παραγωγή υψηλής ποιότητας παρθένου ελαιολάδου (Alamprese *et al.*, 2021).

Έρευνα σχετικά με την ασφάλεια ελαιολάδων έχει επίσης αναπτυχθεί. Με ένα σύστημα υπολογιστικής όρασης, μπορεί να εκτιμηθεί η περιεκτικότητα παρθένων ελαιολάδων σε υγρασία και αδιάλυτους ρύπους. Στη σύγκριση μίας τέτοιας μεθόδου με την υπάρχουσα, συμβατική μέθοδο, βρέθηκε υψηλή συσχέτιση των αποτελεσμάτων (Gila *et al.*, 2020).

Η νοθεία σε βρώσιμα έλαια είναι πολύ σημαντική για τους καταναλωτές. Η χρήση smartphone σε συνδυασμό με την επεξεργασία εικόνων και χημειομετρικά εργαλεία, έχει προταθεί για την ποσοτικοποίηση της νοθείας σε εξαιρετικά παρθένο ελαιόλαδο. Χρησιμοποιήθηκε μια ακολουθία φωτός με διαφορετικά χρώματα στην οθόνη του κινητού, με σκοπό το φωτισμό των δειγμάτων. Καταγράφηκαν βίντεο για τον εντοπισμό των αλλαγών του χρώματος των δειγμάτων, τα οποία μετατράπηκαν σε φασματικά δεδομένα. Η τεχνική αυτή αποδίδει αποτελέσματα συγκρίσιμα με

εκείνα βασικών φασματοσκοπικών τεχνικών. Λόγω και του χαμηλού κόστους της συγκεκριμένης μεθόδου, έχει δυνατότητες ώστε να παρέχει μια λύση σχετικά με τον εντοπισμό νοθείας στα έλαια (Song *et al.*, 2020).



Εικόνα 4.8.(α) Το 50ο καρέ ενός βίντεο smartphone. Το δείγμα λαδιού φωτίστηκε χρησιμοποιώντας οθόνη smartphone (κυανό χρώμα) και η επιλεγμένη απόδοση επένδυσης με 70×70 εικονοστοιχεία σημειώθηκε σε λευκό τετράγωνο. (β) ένα υποσύνολο εικόνων ROI και μια ακολουθία χρωμάτων που ποικίλλουν από μοβ έως κόκκινο.

Επίσης, για τον εντοπισμό αλλαγών στις ιδιότητες ελαίων, λόγω μεταβολών της θερμοκρασίας, έχει χρησιμοποιηθεί απεικόνιση με υπέρηχους. Σε διάφορα δείγματα, αυτή η ανέπαφη και γρήγορη τεχνική είχε επιτυχία (Gan *et al.*, 2006).

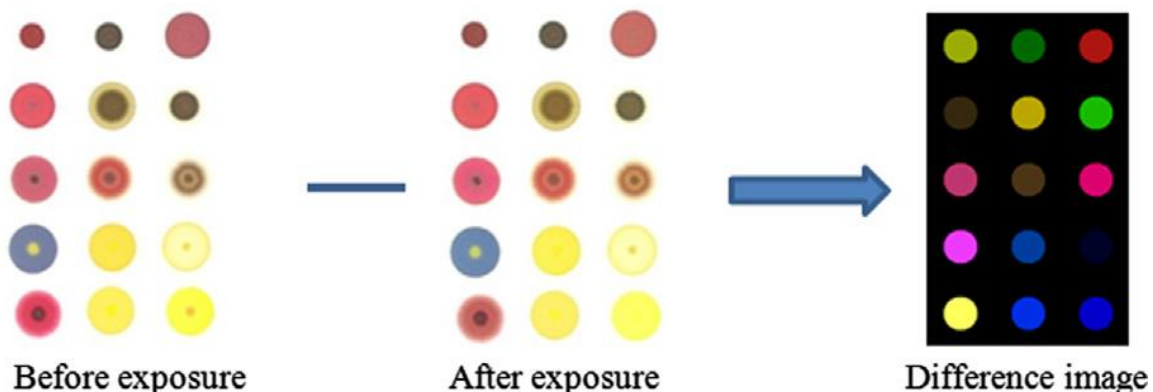
4.7.Αλκοολούχα και Μη Αλκοολούχα Ποτά:

Πρόσφατα, προτάθηκε μια οικονομική μέθοδος για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε αιθανόλη, δειγμάτων μπίρας. Είναι μια μέθοδος φιλική στο περιβάλλον, με μόνο 200μL απόβλητα σε κάθε δοκιμή. Βασίστηκε στη αντίδραση της αιθανόλης με διχρωμικό κάλιο σε όξινο μέσο. Τα δείγματα, μετά την προσθήκη του διχρωμικού καλίου επωάστηκαν και λήφθηκε μια ψηφιακή εικόνα με τη βοήθεια επίπεδου σαρωτή. Χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο RGB και προσδιορίστηκε με επιτυχία η περιεκτικότητα σε αιθανόλη. Μια τέτοια μέθοδος μπορεί να ωφελήσει χώρες όπου δεν υπάρχουν πόροι για αγορά αναλυτικού εξοπλισμού (Curbani *et al.*, 2020). Δείγματα μπίρας έχουν χρησιμοποιηθεί και για την ανάλυση σε υγρή και αέρια φάση με τη βοήθεια χρωματομετρικής συστοιχίας αισθητήρων, με χρήση επίσης στατιστικών και χημειομετρικών μεθόδων. Στα πειράματα αυτά αναγνωρίστηκαν συγκεκριμένες μπίρες με ποσοστό σφάλματος μικρότερο από

3%. Τέτοια αποτελέσματα δείχνουν πως η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμεύσει στη διασφάλιση ποιότητας και στον ποιοτικό έλεγχο μπύρας ή και άλλων ποτών (Zhang *et al.*, 2006).

Η ζύμωση είναι κρίσιμο βήμα κατά την επεξεργασία μαύρου τσαγιού. Ο συνδυασμός φασματοσκοπίας μετασχηματισμού Fourier στο εγγύς υπέρυθρο και υπολογιστικής όρασης έχει πετύχει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση στο βαθμό ζύμωσης σε μαύρο τσάι. Επιτεύχθηκε ταχεία ταξινόμηση με ακρίβεια 100% (Jin *et al.*, 2020).

Μια οσφρητική τεχνική που έχει βασιστεί στη χρωματομετρική διάταξη των αισθητήρων έχει προταθεί για την ταξινόμηση του κινέζικου οίνου από ρύζι (ένα είδος γλυκού και χρυσού κρασιού το οποίο παρασκευάζεται κυρίως από ρύζι και σιτάρι- Wang *et al.*, 2017a), ανάλογα με την ηλικία τους. Οι αισθητήρες αποτελούνταν από υλικά πορφυρίνης ή μεταλλοπορφυρίνης και από δείκτες pH. Μετά την έκθεση των αισθητήρων σε οίνους ρυζιού, αποκτήθηκε ένα προφίλ αλλαγής χρώματος με διαφοροποίηση των αισθητήρων πριν και μετά την έκθεση στο δείγμα. Λήφθηκαν καλά αποτελέσματα ταξινόμησης επομένως η οσφρητική μέθοδος μπορεί να σταθεί επάξια για την αξιολόγηση της ποιότητας οίνων ρυζιού (Ouyang *et al.*, 2013).



Εικόνα 5 Εικόνα του πίνακα χρωματομετρικών αισθητήρων πριν από την έκθεση, μετά από έκθεση σε οίνο ρυζιού και την εικόνα διαφοράς.

Ένα ακόμη κινέζικο ποτό στο οποίο έχει χρησιμοποιηθεί χρωματομετρική διάταξη αισθητήρων, είναι το baijiu. Έγινε χρήση πορφυρίνης και παραγώγων της, και χημικών αποκριτικών χρωμάτων, και τελικά η τεχνική αποδείχθηκε πως μπορεί να χαρακτηρίσει τους τύπους του ποτού αυτού, ανάλογα με τα ιχνοστοιχεία που περιέχουν, ενώ επιτεύχθηκε 100% ταξινόμηση (Ya *et al.*, 2012).

Για το νερό έχουν αναπτυχθεί πολλοί τρόποι ανάλυσης. Μια επιτυχής διάκριση και ταυτοποίηση εμφιαλωμένων νερών, αλλά και νερού βρύσης έχει πραγματοποιηθεί με τη χρήση χημειοαισθητήρων, με 45 χρωματομετρικές χρωστικές ουσίες (Chan *et al.*, 2009).

4.8. Άλλα τρόφιμα:

Ένα αυτοματοποιημένο σύστημα για την ταξινόμηση της σάλτσας πίτσας αναπτύχθηκε με τη χρήση έγχρωμης όρασης, μηχανισμού με διάνυσμα και χρωματομετρία. Μετά την τμηματοποίηση της, η εικόνα μετατράπηκε από το χρωματικό χώρο RGB στο χώρο HSV. Στη συνέχεια ταξινομήθηκε το άλειμμα σάλτσας πίτσας και επιτεύχθηκε 96,67% ταξινόμηση (Du & Sun, 2005). Έχει αξιοποιηθεί επίσης η υπολογιστική όραση, για την αξιολόγηση της ποιότητας της πίτσας. Αναλύθηκαν 25 δείγματα και οι δείκτες που εξετάστηκαν ήταν τα ποσοστά έκτασης μανιταριών, ζαμπόν και ποσοστό έκτασης της επικάλυψης (topping area percentage- TAP). Όταν η εξέταση αφορούσε μόνο δύο επίπεδα ταξινόμησης, την αποδεκτή και την ελαττωματική ποιότητα, η ακρίβεια έφτανε στο 100% (Sun & Brosnan, 2003).

Το τζίντζερ είναι ένα πολύ γνωστό προϊόν, χρήσιμο τόσο στη βιομηχανία τροφίμων, όσο και στη φαρμακοβιομηχανία. Είναι ένα τρόφιμο το οποίο είναι επιρρεπές σε νοθεία με ρεβίθια, όταν πωλείται με τη μορφή σκόνης. Σε σχετική μελέτη ταξινομήθηκαν εικόνες από σκόνη τζίντζερ για εντοπισμό νοθείας, με τη χρήση της υπολογιστικής όρασης. Παρασκευάστηκαν 3360 δείγματα, σε 7 κατηγορίες: καθαρή σκόνη τζίντζερ, και σκόνη με 10%, 20%, 30%, 40%, 50% νοθευμένα. Τα αποτελέσματα έδειξαν βαθμολόγηση της σκόνης σε ποσοστό 99,70%, επομένως μια τέτοια τεχνική θα μπορούσε να αντικαταστήσει κάποιες συνήθεις μεθόδους ανίχνευσης νοθείας (Jahanbakhshi *et al.*, 2021).

5.Συμπεράσματα:

Όπως αποδείχθηκε, η ανάλυση εικόνας είναι μια μέθοδος με πολυάριθμες προοπτικές. Η ένταξή της στη βιομηχανία θα συμβάλει στη μείωση του χρόνου παραγωγής, καθώς οι έλεγχοι σε κρίσιμα σημεία ελέγχου θα μπορούν να πραγματοποιούνται πιο σύντομα. Η επιθεώρηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών αλλά και των παραμέτρων ασφάλειας μπορεί να πραγματοποιείται ταχύτατα, με μεγάλη ακρίβεια και κυρίως, χωρίς να χρειάζεται να καταστραφούν τα δείγματα, που συνεπάγεται λιγότερα απόβλητα. Η χρήση προηγμένων τεχνικών στη βιομηχανία τροφίμων θα αυξήσει την αποδοτικότητα και θα συμβάλει στη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας.

Παρ' όλα αυτά, για να συμβεί αυτό, είναι επιτακτική η ανάγκη για περαιτέρω μείωση του κόστους, καθώς μερικά από τα συστήματα εικόνας είναι οικονομικά ασύμφορα για πολλές επιχειρήσεις. Μελλοντικά, με τη βελτίωση των τεχνικών ανάλυσης εικόνας και την ανάπτυξη νέων και ανανεωμένων συστημάτων, το κόστος μπορεί να μειωθεί τόσο ώστε να είναι εφικτή η ένταξη της ανάλυσης εικόνας σε μια οικονομικά συμφέρουσα παραγωγική διαδικασία. Με τον τρόπο αυτό, η τεχνολογία αυτή θα έχει και κοινωνικές προεκτάσεις. Από τη στιγμή που στην παραγωγική διαδικασία θα μειωθούν οι απώλειες που συμβαίνουν σε ορισμένα στάδια της επεξεργασίας, θα προκύπτει περισσότερο προϊόν, επομένως το καταναλωτικό κοινό θα μπορεί να έχει στη διάθεσή του περισσότερη διαθέσιμη τροφή. Έτσι, θα είναι εφικτή η άμβλυνση διαφόρων κοινωνικών προβλημάτων, όπως είναι η πείνα, καθώς και η άνιση πρόσβαση στην τροφή. Ταυτόχρονα, σε λιγότερο αναπτυγμένες χώρες, με μεγάλα ποσοστά φτώχειας, μια τέτοια τεχνολογία μπορεί να μειώσει το κόστος σε αρκετά προϊόντα, το οποίο συνεπάγεται ότι όλο και περισσότεροι άνθρωποι θα διευκολυνθούν και θα έχουν τη δυνατότητα να προμηθευτούν πιο πολλά αγαθά.

Τέλος, εκτός από την επίλυση κοινωνικών προβλημάτων, η ανάλυση εικόνας θα συμβάλει και στη βελτίωση των συνθηκών του πλανήτη. Είναι μια τεχνολογία φιλική προς το περιβάλλον, αφού με τη χρήση της μπορούν να μειωθούν τα απόβλητα των βιομηχανιών τροφίμων, άρα και τα απορρίμματα, καθώς επίσης και να αξιοποιηθούν, αφού ελεγχθούν, ώστε να παράξουν νέα προϊόντα.

Βιβλιογραφία:

1. Abasi, S., Minaei, S., Jamshidi, B., & Fathi, D. (2018). Dedicated non-destructive devices for food quality measurement: A review. *Trends in food science & technology*, 78, 197-205.
2. Abbott, J. A. (1999). Quality measurement of fruits and vegetables. *Postharvest biology and technology*, 15(3), 207-225.
3. Abdelkarim, E. I., Ali, O. S., Saeed, A. E. M., Ahmed, B. M., & Ibrahim, K. E. E. (2005). New anticestodal drugs: efficacy, toxicity and structure activity relationship of some derivatives of the open lactam form of praziquantel (n-sulphanilamido/coo-alkyl). *Journal of science and technology*, 6(1), 0-0.
4. Adobe Systems 2002. Adobe Systems. Adobe PhotoShop 7.0 User Guide, Adobe Systems Inc, San Jose, CA.;
5. Adebayo, S. E., Hashim, N., Abdan, K., & Hanafi, M. (2016). Application and potential of backscattering imaging techniques in agricultural and food processing—A review. *Journal of Food Engineering*, 169, 155-164.
6. Adebayo, S. E., Hashim, N., Hass, R., Reich, O., Regen, C., Münzberg, M., ... & Zude-Sasse, M. (2017). Using absorption and reduced scattering coefficients for non-destructive analyses of fruit flesh firmness and soluble solids content in pear (*Pyrus communis* 'Conference')—An update when using diffusion theory. *Postharvest Biology and Technology*, 130, 56-63.
7. Alamprese, C., Grassi, S., Tugnolo, A., & Casiraghi, E. (2021). Prediction of olive ripening degree combining image analysis and FT-NIR spectroscopy for virgin olive oil optimisation. *Food Control*, 123, 107755.
8. Alamprese, C., Casale, M., Sinelli, N., Lanteri, S., & Casiraghi, E. (2013). Detection of minced beef adulteration with turkey meat by UV-vis, NIR and MIR spectroscopy. *LWT-Food Science and Technology*, 53(1), 225-232.
9. Ali, M. M., Hashim, N., Bejo, S. K., & Shamsudin, R. (2017). Rapid and nondestructive techniques for internal and external quality evaluation of watermelons: A review. *Scientia Horticulturae*, 225, 689-699.
10. Ali, M. M., Hashim, N., Abd Aziz, S., & Lasekan, O. (2020a). Emerging non-destructive thermal imaging technique coupled with chemometrics on quality and safety inspection in food and agriculture. *Trends in Food Science & Technology*.
11. Ali, M. M., Hashim, N., & Hamid, A. S. A. (2020b). Combination of laser-light backscattering imaging and computer vision for rapid determination of oil palm fresh fruit bunches maturity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, 105235.)
12. Ariana, D. P., & Lu, R. (2008). Detection of internal defect in pickling cucumbers using hyperspectral transmittance imaging. *Transactions of the ASABE*, 51(2), 705-713.
13. Ariana, D. P., & Lu, R. E. N. F. U. (2010). DETECTION OF INTERNAL DEFECT IN PICKLING CUCUMBERS USING LASER SCATTERING IMAGE ANALYSIS. In XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR).
14. Arora, N., Martins, D., Ruggerio, D., Tousimis, E., Swistel, A. J., Osborne, M. P., & Simmons, R. M. (2008). Effectiveness of a noninvasive digital infrared thermal imaging system in the detection of breast cancer. *The American Journal of Surgery*, 196(4), 523-526.
15. Arvanitoyiannis, I. S., Varzakas, T. H., & Koukaliaroglou-van Houwelingen, M. (2009). Implementing HACCP and ISO 22000 for foods of animal origin—Dairy products. *HACCP and ISO 22000—Application to foods of animal origin*, 91-180.
16. Ayvaz, H., Bozdogan, A., Giusti, M. M., Mortas, M., Gomez, R., & Rodriguez-Saona, L. E. (2016). Improving the screening of potato breeding lines for specific nutritional traits using portable mid-infrared spectroscopy and multivariate analysis. *Food chemistry*, 211, 374-382.
17. Baert, K., Van Huffel, X., Wilmart, O., Jaxsens, L., Berkvens, D., Diricks, H., et al. (2011). Measuring the safety of the food chain in Belgium: development of a barometer. *Food Research International*, 44, 940e950

18. Bagavathiappan, S., Lahiri, B. B., Saravanan, T., Philip, J., & Jayakumar, T. (2013). Infrared thermography for condition monitoring—A review. *Infrared Physics & Technology*, 60, 35-55.
19. Ballerini, L., Hogberg, A., Borgefors, G., Bylund, A. C., Lindgard, A., Lundstrom, K., ... & Soussi, B. (2002). A segmentation technique to determine fat content in NMR images of beef meat. *IEEE transactions on Nuclear Science*, 49(1), 195-199.
20. Bannan, D. (2009). Cubes and slices. *Nature photonics*, 3(11), 627-629.
21. Barbin, D., Elmasry, G., Sun, D. W., & Allen, P. (2012). Near-infrared hyperspectral imaging for grading and classification of pork. *Meat Science*, 90(1), 259-268.
22. Barbin, D. F., ElMasry, G., Sun, D. W., & Allen, P. (2013). Non-destructive determination of chemical composition in intact and minced pork using near-infrared hyperspectral imaging. *Food chemistry*, 138(2-3), 1162-1171.
23. Barth, A. (2000). The infrared absorption of amino acid side chains. *Progress in biophysics and molecular biology*, 74(3-5), 141-173.
24. Baxes GA (1994) *Digital image processing principles and applications*. Wiley, New York
25. Bell, R. (2012). *Introductory Fourier transform spectroscopy*. Elsevier.
26. Bernazzani, P., Chapados, C., & Delmas, G. (2000). Double-helical network in amylose as seen by slow calorimetry and FTIR. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 38(12), 1662-1677.
27. Bischof, J. C., Mahr, B., Choi, J. H., Behling, M., & Mewes, D. (2007). Use of X-ray tomography to map crystalline and amorphous phases in frozen biomaterials. *Annals of biomedical engineering*, 35(2), 292-304.
28. Bley, M. E., Johnson, M. E., & Olson, N. F. (1985). Factors affecting nonenzymatic browning of process cheese. *Journal of Dairy Science*, 68(3), 555-561.
29. Bonfatti, V., Di Martino, G., & Carnier, P. (2011). Effectiveness of mid-infrared spectroscopy for the prediction of detailed protein composition and contents of protein genetic variants of individual milk of Simmental cows. *Journal of dairy science*, 94(12), 5776-5785.
30. Brosnan, T., & Sun, D. W. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. *Journal of food engineering*, 61(1), 3-16.
31. Brennan, D., Alderman, J., Sattler, L., O'Connor, B., & O'Mathuna, C. (2003). Issues in development of NIR micro spectrometer system for on-line process monitoring of milk product. *Measurement*, 33(1), 67-74.
32. Brescia, M. A., Monfreda, M., Buccolieri, A., & Carrino, C. (2005). Characterisation of the geographical origin of buffalo milk and mozzarella cheese by means of analytical and spectroscopic determinations. *Food Chemistry*, 89(1), 139-147.
33. Camps-Valls, G., & Bruzzone, L. (2005). Kernel-based methods for hyperspectral image classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(6), 1351-1362.
34. Cen, H., & He, Y. (2007). Theory and application of near infrared reflectance spectroscopy in determination of food quality. *Trends in Food Science & Technology*, 18(2), 72-83.
35. Cernadas, E., Carrión, P., Rodríguez, P. G., Muriel, E., & Antequera, T. (2005). Analyzing magnetic resonance images of Iberian pork loin to predict its sensorial characteristics. *Computer Vision and Image Understanding*, 98(2), 344-360.
36. Chao, K., Yang, C. C., Kim, M. S., & Chan, D. E. (2008). High throughput spectral imaging system for wholesomeness inspection of chicken. *Applied Engineering in Agriculture*, 24(4), 475-485.
37. Chandel, A. K., Khot, L. R., Osroosh, Y., & Peters, T. R. (2018). Thermal-RGB imager derived in-field apple surface temperature estimates for sunburn management. *Agricultural and Forest Meteorology*, 253, 132-140.
38. Chan, S. A., Lee, J. S., & Chang, Y. T. (2009). Colorimetric sensor array for qualitative water analysis. *Australian journal of chemistry*, 62(9), 1040-1046.
39. Charlebois, S., Schwab, A., Henn, R., & Huck, C. W. (2016). Food fraud: An exploratory study for measuring consumer perception towards mislabeled food products and influence on self-authentication intentions. *Trends in Food Science & Technology*, 50, 211-218

- 40.Chen, Q., Zhang, C., Zhao, J., & Ouyang, Q. (2013). Recent advances in emerging imaging techniques for non-destructive detection of food quality and safety. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 52, 261-274.
- 41.Cheng, W., Sun, D. W., Pu, H., & Wei, Q. (2018). Heterospectral two-dimensional correlation analysis with near-infrared hyperspectral imaging for monitoring oxidative damage of pork myofibrils during frozen storage. *Food Chemistry*, 248, 119-127.
- 42.Cho, B., Kim, M. S., Chao, K., Lawrence, K., Park, B., & Kim, K. (2009). Detection of Fecal Residue on Poultry Carcasses by Laser- Induced Fluorescence Imaging. *Journal of food science*, 74(3), E154-E159.
- 43.Cho, B. K., & Irudayaraj, J. M. K. (2003). Foreign object and internal disorder detection in food materials using noncontact ultrasound imaging. *Journal of Food Science*, 68(3), 967-974.
- 44.Christensen, K.A., Morris, M.D., 1998. Hyperspectral Raman microscopic imaging using Powell lens line illumination. *Appl. Spectrosc.* 52 (9), 1145–1147.
- 45.Clark, C. J., & MacFall, J. S. (2003). Quantitative magnetic resonance imaging of ‘Fuyu’persimmon fruit during development and ripening. *Magnetic Resonance Imaging*, 21(6), 679-685.
- 46.Coates, J. (2000). Interpretation of infrared spectra, a practical approach.
- 47.Cornillon, P., & Salim, L. C. (2000). Characterization of water mobility and distribution in low-and intermediate-moisture food systems. *Magnetic Resonance Imaging*, 18(3), 335-341.
- 48.Costa, C., Antonucci, F., Pallottino, F., Aguzzi, J., Sun, D. W., & Menesatti, P. (2011). Shape analysis of agricultural products: a review of recent research advances and potential application to computer vision. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 673-692.
- 49.Costa, N., Stelletta, C., Cannizzo, C., Giancesella, M., Lo Fiego, P., & Morgante, M. (2007). The use of thermography on the slaughter-line for the assessment of pork and raw ham quality. *Italian journal of animal science*, 6(sup1), 704-706.
- 50.Cozzolino, D., & Murray, I. (2012). A review on the application of infrared technologies to determine and monitor composition and other quality characteristics in raw fish, fish products, and seafood. *Applied Spectroscopy Reviews*, 47(3), 207-218.
- 51.Cruz, J., Bautista, M., Amigo, J. M., & Blanco, M. (2009). Nir-chemical imaging study of acetylsalicylic acid in commercial tablets. *Talanta*, 80(2), 473-478.
- 52.Cubero García, S. (2012). Design and implementation of new technologies based on artificial vision for the non-destructive inspection of the quality of fruit in the field and minimally processed (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- 53.Cui, Z. W., Sun, L. J., Chen, W., & Sun, D. W. (2008). Preparation of dry honey by microwave–vacuum drying. *Journal of Food Engineering*, 84(4), 582-590.
- 54.Curbani, L., Gelinski, J. M. L. N., & Borges, E. M. (2020). Determination of Ethanol in Beers Using a Flatbed Scanner and Automated Digital Image Analysis. *Food Analytical Methods*, 13(1), 249-259.
- 55.da Costa Filho, P. A., Cobuccio, L., Mainali, D., Rault, M., & Cavin, C. (2020). Rapid analysis of food raw materials adulteration using laser direct infrared spectroscopy and imaging. *Food Control*, 113, 107114.
- 56.Dai, Q., Cheng, J. H., Sun, D. W., Zhu, Z., & Pu, H. (2016). Prediction of total volatile basic nitrogen contents using wavelet features from visible/near-infrared hyperspectral images of prawn (*Metapenaeus ensis*). *Food chemistry*, 197, 257-265.
- 57.Danev, A., Bosakova-Ardenska, A., Boyanova, P., Panayotov, P., & Kostadinova-Georgieva, L. (2019, June). Cheese quality evaluation by image segmentation: Image segmentation algorithm for broken surface evaluation of Bulgarian white cheese in brine. In *Proceedings of the 20th International Conference on Computer Systems and Technologies* (pp. 161-168).
- 58.Dan-Qun, H., Meng-Meng, Y., Chang-Jun, H., Hui, Q., Miao-Miao, Z., Jia-Le, D., ... & Su-Yi, Z. (2011). Identification of different aromatic Chinese liquors by colorimetric array sensor technology. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 39(4), 516-520.
- 59.Davies, E. R. (2012). *Computer and machine vision: theory, algorithms, practicalities*. Academic Press.

60. Davis R, Mauer L (2010) Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy: a rapid tool for detection and analysis of foodborne pathogenic bacteria. *Curr Res Technol Educ Top Appl Microbiol Microbial Biotechnol* 2:1582–1594
61. De Boeck, E., Jacxsens, L., Bollaerts, M., & Vlerick, P. (2015). Food safety climate in food processing organizations: development and validation of a self-assessment tool. *Trends in Food Science & Technology*, 46(2), 242-251
62. Doshvarpassand, S., Wu, C., & Wang, X. (2019). An overview of corrosion defect characterization using active infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*, 96, 366-389.
63. Duncan, J. S., & Ayache, N. (2000). Medical image analysis: Progress over two decades and the challenges ahead. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 22(1), 85-106.
64. Dutta, M. K., Singh, A., & Ghosal, S. (2015). A computer vision based technique for identification of acrylamide in potato chips. *Computers and Electronics in Agriculture*, 119, 40-50.
65. Dutta, M. K., Issac, A., Minhas, N., & Sarkar, B. (2016). Image processing based method to assess fish quality and freshness. *Journal of Food Engineering*, 177, 50-58.
66. Du C.J., Sun D.-W. (2004a), Recent development in the applications of image processing techniques for food quality evaluation, *Trends in Food Science & Technology*, 15, pp. 230–249.
67. Du C.J., Sun D.-W. (2004b), Shape extraction and classification of pizza base using computer vision, *Journal of Food Engineering*, 64, pp. 489–496.
68. Du, C. J., & Sun, D. W. (2005). Pizza sauce spread classification using colour vision and support vector machines. *Journal of Food Engineering*, 66(2), 137-145.
69. Du, C. J., & Sun, D. W. (2006). Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review. *Journal of food engineering*, 72(1), 39-55.
70. Du, Z., Zeng, X., Li, X., Ding, X., Cao, J., & Jiang, W. (2020). Recent advances in imaging techniques for bruise detection in fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 133-141.
71. Dugo, G., La Pera, L., Pellicanó, T. M., Di Bella, G., & D'Imperio, M. (2005). Determination of some inorganic anions and heavy metals in DOC Golden and Amber Marsala wines: statistical study of the influence of ageing period, colour and sugar content. *Food chemistry*, 91(2), 355-363.
72. ElMasry, G., Barbin, D. F., Sun, D. W., & Allen, P. (2012a). Meat quality evaluation by hyperspectral imaging technique: an overview. *Critical reviews in food science and nutrition*, 52(8), 689-711.
73. Elmasry, G., Kamruzzaman, M., Sun, D. W., & Allen, P. (2012b). Principles and applications of hyperspectral imaging in quality evaluation of agro-food products: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 52(11), 999-1023.
74. ElMasry, G. M., & Nakauchi, S. (2016). Image analysis operations applied to hyperspectral images for non-invasive sensing of food quality—A comprehensive review. *Biosystems engineering*, 142, 53-82.
75. Esteller, M. S., Zancanaro, O., Palmeira, C. N. S., & da Silva Lannes, S. C. (2006). The effect of kefir addition on microstructure parameters and physical properties of porous white bread. *European Food Research and Technology*, 222(1), 26-31
76. Etzion, Y., Linker, R., Cogan, U., & Shmulevich, I. (2004). Determination of protein concentration in raw milk by mid-infrared Fourier transform infrared/attenuated total reflectance spectroscopy. *Journal of dairy science*, 87(9), 2779-2788.
77. Everstine, K., Spink, J., & Kennedy, S. (2013). Economically motivated adulteration (EMA) of food: common characteristics of EMA incidents. *Journal of food protection*, 76(4), 723-735.
78. Feng, Y. Z., ElMasry, G., Sun, D. W., Scannell, A. G., Walsh, D., & Morcy, N. (2013). Near-infrared hyperspectral imaging and partial least squares regression for rapid and reagentless determination of Enterobacteriaceae on chicken fillets. *Food Chemistry*, 138(2-3), 1829-1836.
79. Feng, Y. Z., & Sun, D. W. (2012). Application of hyperspectral imaging in food safety inspection and control: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 52(11), 1039-1058.
80. Feng, Y. Z., & Sun, D. W. (2013). Near-infrared hyperspectral imaging in tandem with partial least squares regression and genetic algorithm for non-destructive determination and visualization of Pseudomonas loads in chicken fillets. *Talanta*, 109, 74-83.

81. Finn, B., Harvey, L. M., & McNeil, B. (2006). Near- infrared spectroscopic monitoring of biomass, glucose, ethanol and protein content in a high cell density baker's yeast fed- batch bioprocess. *Yeast*, 23(7), 507-517.
82. Fito, P. J., Ortolá, M. D., De los Reyes, R., Fito, P., & De los Reyes, E. (2004). Control of citrus surface drying by image analysis of infrared thermography. *Journal of Food Engineering*, 61(3), 287-290.
83. Forsyth, D. A., & Ponce, J. (2003). A modern approach. *Computer vision: a modern approach*, 17, 21-48.
84. Fulladosa, E., Rubio-Celorio, M., Skytte, J. L., Muñoz, I., & Picouet, P. (2017). Laser-light backscattering response to water content and proteolysis in dry-cured ham. *Food control*, 77, 235-242.
85. Galed, G., Fernández-Valle, M. E., Martínez, A., & Heras, A. (2004). Application of MRI to monitor the process of ripening and decay in citrus treated with chitosan solutions. *Magnetic Resonance Imaging*, 22(1), 127-137.
86. Gan, T. H., Pallav, P., & Hutchins, D. A. (2006). Non-contact ultrasonic quality measurements of food products. *Journal of Food Engineering*, 77(2), 239-247.
87. Garcia-Allende, P. B., Conde, O. M., Mirapeix, J., Cobo, A., & Lopez-Higuera, J. M. (2008). Quality control of industrial processes by combining a hyperspectral sensor and Fisher's linear discriminant analysis. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 129(2), 977-984.
88. Gariepy, C., Amiot, J., & Nadai, S. (1989). Ante-mortem detection of PSE and DFD by infrared thermography of pigs before stunning. *Meat Science*, 25(1), 37-41.
89. Gendrin, C., Roggo, Y., & Collet, C. (2007). Content uniformity of pharmaceutical solid dosage forms by near infrared hyperspectral imaging: a feasibility study. *Talanta*, 73(4), 733-741.
90. Ghasemi-Varnamkhasti, M., & Forina, M. (2014). NIR spectroscopy coupled with multivariate computational tools for qualitative characterization of the aging of beer. *Computers and electronics in agriculture*, 100, 34-40.
91. Gila, A., Bejaoui, M. A., Beltrán, G., & Jiménez, A. (2020). Rapid method based on computer vision to determine the moisture and insoluble impurities content in virgin olive oils. *Food Control*, 113, 107210.
92. Goetz, A. F., Vane, G., Solomon, J. E., & Rock, B. N. (1985). Imaging spectrometry for earth remote sensing. *science*, 228(4704), 1147-1153.
93. Gökmen, V., & Sügüt, I. (2007). A non-contact computer vision based analysis of color in foods. *International Journal of Food Engineering*, 3(5).
94. Gonzalez, A., Garrigues, S., de la Guardia, M., & Armenta, S. (2011). The ways to the trace level analysis in infrared spectroscopy. *Analytical Methods*, 3(1), 43-52.
95. González-Martín, M. I., Hernández-Hierro, J. M., Revilla, I., Vivar-Quintana, A., González-Pérez, C., García, L. G., ... & Ortega, I. A. L. (2011). Differentiation of organic and non-organic ewe's cheeses using main mineral composition or near infrared spectroscopy coupled to chemometric tools: A comparative study. *Talanta*, 85(4), 1915-1919.
96. Gowen, A. A., O'Donnell, C. P., Cullen, P. J., Downey, G., & Frias, J. M. (2007). Hyperspectral imaging—an emerging process analytical tool for food quality and safety control. *Trends in food science & technology*, 18(12), 590-598.
97. Gowen, A. A., O'donnell, C. P., Taghizadeh, M., Cullen, P. J., Frias, J. M., & Downey, G. (2008). Hyperspectral imaging combined with principal component analysis for bruise damage detection on white mushrooms (*Agaricus bisporus*). *Journal of Chemometrics: A Journal of the Chemometrics Society*, 22(3- 4), 259-267.
98. Gowen, A. A., Taghizadeh, M., & O'Donnell, C. P. (2009). Identification of mushrooms subjected to freeze damage using hyperspectral imaging. *Journal of Food Engineering*, 93(1), 7-12.
99. Gowen, A. A., Tiwari, B. K., Cullen, P. J., McDonnell, K., & O'Donnell, C. P. (2010). Applications of thermal imaging in food quality and safety assessment. *Trends in food science & technology*, 21(4), 190-200.
100. Griffith, C. J. (2010). Do businesses get the food poisoning they deserve? The importance of food

safety culture. *British Food Journal*.

101. Guo, X. X., Hu, W., Liu, Y., Gu, D. C., Sun, S. Q., Xu, C. H., & Wang, X. C. (2015). Rapid analysis and quantification of fluorescent brighteners in wheat flour by Tri-step infrared spectroscopy and computer vision technology. *Journal of Molecular Structure*, 1099, 393-398.
102. Gupta, V. P. (2015). *Principles and applications of quantum chemistry*. Academic Press.
103. Guntzburger, Y., Théolier, J., Barrere, V., Peignier, I., Godefroy, S., & de Marcellis-Warin, N. (2020). Food industry perceptions and actions towards food fraud: Insights from a pan-Canadian study. *Food Control*, 113, 107182.
104. Gunasekaran, S. (1996). Computer vision technology for food quality assurance. *Trends in Food Science & Technology*, 7(8), 245-256.
105. Gunasekaran, S., & Ding, K. (1994). Using computer vision for food quality evaluation: Applications of immunobiosensors and bioelectronics in food sciences and quality control. *Food technology (Chicago)*, 48(6), 151-154.
106. Haas, J., & Mizaikoff, B. (2016). Advances in mid-infrared spectroscopy for chemical analysis. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 9, 45-68.
107. Hægglström, E., & Luukkala, M. (2001). Ultrasound detection and identification of foreign bodies in food products. *Food Control*, 12(1), 37-45.
108. Han, Y., Cui, S., Geng, Z., Chu, C., Chen, K., & Wang, Y. (2019). Food quality and safety risk assessment using a novel HMM method based on GRA. *Food Control*, 105, 180-189.
109. Haishi, T., Koizumi, H., Arai, T., Koizumi, M., & Kano, H. (2011). Rapid detection of infestation of apple fruits by the peach fruit moth, *Carposina sasakii* Matsumura, larvae using a 0.2-T dedicated magnetic resonance imaging apparatus. *Applied magnetic resonance*, 41(1), 1-18.
110. Hashim, N., Pflanz, M., Regen, C., Janius, R. B., Rahman, R. A., Osman, A., ... & Zude, M. (2013). An approach for monitoring the chilling injury appearance in bananas by means of backscattering imaging. *Journal of Food Engineering*, 116(1), 28-36.
111. Hashim, N., Janius, R. B., Rahman, R. A., Osman, A., Shitan, M., & Zude, M. (2014). Changes of backscattering parameters during chilling injury in bananas. *Journal of Engineering Science and Technology*, 9(3), 314-325.
112. He, D. J., Yang, Q., Xue, S. P., & Geng, N. (1998). Computer vision for colour sorting of fresh fruits. *Transactions of the Chinese society of agricultural engineering*, 14(3), 202-205.
113. He, H. J., & Sun, D. W. (2015). Microbial evaluation of raw and processed food products by Visible/Infrared, Raman and Fluorescence spectroscopy. *Trends in food science & technology*, 46(2), 199-210.
114. He, H. J., Wu, D., & Sun, D. W. (2013). Non-destructive and rapid analysis of moisture distribution in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets using visible and near-infrared hyperspectral imaging. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 18, 237-245.
115. Hills, B. P., & Remigereau, B. (1997). NMR studies of changes in subcellular water compartmentation in parenchyma apple tissue during drying and freezing. *International journal of food science & technology*, 32(1), 51-61.
116. Hindmarsh, J. P., Buckley, C., Russell, A. B., Chen, X. D., Gladden, L. F., Wilson, D. I., & Johns, M. L. (2004). Imaging droplet freezing using MRI. *Chemical engineering science*, 59(10), 2113-2122.
117. Honeychurch, K. C., & Hart, J. P. (2003). Screen-printed electrochemical sensors for monitoring metal pollutants. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 22(7), 456-469.
118. Hou, C. J., Zhang, C., & Suslick, K. S. (2005, August). Analysis and evaluation of teas by colorimetric sensor array in both liquid and gas phases. In *ABSTRACTS OF PAPERS OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY* (Vol. 230, pp. U261-U262). 1155 16TH ST, NW, WASHINGTON, DC 20036 USA: AMER CHEMICAL SOC.
119. Huang, H., Liu, L., & Ngadi, M. O. (2014). Recent developments in hyperspectral imaging for assessment of food quality and safety. *Sensors*, 14(4), 7248-7276.
120. Huang, H., Yu, H., Xu, H., & Ying, Y. (2008). Near infrared spectroscopy for on/in-line monitoring of

- quality in foods and beverages: A review. *Journal of food engineering*, 87(3), 303-313.
121. Huang, M., Wan, X., Zhang, M., & Zhu, Q. (2013). Detection of insect-damaged vegetable soybeans using hyperspectral transmittance image. *Journal of Food Engineering*, 116(1), 45-49.
122. Huang, X., Xin, J., & Zhao, J. (2011). A novel technique for rapid evaluation of fish freshness using colorimetric sensor array. *Journal of Food Engineering*, 105(4), 632-637.
123. Hu, K., Liu, J., Li, B., Liu, L., Gharibzahedi, S. M. T., Su, Y., ... & Guo, Y. (2019). Global research trends in food safety in agriculture and industry from 1991 to 2018: A data-driven analysis. *Trends in Food Science & Technology*, 85, 262-276.
124. Hurlbert, A. (2007). Colour constancy. *Current Biology*, 17(21), R906-R907
125. Hunter, R. (1948, January). Accuracy, precision, and stability of new photoelectric color-difference meter. In *Journal of the Optical Society of America* (Vol. 38, No. 12, pp. 1094-1094). CIRCULATION FULFILLMENT DIV, 500 SUNNYSIDE BLVD, WOODBURY, NY 11797-2999: AMER INST PHYSICS.
126. Hutchings, J. B. (1999). Food colour and appearance in perspective. In *Food colour and appearance* (pp. 1-29). Springer, Boston, MA.
127. Iqbal, A., Valous, N. A., Mendoza, F., Sun, D. W., & Allen, P. (2010). Classification of pre-sliced pork and Turkey ham qualities based on image colour and textural features and their relationships with consumer responses. *Meat Science*, 84(3), 455-465.
128. Ishimwe, R., Abutaleb, K., & Ahmed, F. (2014). Applications of thermal imaging in agriculture—A review. *Advances in remote Sensing*, 3(03), 128.
129. Jackman, P., Sun, D. W., & Allen, P. (2009). Automatic segmentation of beef longissimus dorsi muscle and marbling by an adaptable algorithm. *Meat Science*, 83(2), 187-194.
130. Jackman, P., Sun, D. W., Allen, P., Valous, N. A., Mendoza, F., & Ward, P. (2010). Identification of important image features for pork and turkey ham classification using colour and wavelet texture features and genetic selection. *Meat science*, 84(4), 711-717.
131. Jackman, P., Sun, D. W., & Allen, P. (2011). Recent advances in the use of computer vision technology in the quality assessment of fresh meats. *Trends in Food Science & Technology*, 22(4), 185-197.
132. Jahanbakhshi, A., Abbaspour-Gilandeh, Y., Heidarbeigi, K., & Momeny, M. (2021). Detection of fraud in ginger powder using an automatic sorting system based on image processing technique and deep learning. *Computers in Biology and Medicine*, 104764.
133. Jamieson, V. (2002). Physics raises food standards. *Physics World*, 1, 21–22.
134. Javidnia, K., Parish, M., Karimi, S., & Hemmateenejad, B. (2013). Discrimination of edible oils and fats by combination of multivariate pattern recognition and FT-IR spectroscopy: A comparative study between different modeling methods. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 104, 175-181.
135. Jespersen, L., MacLaurin, T., & Vlerick, P. (2017). Development and validation of a scale to capture social desirability in food safety culture. *Food Control*, 82, 42-47
136. Jespersen, L., & Wallace, C. A. (2017). Triangulation and the importance of establishing valid methods for food safety culture evaluation. *Food Research International*, 100, 244-253.
137. Jin, G., Wang, Y., Li, L., Shen, S., Deng, W. W., Zhang, Z., & Ning, J. (2020). Intelligent evaluation of black tea fermentation degree by FT-NIR and computer vision based on data fusion strategy. *Lwt*, 125, 109216.
138. Joshi, P. (2004). Colour measurement of foods by colour reflectance. In “Colour in food - Improving quality” (Ed. MacDougall, D. B.), Woodhead Publishing Limited, England, pp. 81-114.
139. Jun, W., Kim, M. S., Lee, K., Millner, P., & Chao, K. (2009). Assessment of bacterial biofilm on stainless steel by hyperspectral fluorescence imaging. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 3(1), 41-48.
140. Kalaj, Y. R., Mollazade, K., Herppich, W., Regen, C., & Geyer, M. (2016). Changes of backscattering imaging parameter during plum fruit development on the tree and during storage. *Scientia Horticulturae*, 202, 63-69.

141. Kamruzzaman, M., ElMasry, G., Sun, D. W., & Allen, P. (2012). Non-destructive prediction and visualization of chemical composition in lamb meat using NIR hyperspectral imaging and multivariate regression. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 16, 218-226.
142. Kamruzzaman, M., ElMasry, G., Sun, D. W., & Allen, P. (2013). Non-destructive assessment of instrumental and sensory tenderness of lamb meat using NIR hyperspectral imaging. *Food Chemistry*, 141(1), 389-396.
143. Karoui, R., Mazerolles, G., Bosset, J. O., De Baerdemaeker, J., & Dufour, E. (2007). Utilisation of mid-infrared spectroscopy for determination of the geographic origin of Gruyère PDO and L'Etivaz PDO Swiss cheeses. *Food chemistry*, 105(2), 847-854.
144. Kawasaki, M., Kawamura, S., Tsukahara, M., Morita, S., Komiya, M., & Natsuga, M. (2008). Near-infrared spectroscopic sensing system for on-line milk quality assessment in a milking robot. *Computers and electronics in agriculture*, 63(1), 22-27.
145. Kays, S. J. (1991). Postharvest physiology and handling of perishable plant products. Van Nostrand Reinhold Inc..
146. Kays, S. J. (1999). Preharvest factors affecting appearance. *Postharvest biology and technology*, 15(3), 233-247.
147. Kiani, H., Zhang, Z., Delgado, A., & Sun, D. W. (2011). Ultrasound assisted nucleation of some liquid and solid model foods during freezing. *Food Research International*, 44(9), 2915-2921.
148. Kim, I. N. T. A. E. K., Kim, M. S., Chen, Y. R., & Kong, S. G. (2004). Detection of skin tumors on chicken carcasses using hyperspectral fluorescence imaging. *Transactions of the ASAE*, 47(5), 1785.
149. Kim, S., & Schatzki, T. F. (2000). Apple watercore sorting using X-ray imagery: I. Algorithm development. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1695-1702
150. Kim, M. S., Lefcourt, A. M., Chen, Y. R., & Tao, Y. (2005). Automated detection of fecal contamination of apples based on multispectral fluorescence image fusion. *Journal of food engineering*, 71(1), 85-91.
151. KKa, P., Ab, K., Ya, K., LMc, B., & DKa, S. (2015). Image processing tools and techniques used in computer vision for quality assessment of food products: a review. *International Journal*, 1, 01-16.
152. Kokawa, M., Fujita, K., Sugiyama, J., Tsuta, M., Shibata, M., Araki, T., & Nabetani, H. (2011). Visualization of gluten and starch distributions in dough by fluorescence fingerprint imaging. *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 75(11), 2112-2118.
153. Kokawa, M., Fujita, K., Sugiyama, J., Tsuta, M., Shibata, M., Araki, T., & Nabetani, H. (2012). Quantification of the distributions of gluten, starch and air bubbles in dough at different mixing stages by fluorescence fingerprint imaging. *Journal of Cereal Science*, 55(1), 15-21.
154. Kraggerud, H., Wold, J. P., Høy, M., & Abrahamsen, R. K. (2009). X-ray images for the control of eye formation in cheese. *International journal of dairy technology*, 62(2), 147-153.
155. Lara, M. A., Lleó, L., Diezma-Iglesias, B., Roger, J. M., & Ruiz-Altisent, M. (2013). Monitoring spinach shelf-life with hyperspectral image through packaging films. *Journal of Food Engineering*, 119(2), 353-361.
156. Leemans, V., Magein, H., & Destain, M. F. (1998). Defects segmentation on 'Golden Delicious' apples by using colour machine vision. *Computers and electronics in agriculture*, 20(2), 117-130.
157. Lee, W. H., & Lee, W. (2014). Food inspection system using terahertz imaging. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(5), 1211-1214.
158. Lefcourt, A. M., Wiederoder, M. S., Liu, N. T., Kim, M. S., & Lo, Y. M. (2013). Development of a portable hyperspectral imaging system for monitoring the efficacy of sanitation procedures in food processing facilities. *Journal of Food Engineering*, 117(1), 59-66.
159. Li, Q., & Wang, M. (1999, December). Study on high-speed apple surface defect segment algorithm based on computer vision. In *Proceedings of International Conference on Agricultural Engineering (99-ICAE)*, Beijing, People's Republic of China (pp. 14-17).
160. Li, B., XU, D., & Feng, S. H. (2009). Illumination estimation based on color invariant. *Chinese Journal of Electronics*, 18(3), 431-434.

- 161.Liu, D., Sun, D. W., & Zeng, X. A. (2014). Recent advances in wavelength selection techniques for hyperspectral image processing in the food industry. *Food and Bioprocess Technology*, 7(2), 307-323.
- 162.Liu, Y., Chen, Y. R., Kim, M. S., Chan, D. E., & Lefcourt, A. M. (2007). Development of simple algorithms for the detection of fecal contaminants on apples from visible/near infrared hyperspectral reflectance imaging. *Journal of Food Engineering*, 81(2), 412-418.
- 163.Liu, Y., Pu, H., & Sun, D. W. (2017). Hyperspectral imaging technique for evaluating food quality and safety during various processes: A review of recent applications. *Trends in food science & technology*, 69, 25-35.
- 164.Lohumi, S., Lee, S., Lee, H., & Cho, B. K. (2015). A review of vibrational spectroscopic techniques for the detection of food authenticity and adulteration. *Trends in Food Science & Technology*, 46(1), 85-98.
- 165.Lorente, D., Aleixos, N., Gómez-Sanchis, J. U. A. N., Cubero, S., García-Navarrete, O. L., & Blasco, J. (2012). Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment. *Food and Bioprocess Technology*, 5(4), 1121-1142.
- 166.Lorente, D., Zude, M., Regen, C., Palou, L., Gómez-Sanchis, J., & Blasco, J. (2013). Early decay detection in citrus fruit using laser-light backscattering imaging. *Postharvest biology and technology*, 86, 424-430.
- 167.Lucas, A., Andueza, D., Rock, E., & Martin, B. (2008). Prediction of dry matter, fat, pH, vitamins, minerals, carotenoids, total antioxidant capacity, and color in fresh and freeze-dried cheeses by visible-near-infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(16), 6801-6808.
- 168.Lukinac, J., Jukić, M., Mastanjević, K., & Lučan, M. (2018). Application of computer vision and image analysis method in cheese-quality evaluation: a review. *Ukrainian food journal*, (7, Issue 2), 192-214.
- 169.Luna, A. S., da Silva, A. P., Pinho, J. S., Ferré, J., & Boqué, R. (2015). A novel approach to discriminate transgenic from non-transgenic soybean oil using FT-MIR and chemometrics. *Food Research International*, 67, 206-211.
- 170.Luning, P. A., & Marcelis, W. J. (2006). A techno-managerial approach in food quality management research. *Trends in Food Science & Technology*, 17(7), 378-385.
- 171.Luning, P. A., & Marcelis, W. J. (2007). A conceptual model of food quality management functions based on a techno-managerial approach. *Trends in food science & technology*, 18(3), 159-166.
- 172.Luning, P. A., Bango, L., Kussaga, J., Rovira, J., & Marcelis, W. J. (2008). Comprehensive analysis and differentiated assessment of food safety control systems: a diagnostic instrument. *Trends in Food Science & Technology*, 19(10), 522-534.
- 173.Luning, P. A., & Marcelis, W. J. (2009). A food quality management research methodology integrating technological and managerial theories. *Trends in food science & technology*, 20(1), 35-44.
- 174.Luo, X. G., Liu, P., Hou, C. J., Huo, D. Q., Dong, J. L., Fa, H. B., & Yang, M. (2010). A novel chemical detector using colorimetric sensor array and pattern recognition methods for the concentration analysis of NH₃. *Review of Scientific Instruments*, 81(10), 105113.
- 175.Lynch, M., Painter, J., Woodruff, R., & Braden, C. (2006). Surveillance for foodborne-disease outbreaks: United States, 1998-2002.
- 176.Mahesh, S., Jayas, D. S., Paliwal, J., & White, N. D. G. (2015). Hyperspectral imaging to classify and monitor quality of agricultural materials. *Journal of Stored Products Research*, 61, 17-26.
- 177.Maftoonazad, N., Karimi, Y., Ramaswamy, H. S., & Prasher, S. O. (2011). Artificial neural network modeling of hyperspectral radiometric data for quality changes associated with avocados during storage. *Journal of Food Processing and Preservation*, 35(4), 432-446.
- 178.Mahesh, S., Jayas, D. S., Paliwal, J., & White, N. D. G. (2015). Comparison of partial least squares regression (PLSR) and principal components regression (PCR) methods for protein and hardness predictions using the near-infrared (NIR) hyperspectral images of bulk samples of Canadian wheat. *Food and bioprocess technology*, 8(1), 31-40.
- 179.Mahdjoub, R., Chouvinc, P., Seurin, M. J., Andrieu, J., & Briguet, A. (2006). Sucrose solution freezing studied by magnetic resonance imaging. *Carbohydrate research*, 341(4), 492-498.
- 180.Manickavasagan, A., Jayas, D. S., White, N. D. G., & Jian, F. (2006). Thermal imaging of a stored

- grain silo to detect a hot spot. *Applied Engineering in Agriculture*, 22(6), 891-897.
181. Manickavasagan, A., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2008). Thermal imaging to detect infestation by *Cryptolestes ferrugineus* inside wheat kernels. *Journal of Stored Products Research*, 44(2), 186-192.
 182. Manning, L., & Soon, J. M. (2014). Developing systems to control food adulteration. *Food Policy*, 49, 23-32.
 183. Manning, L., & Soon, J. M. (2016). Food safety, food fraud, and food defense: a fast evolving literature. *Journal of food science*, 81(4), R823-R834.
 184. Manoj, D., Auddy, I., Nimbkar, S., Chittibabu, S., & Shanmugasundaram, S. (2020). Development of Screen-Printed Electrode Biosensor for Rapid Determination of Triglyceride Content in Coconut Milk. *International Journal of Food Science*, 2020.
 185. Manoj, D., Shanmugasundaram, S., & Anandharamakrishnan, C. (2021). Nanosensing and nanobiosensing: Concepts, methods, and applications for quality evaluation of liquid foods. *Food Control*, 108017.
 186. Markwort, L., Kip, B., Dasilva, E., Roussel, B., 1995. Raman imaging of heterogeneous polymers: a comparison of global versus point illumination. *Appl. Spectrosc.* 49 (10), 1411–1430.
 187. McCaig, T. N. (2002). Extending the use of visible/near-infrared reflectance spectrophotometers to measure colour of food and agricultural products. *Food Research International*, 35(8), 731-736.
 188. McCreery, R.L., 2000. *Raman Spectroscopy for Chemical Analysis*. John Wiley and Sons, New York, NY, USA.
 189. Mc Donald, K., & Sun, D. W. (2001). Effect of evacuation rate on the vacuum cooling process of a cooked beef product. *Journal of Food Engineering*, 48(3), 195-202.
 190. Mendoza, F., Dejmek, P., & Aguilera, J. M. (2006). Calibrated color measurements of agricultural foods using image analysis. *Postharvest Biology and Technology*, 41(3), 285-295.
 191. Mendoza, F., Valous, N. A., Allen, P., Kenny, T. A., Ward, P., & Sun, D. W. (2009). Analysis and classification of commercial ham slice images using directional fractal dimension features. *Meat Science*, 81(2), 313-320.
 192. Meng, Q., Murray, S. C., Mahan, A., Collison, A., Yang, L., & Awika, J. (2015). Rapid Estimation of Phenolic Content in Colored Maize by Near- Infrared Reflectance Spectroscopy and Its Use in Breeding. *Crop Science*, 55(5), 2234-2243.
 193. Meléndez- Martínez, A. J., Vicario, I. M., & Heredia, F. J. (2005). Instrumental measurement of orange juice colour: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85(6), 894-901.
 194. Menesatti, P., Angelini, C., Pallottino, F., Antonucci, F., Aguzzi, J., & Costa, C. (2012). RGB color calibration for quantitative image analysis: The “3D Thin-Plate Spline” warping approach. *Sensors*, 12(6), 7063-7079.
 195. Milovanovic, B., Tomovic, V., Djekic, I., Miocinovic, J., Solowiej, B. G., Lorenzo, J. M., ... & Tomasevic, I. (2021). Colour assessment of milk and milk products using computer vision system and colorimeter. *International Dairy Journal*, 120, 105084.
 196. Mo, C., Kim, G., Kim, M. S., Lim, J., Lee, K., Lee, W. H., & Cho, B. K. (2017). On-line fresh-cut lettuce quality measurement system using hyperspectral imaging. *Biosystems engineering*, 156, 38-50.
 197. Moeslund, T. B. (2012). *Introduction to video and image processing: Building real systems and applications*. Springer Science & Business Media.
 198. Mollazade, K., Omid, M., Tab, F. A., Kalaj, Y. R., Mohtasebi, S. S., & Zude, M. (2013). Analysis of texture-based features for predicting mechanical properties of horticultural products by laser light backscattering imaging. *Computers and electronics in agriculture*, 98, 34-45.
 199. Mollazade, K., & Arefi, A. (2017). LightScatter: A comprehensive software package for non-destructive monitoring of horti-food products by monochromatic imaging-based spatially-resolved light scattering technology. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 597-606.
 200. Moltó, E., Blasco, J., & Gómez-Sanchís, J. (2010). Analysis of hyperspectral images of citrus fruits. In *Hyperspectral imaging for food quality analysis and control* (pp. 321-348). Academic Press.

201. Moore, J. C., Spink, J., & Lipp, M. (2012). Development and application of a database of food ingredient fraud and economically motivated adulteration from 1980 to 2010. *Journal of food science*, 77(4), R118-R126.
202. Moreda, G. P., Ortiz-Cañavate, J., García-Ramos, F. J., & Ruiz-Altisent, M. (2009). Non-destructive technologies for fruit and vegetable size determination—a review. *Journal of Food Engineering*, 92(2), 119-136.
203. Morris, H.R., Hoyt, C.C., Treado, P.J., 1994. Imaging spectrometers for fluorescence and Raman microscopy: acousto-optic and liquid-crystal tunable filters. *Appl. Spectrosc.* 48 (7), 857–866.
204. Morsy, N., & Sun, D. W. (2013). Robust linear and non-linear models of NIR spectroscopy for detection and quantification of adulterants in fresh and frozen-thawed minced beef. *Meat science*, 93(2), 292-302.
205. Motarjemi, Y., & Käferstein, F. (1999). Food safety, Hazard Analysis and Critical Control Point and the increase in foodborne diseases: a paradox?. *Food Control*, 10(4-5), 325-333.
206. Motarjemi, Y., & Mortimore, S. (2005). Industry's need and expectations to meet food safety, 5th International Meeting: Noordwijk Food Safety and HACCP Forum 9–10 December 2002. *Food control*, 16(6), 523-529.
207. Mousavi, R., Miri, T., Cox, P. W., & Fryer, P. J. (2005). A novel technique for ice crystal visualization in frozen solids using X- ray micro- computed tomography. *Journal of Food Science*, 70(7), e437-e442.
208. Murugaboopathi, G., Parthasarathy, V., Chellaram, C., Anand, T. P., & Vinurajkumar, S. (2013). Applications of biosensors in food industry. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 10(2), 711-714.
209. Nagata, M., Tallada, J. G., & Kobayashi, T. (2006). Bruise detection using NIR hyperspectral imaging for strawberry (*Fragaria× ananassa* Duch.). *Environmental Control in Biology*, 44(2), 133-142.
210. Nakariyakul, S., & Casasent, D. P. (2011). Classification of internally damaged almond nuts using hyperspectral imagery. *Journal of Food Engineering*, 103(1), 62-67.
211. Nalla, L., Krishnaveni, G. & Ramadevi, P. (2018). Quality detection of rice using image processing *Indian J.Sci.Res.* 17(2): 284-286.
212. Novini, A. R. (1995). The latest in vision technology in today's food and beverage container manufacturing industry. TECHNICAL PAPERS-SOCIETY OF MANUFACTURING ENGINEERS- ALL SERIES-
213. Omwange, K. A., Saito, Y., Zichen, H., Khaliduzzaman, A., Kuramoto, M., Ogawa, Y., ... & Suzuki, T. (2021). Evaluating Japanese dace (*Tribolodon hakonensis*) fish freshness during storage using multispectral images from visible and UV excited fluorescence. *LWT*, 112207.
214. Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. (2018). Combination of computer vision and backscattering imaging for predicting the moisture content and colour changes of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) during drying. *Computers and electronics in agriculture*, 150, 178-187.
215. Otero, L., & Préstamo, G. (2009). Effects of pressure processing on strawberry studied by nuclear magnetic resonance. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(4), 434-440.
216. Ouyang, Q., Zhao, J., Chen, Q., & Lin, H. (2013). Classification of rice wine according to different marked ages using a novel artificial olfactory technique based on colorimetric sensor array. *Food chemistry*, 138(2-3), 1320-1324.
217. Pallav, P., Hutchins, D. A., & Gan, T. (2009). Air-coupled ultrasonic evaluation of food materials. *Ultrasonics*, 49(2), 244-253.
218. Pallottino, F., Menesatti, P., Costa, C., Paglia, G., De Salvador, F. R., & Lolletti, D. (2010). Image analysis techniques for automated hazelnut peeling determination. *Food and Bioprocess Technology*, 3(1), 155-159.
219. Papadakis, S. E., Abdul-Malek, S., Kamdem, R. E., & Yam, K. L. (2000). A versatile and inexpensive technique for measuring color of foods. *Food technology (Chicago)*, 54(12), 48-51.
220. Papademas, P., & Bintsis, T. (2010). Food safety management systems (FSMS) in the dairy industry: A review. *International journal of dairy technology*, 63(4), 489-503.

221. Patel, K. K., Kar, A., Jha, S. N., & Khan, M. A. (2012). Machine vision system: a tool for quality inspection of food and agricultural products. *Journal of food science and technology*, 49(2), 123-141.
222. Pearson, T. C., & Slaughter, D. C. (1996). Machine vision detection of early split pistachio nuts. *Transactions of the ASAE*, 39(3), 1203-1207.
223. Pelletier, M.J., 2003. Quantitative analysis using Raman spectrometry. *Appl. Spectrosc.* 57 (1), 20A–42A.
224. Pelton, J. T., & McLean, L. R. (2000). Spectroscopic methods for analysis of protein secondary structure. *Analytical biochemistry*, 277(2), 167-176.
225. Peng, Y., & Lu, R. (2008). Analysis of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*, 48(1), 52-62.
226. Peterson, C. (2001). How it works: the charged-coupled device, or CCD. *Journal of young investigators*, 3(1).
227. Povey, M. J. W., & McClements, D. J. (1988). Ultrasonics in food engineering. Part I: Introduction and experimental methods. *Journal of Food Engineering*, 8(4), 217-245.
228. Powell, D. A., Jacob, C. J., & Chapman, B. J. (2011). Enhancing food safety culture to reduce rates of foodborne illness. *Food control*, 22(6), 817-822.
229. Pradana-López, S., Pérez-Calabuig, A. M., Cancilla, J. C., Otero, L., & Torrecilla, J. S. (2022). Single-digit ppm quantification of melamine in powdered milk driven by computer vision. *Food Control*, 131, 108424.
230. Qiao, J., Ngadi, M. O., Wang, N., Gariépy, C., & Prasher, S. O. (2007). Pork quality and marbling level assessment using a hyperspectral imaging system. *Journal of Food Engineering*, 83(1), 10-16.
231. Qiao, T., Ren, J., Craigie, C., Zabalza, J., Maltin, C., & Marshall, S. (2015). Quantitative prediction of beef quality using visible and NIR spectroscopy with large data samples under industry conditions. *Journal of Applied Spectroscopy*, 82(1), 137-144.
232. Qin, J., Kim, M.S., Chao, K., Cho, B., 2017. Raman chemical imaging technology for food and agricultural applications. *J. Biosyst. Eng.* 42 (3), 170–189.
233. Qin, H., Huo, D., Zhang, L., Yang, L., Zhang, S., Yang, M., ... & Hou, C. (2012). Colorimetric artificial nose for identification of Chinese liquor with different geographic origins. *Food Research International*, 45(1), 45-51.
234. Qin, J., Chao, K., & Kim, M. S. (2011). Investigation of Raman chemical imaging for detection of lycopene changes in tomatoes during postharvest ripening. *Journal of food engineering*, 107(3-4), 277-288.
235. Qin, J., Chao, K., Kim, M. S., Lu, R., & Burks, T. F. (2013). Hyperspectral and multispectral imaging for evaluating food safety and quality. *Journal of Food Engineering*, 118(2), 157-171.
236. Qin, J., Kim, M. S., Chao, K., Dhakal, S., Cho, B. K., Lohumi, S., ... & Huang, M. (2019). Advances in Raman spectroscopy and imaging techniques for quality and safety inspection of horticultural products. *Postharvest Biology and Technology*, 149, 101-117.
237. Qing, Z., Ji, B., & Zude, M. (2008). Non-destructive analyses of apple quality parameters by means of laser-induced light backscattering imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 48(2), 215-222.
238. Rahkonen, J., & Jokela, H. (2003). Infrared radiometry for measuring plant leaf temperature during thermal weed control treatment. *Biosystems engineering*, 86(3), 257-266.
239. Rahman, M. F., Abdullah Iqbal, M., Hashem, A., & Adedeji, A. A. (2020). Quality Assessment of Beef Using Computer Vision Technology. *Food Science of Animal Resources*, 40(6), 896.
240. Rahmelow, K. I. M., & Hubner, W. (1997). Infrared spectroscopy in aqueous solution: Difficulties and accuracy of water subtraction. *Applied Spectroscopy*, 51(2), 160-170.
241. Rakow, N. A., & Suslick, K. S. (2000). A colorimetric sensor array for odour visualization. *Nature*, 406(6797), 710-713.
242. Robb, R. A. (1985). *Three Dimensional Biomedical Imaging*, Volumes I and II.
243. Ruiz-Altisent, M., Ruiz-Garcia, L., Moreda, G. P., Lu, R., Hernandez-Sanchez, N., Correa, E. C., ... & García-Ramos, J. (2010). Sensors for product characterization and quality of specialty crops—A

- review. *Computers and Electronics in agriculture*, 74(2), 176-194
- 244.Sahar, A., & Dufour, É. (2014). Use of Fourier transform-infrared spectroscopy to predict spoilage bacteria on aerobically stored chicken breast fillets. *LWT-Food Science and Technology*, 56(2), 315-320.
- 245.Saldaña, E., Siche, R., Luján, M., & Quevedo, R. (2013). Computer vision applied to the inspection and quality control of fruits and vegetables. *Brazilian Journal of Food Technology*, 16(4), 254-272.
- 246.Sanchez, P. D. C., Hashim, N., Shamsudin, R., & Nor, M. Z. M. (2020). Applications of imaging and spectroscopy techniques for non-destructive quality evaluation of potatoes and sweet potatoes: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 96, 208-221.
- 247.Scallan, E., Hoekstra, R. M., Angulo, F. J., Tauxe, R. V., Widdowson, M., Roy, S. L., et al. (2011). Foodborne illness acquired in the United States-major pathogens. *Emerging Infectious Diseases*, 17, 7-15.
- 248.Sengar, N., Dutta, M. K., & Sarkar, B. (2017). Computer vision based technique for identification of fish quality after pesticide exposure. *International journal of food properties*, 20(sup2), 2192-2206.
- 249.Shaarani, S. M., Cardenas-Blanco, A., Amin, M. G., Soon, N. G., & Hall, L. D. (2010). Monitoring development and ripeness of oil palm fruit (*Elaeis guineensis*) by MRI and bulk NMR. *International Journal of Agriculture and Biology*, 12(1), 101-105.
- 250.Shah, N. N., Rooney, P. K., Ozguler, A., Morris, S. A., & O'Brien Jr, W. D. (2001). A real-time approach to detect seal defects in food packages using ultrasonic imaging. *Journal of food protection*, 64(9), 1392-1398.
- 251.Shahin, M. A., Tollner, E. W., McClendon, R. W., & Arabnia, H. R. (2002). Apple classification based on surface bruises using image processing and neural networks. *Transactions of the ASAE*, 45(5), 1619.
- 252.Shears, P. (2010). Food fraud—a current issue but an old problem. *British Food Journal*.
- 253.Shishkin, Y. L., Dmitrienko, S. G., Medvedeva, O. M., Badakova, S. A., & Pyatkova, L. N. (2004). Use of a scanner and digital image-processing software for the quantification of adsorbed substances. *Journal of Analytical chemistry*, 59(2), 102-106.
- 254.Sinanoglou, V. J., Cavouras, D., Xenogiannopoulos, D., Proestos, C., & Zoumpoulakis, P. (2018). Quality assessment of pork and turkey hams using FT-IR spectroscopy, colorimetric, and image analysis. *Foods*, 7(9), 152.
- 255.Sivapalasingam, S., Friedman, C. R., Cohen, L., & Tauxe, R. V. (2004). Fresh produce: a growing cause of outbreaks of foodborne illness in the United States, 1973 through 1997. *Journal of food protection*, 67(10), 2342-2353.
- 256.Smith, W.E., Dent, G., 2005. *Modern Raman Spectroscopy: A Practical Approach*. John Wiley and Sons, Chichester, West Sussex, UK.
- 257.Song, W., Song, Z., Vincent, J., Wang, H., & Wang, Z. (2020). Quantification of extra virgin olive oil adulteration using smartphone videos. *Talanta*, 216, 120920.
- 258.Sonka, M., Hlavac, V., & Boyle, R. (1998). *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*, 2d edition, PWS Publ. at Brooks-Cole Publ. Co, ITP, Pacific Grove, CA.
- 259.Spink, J., & Moyer, D. C. (2011). Defining the public health threat of food fraud. *Journal of food science*, 76(9), R157-R163.
- 260.Srey, S., Jahid, I. K., & Ha, S. D. (2013). Biofilm formation in food industries: a food safety concern. *Food control*, 31(2), 572-585.
- 261.Steinmetz, V., Roger, J. M., Molto, E., & Blasco, J. (1999). On-line fusion of colour camera and spectrophotometer for sugar content prediction of apples. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 73(2), 207-216.
- 262.Still, C., Powell, R., Aubrecht, D., Kim, Y., Helliker, B., Roberts, D., ... & Goulden, M. (2019). Thermal imaging in plant and ecosystem ecology: applications and challenges. *Ecosphere*, 10(6).
- 263.Storbeck, F., & Daan, B. (2001). Fish species recognition using computer vision and a neural network. *Fisheries Research*, 51(1), 11-15.
- 264.Stuart, B. (2021). Infrared spectroscopy. *Analytical Techniques in Forensic Science*, 145-160.

- 265.Su, Q., Kondo, N., Li, M., Sun, H., Al Riza, D. F., & Habaragamuwa, H. (2018). Potato quality grading based on machine vision and 3D shape analysis. *Computers and electronics in agriculture*, 152, 261-268.
- 266.Su, W. H., & Sun, D. W. (2018). Advanced analysis of roots and tubers by hyperspectral techniques. *Advances in food and nutrition research*, 87, 255-303.
- 267.Su, W. H., & Sun, D. W. (2019). Mid-infrared (MIR) spectroscopy for quality analysis of liquid foods. *Food Engineering Reviews*, 11(3), 142-158.
- 268.Su, W. H., Bakalis, S., & Sun, D. W. (2019). Chemometrics in tandem with near infrared (NIR) hyperspectral imaging and Fourier transform mid infrared (FT-MIR) microspectroscopy for variety identification and cooking loss determination of sweet potato. *Biosystems Engineering*, 180, 70-86.
- 269.Sun, D. W., & Woods, J. L. (1994). Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers. *Transactions of the ASAE*, 37(6), 1919-1926.
- 270.Sun, D. W. (1997). Solar powered combined ejector-vapour compression cycle for air conditioning and refrigeration. *Energy Conversion and Management*, 38(5), 479-491.
- 271.Sun, D.-W. (2000). Inspecting pizza topping percentage and distribution by a computer vision method.
- 272.SUN, D. W. (2004). Applications of computer vision in the food industry. *Journal of Food Engineering*, 61(1).
- 273.Sun, D. W. (Ed.). (2010). *Hyperspectral imaging for food quality analysis and control*. Elsevier.
- 274.Sun, D. W., & Brosnan, T. (2003). Pizza quality evaluation using computer vision—Part 2: Pizza topping analysis. *Journal of Food Engineering*, 57(1), 91-95.
- 275.Szwedziak, K., Grzywacz, Ż., Polańczyk, E., Bębenek, P., & Olejnik, M. (2020). Optimization of Management Processes in Assessing the Quality of Stored Grain Using Vision Techniques and Artificial Neural Networks. *Applied Sciences*, 10(16), 5721
- 276.Thomas, M. A. (1969). Browning reaction in Cheddar cheese. *Australian Journal of Dairy Technology*, 24(4), 185.
- 277.Thybo, A. K., Andersen, H. J., Karlsson, A. H., Dønstrup, S., & Stødkilde-Jørgensen, H. (2003). Low-field NMR relaxation and NMR-imaging as tools in differentiation between potato sample and determination of dry matter content in potatoes. *LWT-Food Science and Technology*, 36(3), 315-322.
- 278.Timmermans, A. J. M. (1995, August). Computer vision system for on-line sorting of pot plants based on learning techniques. In *II International Symposium On Sensors in Horticulture* 421 (pp. 91-98).
- 279.Tossavainen, O., & Kallioinen, H. (2008). Effect of lactose hydrolysis on furosine and available lysine in UHT skim milk. *Milchwissenschaft*, 63(1), 22-26.
- 280.Turgut, S. S., Karacabey, E., & Küçüköner, E. (2014). Potential of image analysis based systems in food quality assessments and classifications. In *Foodbalt 2014, 9th Baltic Conference on Food Science and Technology-Conference Proceedings* (pp. 8-12)
- 281.Udomkun, P., Nagle, M., Mahayothee, B., & Müller, J. (2014). Laser-based imaging system for non-invasive monitoring of quality changes of papaya during drying. *Food Control*, 42, 225-233.
- 282.Vadivambal, R., & Jayas, D. S. (2011). Applications of thermal imaging in agriculture and food industry—a review. *Food and bioprocess technology*, 4(2), 186-199.
- 283.Van Asselt, E. D., Van der Fels-Klerx, H. J., Marvin, H. J. P., Van Bokhorst-van de Veen, H., & Groot, M. N. (2017). Overview of food safety hazards in the European dairy supply chain. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(1), 59-75.
- 284.Van Leeuwen, K. A., Prenzler, P. D., Ryan, D., & Camin, F. (2014). Gas chromatography - combustion - isotope ratio mass spectrometry for traceability and authenticity in foods and beverages. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(5), 814-837.
- 285.Van Poucke, S., Vander Haeghen, Y., Vissers, K., Meert, T., & Jorens, P. (2010). Automatic colorimetric calibration of human wounds. *BMC medical imaging*, 10(1), 1-11.
- 286.Verdú, S., Pérez, A. J., Barat, J. M., & Grau, R. (2021). Non-destructive control in cheese processing: Modelling texture evolution in the milk curdling phase by laser backscattering imaging. *Food Control*, 121, 107638.
- 287.Verdú, S., Pérez, A. J., Barat, J. M., & Grau, R. (2019). Laser backscattering imaging as a control

- technique for fluid foods: Application to vegetable-based creams processing. *Journal of Food Engineering*, 241, 58-66.
288. Vereycken, R., Bravo, C., Ramon, H., De Baerdemaeker, J., & Van Linden, V. (2002, June). Detection technique for tomato bruise damage by thermal imaging. In *International Conference: Postharvest Unlimited* 599 (pp. 389-394).
289. Versari, A., Laghi, L., Thorngate, J. H., & Boulton, R. B. (2011). Prediction of colloidal stability in white wines using infrared spectroscopy. *Journal of food engineering*, 104(2), 239-245.
290. Vyawahare, A., Rao, K. J., & Pagote, C. N. (2013). Computer vision system for colour measurement-fundamentals and applications in food industry: a review. *Research and Reviews: Journal of Food and Dairy Technology*, 1(2), 22-31.
291. Wang, H.-H., & Sun, D.-W. (2001). Evaluation of the functional properties of cheddar cheese using a computer vision method. *Journal of Food Engineering*, 49(1), 47-51
292. Wang, H. H., & Sun, D. W. (2002a). Melting characteristics of cheese: analysis of effect of cheese dimensions using computer vision techniques. *Journal of Food Engineering*, 52(3), 279-284.
293. Wang, H.-H., & Sun, D.-W. (2002b). Correlation between cheese meltability determined with a computer vision method and with Arnott and Schreiber. *Journal of Food Science*, 67(2), 745-749.
294. Wang, H. H., & Sun, D. W. (2003). Assessment of cheese browning affected by baking conditions using computer vision. *Journal of food engineering*, 56(4), 339-345.
295. Wang, L., & Sun, D. W. (2004). Effect of operating conditions of a vacuum cooler on cooling performance for large cooked meat joints. *Journal of Food Engineering*, 61(2), 231-240.
296. Wang, L., Sun, D. W., Pu, H., & Cheng, J. H. (2017a). Quality analysis, classification, and authentication of liquid foods by near-infrared spectroscopy: A review of recent research developments. *Critical reviews in food science and nutrition*, 57(7), 1524-1538.
297. Wang, K., Sun, D. W., Pu, H., & Wei, Q. (2017b). Principles and applications of spectroscopic techniques for evaluating food protein conformational changes: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 67, 207-219.
298. Wang, W., & Paliwal, J. (2007). Near-infrared spectroscopy and imaging in food quality and safety. *Sensing and instrumentation for food quality and safety*, 1(4), 193-207.
299. WHO, 2007
300. WHO, nd
301. Wold, J. P., O'Farrell, M., Høy, M., & Tschudi, J. (2011). On-line determination and control of fat content in batches of beef trimmings by NIR imaging spectroscopy. *Meat science*, 89(3), 317-324.
302. Woodcock, T., Downey, G., & O'Donnell, C. P. (2008). Better quality food and beverages: the role of near infrared spectroscopy. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 16(1), 1-29.
303. Wright A C and Teplitski M (2009) Thinking beyond the HACCP. *Current Opinion in Biotechnology* 20 1-2.
304. Wu, D., He, Y., Nie, P., Cao, F., & Bao, Y. (2010). Hybrid variable selection in visible and near-infrared spectral analysis for non-invasive quality determination of grape juice. *Analytica chimica acta*, 659(1-2), 229-237.
305. Wu, D., Shi, H., Wang, S., He, Y., Bao, Y., & Liu, K. (2012). Rapid prediction of moisture content of dehydrated prawns using online hyperspectral imaging system. *Analytica Chimica Acta*, 726, 57-66.
306. Wu, D., & Sun, D. W. (2013a). Colour measurements by computer vision for food quality control— A review. *Trends in Food Science & Technology*, 29(1), 5-20.
307. Wu, D., & Sun, D. W. (2013b). Potential of time series-hyperspectral imaging (TS-HSI) for non-invasive determination of microbial spoilage of salmon flesh. *Talanta*, 111, 39-46.
308. Wu, D., & Sun, D. W. (2013c). Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review—Part I: Fundamentals. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 19, 1-14.
309. Wu, X., Lu, Y., Xu, H., Lv, M., Hu, D., He, Z., ... & Feng, Y. (2018). Challenges to improve the safety of dairy products in China. *Trends in food science & technology*, 76, 6-14.

- 310.Xie, J., Pan, Q., Li, F., Tang, Y., Hou, S., & Xu, C. (2021). Simultaneous detection of trace adulterants in food based on multi-molecular infrared (MM-IR) spectroscopy. *Talanta*, 222, 121325.
- 311.Xing, J., Bravo, C., Jancsó, P. T., Ramon, H., & De Baerdemaeker, J. (2005). Detecting bruises on 'Golden Delicious' apples using hyperspectral imaging with multiple wavebands. *Biosystems Engineering*, 90(1), 27-36.
- 312.Xu, C., Wang, Y., Chen, J., Zhou, Q., Wang, P., Yang, Y., & Sun, S. (2013). Infrared macro-fingerprint analysis-through-separation for holographic chemical characterization of herbal medicine. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 74, 298-307.
- 313.Xu, C. H., Chen, J. B., Zhou, Q., & Sun, S. Q. (2015a). Classification and identification of TCM by macro-interpretation based on FT-IR combined with 2DCOS-IR. *Biomedical Spectroscopy and Imaging*, 4(2), 139-158.
- 314.Xu, J. L., Riccioli, C., & Sun, D. W. (2015b). An overview on nondestructive spectroscopic techniques for lipid and lipid oxidation analysis in fish and fish products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(4), 466-477.
- 315.Ya, Z., He, K., Lu, Z. M., Yi, B., Hou, C. J., Shan, S., ... & Luo, X. G. (2012). Colorimetric artificial nose for baijiu identification. *Flavour and fragrance journal*, 27(2), 165-170.
- 316.Yam, K. L., & Papadakis, S. E. (2004). A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of food engineering*, 61(1), 137-142.
- 317.Yang, C. C., Kim, M. S., Kang, S., Cho, B. K., Chao, K., Lefcourt, A. M., & Chan, D. E. (2012). Red to far-red multispectral fluorescence image fusion for detection of fecal contamination on apples. *Journal of Food Engineering*, 108(2), 312-319.
- 318.Yang, D., Ying, Y., 2011. Applications of Raman spectroscopy in agricultural products and food analysis: a review. *Appl. Spectrosc. Rev.* 46 (7), 539–560.
- 319.Yang, Q. (1996). Apple stem and calyx identification with machine vision. *Journal of agricultural engineering research*, 63(3), 229-236.
- 320.Yang, T., Zhang, Z., Zhao, B., Hou, R., Kinchla, A., Clark, J. M., & He, L. (2016). Real-time and in situ monitoring of pesticide penetration in edible leaves by surface-enhanced Raman scattering mapping. *Analytical chemistry*, 88(10), 5243-5250.
- 321.Yao, H., Hruska, Z., Kincaid, R., Brown, R. L., Bhatnagar, D., & Cleveland, T. E. (2013). Detecting maize inoculated with toxigenic and atoxigenic fungal strains with fluorescence hyperspectral imagery. *Biosystems Engineering*, 115(2), 125-135.
- 322.Yavari, A. A., Hamed, M., & Haghbin, S. (2009). Investigation of Frying Oil Quality Using VIS/NIR Hyperspectral Analysis.
- 323.Ying, Y., Jing, H., Tao, Y., & Zhang, N. (2003). Detecting stem and shape of pears using Fourier transformation and an artificial neural network. *Transactions of the ASAE*, 46(1), 157.
- 324.Youssao, I. A. K., Verleyen, V., & Leroy, P. L. (2002). Prediction of carcass lean content by real-time ultrasound in Pietrain and negative stress Pietrain. *Animal Science*, 75(1), 25-32.
- 325.Yu, H. Y., Ying, B., Sun, T., Niu, X. Y., & Pan, X. X. (2007). Vintage year determination of bottled Chinese rice wine by VIS- NIR spectroscopy. *Journal of food science*, 72(3), E125-E129.
- 326.Zhang, B., Huang, W., Li, J., Zhao, C., Fan, S., Wu, J., & Liu, C. (2014). Principles, developments and applications of computer vision for external quality inspection of fruits and vegetables: A review. *Food Research International*, 62, 326-343.
- 327.Zhang, C., Bailey, D. P., & Suslick, K. S. (2006). Colorimetric sensor arrays for the analysis of beers: A feasibility study. *Journal of agricultural and food chemistry*, 54(14), 4925-4931.
- 328.Zhang, C., & Suslick, K. S. (2007). Colorimetric sensor array for soft drink analysis. *Journal of agricultural and food chemistry*, 55(2), 237-242.
- 329.Zhao, B., Basir, O. A., & Mittal, G. S. (2003). Detection of metal, glass and plastic pieces in bottled beverages using ultrasound. *Food Research International*, 36(5), 513-521.
- 330.Zheng, L., & Sun, D. W. (2004). Vacuum cooling for the food industry—a review of recent research advances. *Trends in Food Science & Technology*, 15(12), 555-568.

331. Zheng, C., Sun, D. W., & Zheng, L. (2006). Correlating colour to moisture content of large cooked beef joints by computer vision. *Journal of Food Engineering*, 77(4), 858-863.
332. Zhu, T. T., Wu, S., Shao, H. T., Zhang, K. L. and Du, J. L. (2005). Study on organic acids in different original gravity beers. *Food Ferment. Ind.* 31:108–112.
333. Zhu, F., Zhang, D., He, Y., Liu, F., & Sun, D. W. (2013). Application of visible and near infrared hyperspectral imaging to differentiate between fresh and frozen–thawed fish fillets. *Food and Bioprocess Technology*, 6(10), 2931-2937.
334. Zude-Sasse, M., Hashim, N., Hass, R., Polley, N., & Regen, C. (2019). Validation study for measuring absorption and reduced scattering coefficients by means of laser-induced backscattering imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 153, 161-168.
335. Zuech, N. (2004). Machine vision and lighting. *Machine Vision on Line*.
336. Zulkifli, N., Hashim, N., Abdan, K., & Hanafi, M. (2019). Application of laser-induced backscattering imaging for predicting and classifying ripening stages of “Berangan” bananas. *Computers and Electronics in Agriculture*, 160, 100-107.
337. Παγκόσμιο φορτίο τροφικών ασθενειών, 2015
338. <http://computer.howstuffworks.com/scanner2.htm>)