



Σχολή Επιστημών Τροφίμων
Τμήμα Επιστήμης και Τεχνολογίας Τροφίμων

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
**Εφαρμογές λογισμικού κινητών τηλεφώνων (smartphone) στην υπηρεσία
διαγνωστικών αναλύσεων σε τρόφιμα**

MSc Thesis
Smartphone software applications in the diagnostic analysis service in food



ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ/NAME OF STUDENT

Σταυρούλα Γεωργίου

Stavroula Georgiou

ΟΝΟΜΑ ΕΙΣΗΓΗΤΗ/NAME OF THE SUPERVISOR

Κοντελής Σπυρίδων

Konteles Spyridon

ΑΙΓΑΛΕΩ/AIGALEO 2022



Faculty of Food Sciences
Department of Food Science and Technology

Master of Science
FOOD INNOVATION, QUALITY AND SAFETY

MSc THESIS
Smartphone software applications in the diagnostic analysis service in food

STAVROULA GEORGIU
20004

georgiou1992@gmail.com

SUPERVISOR
KONTELES SPYRIDON

AIGALEO 2022

Έγινε δεκτή

Ο Διευθυντής του ΠΜΣ:

Οι υπογράφωντες δηλώνουμε ότι έχουμε εξετάσει τη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία (master thesis) με τίτλο **Έφαρμογές λογισμικού κινητών τηλεφώνων (smartphone) στην υπηρεσία διαγνωστικών αναλύσεων σε τρόφιμα** που παρουσιάστηκε από τον ή την **ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ**, υποψηφίου για τον μεταπτυχιακό τίτλο σπουδών στην **ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ, ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ** και βεβαιώνουμε ότι γίνεται δεκτή.

Ημερομηνία

Κοντελής Σπυρίδων

Ημερομηνία

Κάβουρας Διονύσης

Ημερομηνία

Μπάρτζης Βασίλειος

Δήλωση περί λογοκλοπής/Copyright

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανωτέρω δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην διπλωματική μου εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς, ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.



Γεωργίου Σταυρούλα

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διατριβής αυτής αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν σε αυτή την προσπάθεια.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Κοντελέ Σπυρίδων, για την εμπιστοσύνη του στην ανάθεση της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, καθώς επίσης για την καθοδήγηση του και την επίβλεψη στην τελική μορφή της διατριβής.

Σημαντικό ρόλο για την συγγραφή της μεταπτυχιακής μου διατριβής έπαιξε η συνάδελφος και καρδιακή μου φίλη Καραχάλιου Ανδριάννα για την εμπύχωση και την στήριξη της από την αρχή μέχρι το τέλος του μεταπτυχιακού μου.

Σας ευχαριστω πολύ εκ βαθέων,

Γεωργίου Σταυρούλα

Αφιέρωσεις

Στον αγαπημένο μου παππού Σταύρο...

Περίληψη

Η ποιότητα και η ασφάλεια των τροφίμων αποτελεί βασικό θέμα ερευνών παγκοσμίως. Η ιχνηλασιμότητα των προϊόντων διατροφής σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού έχει γίνει αναπόσπαστο μέρος της διασφάλισης της ποιότητας, της ασφάλειας και της αυθεντικότητας των τροφίμων που καταναλώνουμε. Ο ήδη τεράστιος όγκος του έργου αυτού αυξάνεται περαιτέρω όταν αναλογιστεί κανείς την πολυπλοκότητα των παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού τροφίμων, σε συνδυασμό με την ανάγκη διασφάλισης της επισιτιστικής ασφάλειας σε έναν συνεχώς αυξανόμενο παγκόσμιο πληθυσμό. Οι αντιλήψεις των καταναλωτών έχουν αλλάξει, υπάρχουν αυξανόμενες απαιτήσεις για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τα τρόφιμα που καταναλώνουμε και ότι είναι απόλυτα ασφαλή προς κατανάλωση. Στόχος αυτής της εργασίας είναι η ανασκόπηση της εφαρμογής φορητών συσκευών που βασίζονται σε smartphone, για τον προσδιορισμό της παρακολούθησης της ασφάλειας των τροφίμων.

Περιγράφονται οι σημαντικότεροι μέθοδοι ανάλυσης των τροφίμων εκ των οποίων η Χρωματομετρία κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται για την ανίχνευση βαρέων μετάλλων, αντιβιοτικών, βακτηρίων, ιών καθώς και άλλων χημικών ενώσεων που μπορεί να ανιχνευθούν στα τρόφιμα. Επίσης το φαινόμενο του φθορισμού τα οποία επίσης χρησιμοποιείται για την ανίχνευση βακτηρίων, αντιβιοτικών και φυτοφαρμάκων, καθώς και η φασματοσκοπία η οποία αποτελεί και τον μόνο μη-επεμβατικό τρόπο ανίχνευσης της νοθείας των τροφίμων, της μικροβιακής αλλοίωσης κρέατος καθώς και για τον έλεγχο στην εσωτερική ποιότητα φρούτων. Τέλος, περιγράφονται ηλεκτροχημικές αναλύσεις με την χρήση smartphone για ανίχνευση της χημικών ενώσεων όπως κλουνβετερόλης και της αιθανόλης στις μπύρες. Σε όλες τις μεθόδους αναλύεται λεπτομερώς η διαδικασία που έχει πραγματοποιηθεί και διαπιστώνεται ότι σε σύγκριση με τα παραδοσιακά εργαστηριακά όργανα ανάλυσης, η εισαγωγή του smartphone ως αισθητήρας έχει τα εξής ελκυστικά χαρακτηριστικά: Αξιοποιούν ποικιλία ενσωματωμένων αισθητήρων – συνήθως σχετικά απλών – που διευκολύνουν τη μείωση του μεγέθους της συσκευής όσο το δυνατόν περισσότερο, όταν πρόκειται για λειτουργίες που σχετίζονται με την αναλυτική διαδικασία (δηλαδή, δεν χρειάζονται επιπλέον πρόσθετα αξεσουάρ). Έτσι, τα καθιστά εντελώς φορητό και επιτρέπει τη χρήση του για δυναμικά γρήγορη επιτόπια έρευνα και ανάλυση. Το κόστος παραγωγής καθώς και λειτουργίας και συντήρησης των smartphone είναι πολύ χαμηλότερο από

αυτό του τυπικού εργαστηριακού αναλυτικού εξοπλισμού, καθιστώντας τα σχετικά προσιτά. Επίσης, διαπιστώνεται ότι τα smartphone μπορούν να συλλέγουν και να επεξεργάζονται δεδομένα μέσω εξωτερικών συνημμένων και εφαρμογών τρίτων (applications), απλοποίηση της διαδικασίας συλλογής και επεξεργασίας τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων και είναι δυνατή η απόκτηση αποτελεσμάτων δοκιμών σε σύντομο χρονικό διάστημα (cloud). Τέλος, σε αντίθεση με τα επαγγελματικά όργανα προηγμένης τεχνολογίας που μπορούν γενικά να λειτουργήσουν σωστά μόνο από εκπαιδευμένο προσωπικό, τα λειτουργικά βήματα της χρήσης smartphone για μετρήσεις έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι απλά, βασισμένα στην ελάχιστη εκπαίδευση. Εστιάζοντας πρώτα στις προόδους της τεχνολογίας η οποία προσφέρει πολλά από τα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, και προσβλέποντας στην ενσωμάτωση τέτοιων συσκευών σε πλατφόρμες ψηφιοποίησης και στις σχετικές προκλήσεις σε συνδυασμό με τις συνεχείς έρευνες που πραγματοποιούνται την τελευταία δεκαετία αναμένεται ότι αυτά τα ευρήματα θα ρίξουν φως στις εμπορικά διαθέσιμες φασματοσκοπικές, χρωματομετρικές συσκευές, καθώς και του φθορισμού οι οποίες έχουν τη δυνατότητα που επιτρέπουν τον πλήρη και συνδεδεμένο έλεγχο, από τον αγρότη/καλλιεργητή έως τον καταναλωτή, αλλά οι προκλήσεις παραμένουν και θα πρέπει να υπάρξει περαιτέρω ερευνά ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της χρήσης των συσκευών με άψογη λειτουργικότητα και άρτια αποτελέσματα.

Abstract

Food quality and safety is a key research topic worldwide. The traceability of food products throughout the supply chain has become an integral part of ensuring the quality, safety and authenticity of the food we consume. The enormous volume of work is exacerbated when one considers the complexity of global food supply chains, combined with the need to ensure food security in an ever-increasing world population. Consumer perceptions have changed, there are growing demands for more information about the food we eat and that it is completely safe to eat. The aim of this work is to review the application of mobile devices based on smartphones, to determine the monitoring of food safety.

The most important methods of food analysis are analyzed which is Chromatometry, which is mainly used for the detection of heavy metals, antibiotics, bacteria, viruses as well as chemical compounds that can be detected in food, fluorescence where the detection methods are analyzed. Antibiotics and pesticides, spectroscopy which is the only non-invasive way to detect food spoilage, microbial spoilage of meat as well as to control the internal quality of fruit. Finally, electrochemical analyzes using a smartphone to detect clunvetolol and ethanol in beers. All methods analyze in detail the process that has been carried out and it is found that compared to traditional laboratory analyzers, the introduction of the smartphone as a sensor has the following beneficial features: They are integrated with a variety of built-in sensors. This serves to reduce the size of the device as much as possible when it comes to operations related to the analytical process (no additional accessories are needed). Thus, it makes them completely portable and allows its use for potentially fast field research and analysis. The cost of production (as well as operation and maintenance) of smartphones is much lower than that of standard laboratory analytical equipment, making them relatively affordable. It is also found that smartphones can collect and process data through external attachments and third-party applications, simplifying the process of collecting and processing huge amounts of data and it is possible to obtain test results in a short time.

Finally, unlike professional high-tech instruments that can generally only function properly by trained staff, the functional steps of using a smartphone for measurements are designed to be simple, based on minimal training. Focusing first on advances in technology that offer many of the advantages mentioned above, and looking forward to integrating such devices into digitization platforms and related challenges combined with ongoing research over the

last decade, these findings are expected to shed light on Commercially available spectroscopic, colorimetric and fluorescent devices that have the potential for complete and connected control, from farmer / grower to consumer, but challenges remain and further research is needed to achieve the intended use of devices with perfect functionality and perfect results

Περιεχόμενα

Δήλωση περί λογοκλοπής/Copyright	3
Ευχαριστίες.....	5
Αφιερώσεις.....	7
Περίληψη.....	9
Abstract	12
Κατάλογος Πινάκων	20
1. Εισαγωγή	1
<i>1.1 Παραδείγματα μεθόδων αξιολόγησης της ποιότητας τροφίμων που βασίζονται σε smartphone.</i>	<i>1</i>
2. Στόχος της διπλωματικής.....	4
3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	5
<i>3.1 Αναδυόμενες Διαγνωστικές Τεχνολογίες Τροφίμων που βασίζονται στην χρήση των Smartphone.....</i>	<i>5</i>
<i>3.2 Μέθοδοι εφαρμογής αισθητήρων σε smartphone</i>	<i>5</i>
<i>3.3 Βιοαισθητήρες σε smartphone.....</i>	<i>5</i>
<i>3.4 Χρωματομετρία.....</i>	<i>5</i>
3.4.1 Χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας (DIC)	12
3.4.2 Βασικές αρχιτεκτονικές χρωματομετρίας ψηφιακής εικόνας smartphone	13
3.4.3 Ενδεικτικές εφαρμογές χρωματομετρίας μέσω smartphone.....	15
3.4.3.1 Μέταλλα και Βαρέα Μέταλλα – Χημικές ενώσεις.....	15
3.4.3.2 Φυτοφάρμακα.....	16
3.4.3.3 Ζιζανιοκτόνα	17
3.4.3.4 Αντιβιοτικά	18
3.4.3.5 Βιοχημικοί δείκτες - ένζυμα.....	20
3.4.3.6 Βακτήρια και ιοί	21
3.4.4 Τρέχουσα κατάσταση χρωματομετρίας ψηφιακής εικόνας σε smartphone	24
3.5 Φθορισμός.....	25
3.5.1 Οπτική ανίχνευση τετρακυκλίνης	25
3.5.2 Ανίχνευση Escherichia coli σε δείγματα νερού και τροφίμων.....	27
3.5.3 Ανίχνευση σωματοτροπίνης βοοειδών (rbST) στο γάλα	28
3.5.4 Οπτική ανίχνευση πράσινου μαλαχίτη	30
3.5.5 Ανίχνευση πολλαπλών φυτοφαρμάκων με φθορισμό	33
3.5.6 Ανίχνευση δειγμάτων επί του πεδίου.....	34
3.5.6.1 Ποσοτική ανίχνευση με φθορισμό του βακτηρίου Staphylococcus aureus σε δείγμα γάλακτος φιστικιού	35

3.6 Φασματοσκοπία Smartphone	37
3.6.1 Μέθοδος ανίχνευσης για μικροβιακή αλλοίωση βοείου κρέατος μέσω ενός οπτικού διαγνωστικού συστήματος που βασίζεται σε smartphone	40
3.6.2 Έλεγχος της ωρίμανσης των φρούτων με την χρήση φασματόμετρου smartphone	42
3.6.3 Φασματοσκοπία micro NIR σε smartphone για ποιοτικό έλεγχο του πράσινου τσαγιού	45
3.6.4 Φορητό φασματομετρο χειρός που βασίζεται σε smartphone για την μέτρηση της εσω-τερικής ποιότητας των φρούτων	47
3.6.5 Πρόσφατα πειράματα που χρησιμοποιούν φασματοσκοπία σε συνδυασμό με smartphone για την μελλοντική συμβολή τους στην ποιότητα των τροφίμων.	49
3.6.6 Φασματοσκοπία σε συνδυασμό με το σύστημα οράσεως υπολογιστή (CVS) για τον έλεγχο ταυτότητας τροφίμων (νοθεία ελαιολάδου)	50
3.7 Ηλεκτρο-αναλυτικές πλατφόρμες που βασίζονται σε Smartphone	55
3.7.1. Ανίχνευση κλενβουτερόλης με τη χρήση ηλεκτροχημικού βιοαισθητήρα που βασίζεται σε smartphone	56
3.7.2. Συνδυασμός ενός ποτενσιοστάτη με ένα κινητό τηλέφωνο για την αναγνώριση προτύπων δειγμάτων μελιού της Βραζιλίας σύμφωνα με τη βοτανική και γεωγραφική προέλευσή τους	59
3.7.3 Ηλεκτροχημικός βιοαισθητήρας για ανίχνευση της αιθανόλης στις μπύρες.....	61
3.8 Πλατφόρμες διάγνωσης τροφίμων που βασίζονται σε smartphone	63
4. Συζήτηση – Συμπεράσματα.....	70
4.1 Προοπτική της χρωματομετρίας ψηφιακής εικόνας σε smartphone	70
4.2 Προοπτική του φθορισμού στην ανάλυση τροφίμων με τη χρήση Smartphone	71
4.3. Προοπτική της φασματοσκοπίας για τον έλεγχο των τροφίμων	72
5. Βιβλιογραφία	73

Κατάλογος Εικόνων

- Εικόνα 1:** Τάση του αριθμού των δημοσιεύσεων για την αναλυτική χημεία με τα smartphone ως συστήματα ανίχνευσης την τελευταία δεκαετία (έως τις 30 Σεπτεμβρίου 2020) – Πηγή: Wenhui Chen et al., 2021
- Εικόνα 2:** Χρήση εργαλείων εκτίμησης ποιότητας τροφίμων με βάση το smartphone – Πηγή: Kaja Kalinowska et al. 2021
- Εικόνα 3:** Διαδικασία για τον προσδιορισμό των αλλεργιογόνων σε δείγματα τροφίμων με χρήση προσαρτήματος smartphone και χρωματομετρικών αναλύσεων - Πηγή: Kaja Kalinowska et al. 2021
- Εικόνα 4:** Σύστημα μεγέθους τσέπης για ανίχνευση αντιγόνου. Τα αντιγόνα συλλαμβάνονται σε μαγνητικά σφαιρίδια (MB) τα οποία συγκρατούνται κατά τη διάρκεια του σταδίου εκχύλισης χρησιμοποιώντας μαγνητική ράβδο και στη συνέχεια επισημαίνονται με αντισώματα συζευγμένα με οξειδωτικούς παράγοντες. Στη συνέχεια, τα MB αναμιγνύονται με διαμεσολαβητές ηλεκτρονίων και εφαρμόζονται σε ένα ηλεκτρόδιο το οποίο στη συνέχεια εισάγεται σε έναν αναγνώστη ο οποίος με τη σειρά του μεταδίδει τα δεδομένα σε ένα smartphone, επιτρέποντας την καταχώριση δεδομένων και τον έλεγχο του συστήματος – Πηγή: Lin et al., 2017.
- Εικόνα 5:** Σχηματική απεικόνιση της ενσωματωμένης διαγνωστικής πλατφόρμας με διασύνδεση κινητής τηλεφωνίας – Πηγή: Chen et al., 2014.
- Εικόνα 6:** Επιτόπιος διαγνωστικός προσαρμογέας θαλάσσιων τοξινών – Πηγή: Fang et al, 2016
- Εικόνα 7:** Γενική διαδικασία για χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας σε smartphone – Πηγή: Yajun Fan et al., 2021
- Εικόνα 8:** Κύβος χρωματικού χώρου RGB – Πηγή: Khairy et al., 2019
- Εικόνα 9** Σχηματική αναπαράσταση και εικόνα της δοκιμής ανίχνευσης φθορίου που βασίζεται σε smartphone – Πηγή: Levin et al., 2016
- Εικόνα 10:** Smartphone (iPhone) για την εφαρμογή ποσοτικού προσδιορισμού οργανοσφικτών φυτοφαρμάκων στο νερό: (A) Αρχική οθόνη στην εφαρμογή, (B) Τοποθέτηση του δείγματος και του μάρτυρα σε σχέση με το τηλέφωνο, (C) Εικόνα των ταινιών που περιέχουν το δείγμα και το μάρτυρα, (D) αποδοχή των εικόνων για επεξεργασία, (E) αριθμός εικονοστοιχείων για το χειριστή-ριο, (F) συντεταγμένες GPS για τη θέση όπου τραβήχθηκαν οι φωτογραφίες – Πηγή: Sicard et al., 2015
- Εικόνα 11:** Πλατφόρμα οπτικής ανίχνευσης smartphone – Πηγή: Sicard et al., 2015
- Εικόνα 12:** (a) Κατασκευή συσκευής που βασίζεται σε smartphone, (b) Η εφαρμογή Touch Color APP που είναι εγκατεστημένη στο smartphone, (c) Εικόνες δειγμάτων διαλυμάτων που περιέχουν διάφορες συγκεντρώσεις στρεπτομυκίνης, (d) Σχέση μεταξύ των τιμών G και των συγκεντρώσεων στρεπτομυκίνης – Πηγή: Lin et al., 2018
- Εικόνα 13:** Σχηματική αναπαράσταση της αρχής κατασκευής και ανίχνευσης βιοαισθητήρα ALP – Πηγή: Martinez et al., 2008
- Εικόνα 14:** Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού ανίχνευσης βακτηρίων. Χωρίς βακτήρια, η επαγωγή NaCl συσσωματώνει τα 4-MPBA-AuNP και το χρώμα του διαλύματος αλλάζει από κόκκινο σε μπλε. Με την παρουσία βακτηρίων, τα 4-MPBA-AuNPs δεσμεύονται στην επιφάνεια των βακτηρίων και το χρώμα του διαλύματος παρέμεινε κόκκινο. Η χρωματική απόκριση μπορεί να καταγραφεί μέσω φασματόμετρου UV-Vis και ανάλυσης RGB που βασίζεται σε ψηφιακή κάμερα – Πηγή: Huang et al., 2020
- Εικόνα 15:** Ανάλυση RGB βασισμένη σε ψηφιακή κάμερα: (A) Οι εικόνες καταγράφηκαν από κάμερα από το iPhone 8[®] υπό σταθερό φως και υποβλήθηκαν σε επεξεργασία από την Python[®] για την εξαγωγή τιμών RGB, (B) Ανάγνωση RGB διαφορετικών συγκεντρώσεων

βακτηρίων, (C) Η γραμμική προσαρμογή της ανάγνωσης καναλιού R. Η ένδειξη του καναλιού R δείχνει μια ακριβή γραμμική σχέση με τη συγκέντρωση του *E. coli* που κυμαίνεται από 10^4 – 10^8 CFU/mL – Πηγή: Huang et al., 2020

Εικόνα 16: Ανίχνευση *Salmonella* spp. χρησιμοποιώντας τροποποιημένη εφαρμογή Android: (A) Επιλέγεται η ρύθμιση της κάμερας για τη λήψη εικόνας, (B) περικοπή της εικόνας εάν χρειάζεται, (C) Η εικόνα αναλύεται χρησιμοποιώντας έναν προσαρμοσμένο αλγόριθμο για τον υπολογισμό της «Ποσοστό συγκέντρωσης», (D) Τα αποτελέσματα δίνονται ως μια απλή έξοδος NAI/OXI για ευκολία στην ερμηνεία – Πηγή: DuVall et al., 2015

Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση της προσέγγισης για την αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων με βάση την τηλεπισκόπηση με κάμερα smartphone: (1) λήψη μιας εικόνας σε ελεγχόμενο περιβάλλον, με χρώματα αναφοράς για βαθμονόμηση, (2) επεξεργασία εικόνας: ισορροπία λευκού, βαθμονόμηση, μετατροπή RAW, μετάφραση χρωματικού χώρου κ.λπ. (3) εξαγωγή και τυποποίηση μεταβλητών και εφαρμογή μοντέλου μηχανικής μάθησης, (4) αποτέλεσμα εκφρασμένο με τρόπο κατανοητά για τον τελικό χρήστη – Πηγή: Kaja Kalinowska et al. 2021

Εικόνα 18: Περιγραφή του φορητού αναλογικού αισθητήρα φθορισμού που αποκρίνεται σε TC ενσωματώνοντας το λιπόσωμα Eu3+@AlEgen υποβοηθούμενο από κιτρικό άλας σε smartphone – Πηγή: Liu et al., 2017

Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα (A) και εικόνα (B) του οπτικού προσαρτήματος για ανίχνευση *E. coli* σε smartphone χρησιμοποιώντας την ανάλυση σάντουιτς με βάση την κβαντική κουκκίδα σε γυάλινους τριχοειδείς σωλήνες. Ολόκληρο το εξάρτημα στο κινητό ζυγίζει ~28 γραμμάρια και έχει διαστάσεις ~3,5 × 5,5 × 2,4 cm. Αυτή η συμπαγής και ελαφριά μονάδα έχει οπτικό πεδίο απεικόνισης 11 mm × 11 mm και μπορεί να παρακολουθεί ~10 τριχοειδείς σωλήνες παράλληλα. Μπορεί επίσης να συνδεθεί και να αποσπαστεί επανειλημμένα από το σώμα του κινητού τηλεφώνου χωρίς να χρειάζεται λεπτή ευθυγράμμιση, καθιστώντας τη διεπαφή του αρκετά εύκολη στη χρήση – Πηγή: Zhu et al., 2012

Εικόνα 20: Καμπύλη δόσης-απόκρισης για *E. coli* O157:H7 σε ρυθμιστικό διάλυμα ζελατίνης-PBS 2% χρησιμοποιώντας την ανάλυση με βάση την κβαντική κουκκίδα που εφαρμόστηκε σε κινητό τηλέφωνο. Αυτή η καμπύλη απόκρισης παρέχει μια γραμμική προσαρμογή ($F = 1,89 \times \log[E. coli] + 2,36$) με $R = 0,985$. Το όριο ανίχνευσης είναι ~5 έως 10 cfu mL⁻¹. Για κάθε σημείο μέτρησης, χρησιμοποιούνται 3 διαφορετικά δείγματα (δηλαδή, $n = 3$). Η τυπική απόκλιση (σ) για το επίπεδο σήματος φθορισμού του δείγματος ελέγχου είναι 0,62. – Πηγή: Zhu et al., 2012

Εικόνα 21: Smartphone με προσάρτηση μικροσκοπίου φθορισμού, ρύθμιση ανίχνευσης και εικόνα μικροσυστοιχίας: (A) Φωτογραφία του τρισδιάστατου εκτυπωμένου προσαρτήματος μικροσκοπικής απεικόνισης στο smartphone που χρησιμοποιήθηκε για ανάλυση, (B) Ρύθμιση της πλατφόρμας ανίχνευσης βιοδεικτών smartphone, (C) Ενδεικτική εικόνα μικροσυστοιχίας που ελήφθη χρησιμοποιώντας το μικροσκόπιο φθορισμού smartphone, (D) Διάταξη μικροσυστοιχίας για κηλίδες τεσσάρων διαφορετικών πρωτεϊνών: ανασυνδυασμένη βόεια σωματοτροπίνη (rbST) για την ανίχνευση του βιοδεικτικού αντισώματος anti-rbST (α -rbST, μπλε), αντίσωμα κατά του αυξητικού παράγοντα-1 (IGF-1) που μοιάζει με ινσουλίνη (με κηλίδες σε δύο συγκεντρώσεις: 100 μ g mL⁻¹ και 250 μ g mL⁻¹) για την ανίχνευση του βιοδεικτικού IGF-1 (IGF-1 100, κίτρινο, IGF-1 250, πορτοκαλί), ωλεουκωματίνη ως αρνητικό μάρτυρα (N, γκρι) και IgG προβάτου ως θετικό μάρτυρα (P, πράσινο) – Πηγή: Ludwig et al., 2014

Εικόνα 22: (A) Αναλογικές φθορίζουσες εικόνες του επικαλυμμένου με ανιχνευτή διηθητικού χαρτιού κάτω από μια λάμπα UV 365 nm μετά από επώαση με MG σε διαφορετικές συγκεντρώσεις (0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 100, 150 μ g/mL), (B) Σχεδιάγραμμα των τιμών lnR που ενεργοποιούνται από τη χρωματική παραλλαγή σε σχέση με τις συγκεντρώσεις MG στην περιοχή από 0 έως 150 μ g/mL, (C) Σχηματική απεικόνιση της χρήσης της σχεδιασμένης εφαρμογής για την ανίχνευση MG. – Πηγή: Xiaoyue Yue et al., 2021

- Εικόνα 23:** Αναγνώστης φάσματος φθορισμού κινητού τηλεφώνου: (A) Ανατομία της συσκευής, (B) Σχηματική πλάγια όψη που δείχνει την εσωτερική δομή, (C) Αρχή ανίχνευσης φθορισμού που βασίζεται σε smartphone: Το λέιζερ διέγερσης (405 nm) φωτίζει τη ζώνη ελέγχου που περιέχει τα διπλά εξαρτήματα ανιχνευτή-στόχου όπου ένα μέρος της εκπομπής συγκεντρώνεται - μέσω ενός φακού συλλογής προσανατολισμένου κάθετα στο λέιζερ - και αποστέλλεται μέσω φίλτρου, σε ένα πλέγμα περίθλασης που τοποθετείται ακριβώς μπροστά από την κάμερα, (D) εικόνες ευρυζωνικού φωτός, κόκκινου, πράσινου και μπλε δείκτες λέιζερ πάνω από την οθόνη smartphone, (E) Βαθμονόμηση pixel σε σχέση με το μήκος κύματος με τρεις δείκτες λέιζερ. – Πηγή: Nan Cheng et al., 2018
- Εικόνα 24:** Σχηματική αναπαράσταση σύλληψης βακτηρίων και ποσοτική ανίχνευση από ελάχιστα επεξεργασμένα δείγματα. Πηγή: Sajal Shrivastava et al., 2018
- Εικόνα 25:** Επιτραπέζιο σύστημα αποτελούμενο από ένα smartphone (iPhone 4S), ένα NIR LED και δείγμα κιμά και τη θήκη του. Η γωνία ανίχνευσης διασποράς είναι η γωνία μεταξύ της κάμερας του smartphone και της πηγής φωτός NIR LED – Πηγή: Liang et al., 2014
- Εικόνα 26:** Φωτογραφίες που δείχνουν τη λειτουργία της εφαρμογής smartphone στις τέσσερις συγκεκριμένες γωνίες ανίχνευσης διασποράς: (A) 15°, (B) 30°, (C) 45° και (D) 60° - Πηγή: Liang et al., 2014
- Εικόνα 27:** (a) Σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών στοιχείων του πρωτοτύπου φασματόμετρου smartphone, (b) πλάνο του ακροφυσίου που απεικονίζει το φωτισμό και τη γεωμετρία συλλογής, (c) Μοντέλο του συναρμολογημένου πρωτοτύπου, (d) Φωτογραφία της πρωτοτύπης μεθόδου – Πηγή: Das et al, 2016.
- Εικόνα 28:** Διαδικασία απόκτησης δεδομένων χρησιμοποιώντας τη διεπαφή εφαρμογής στο smartphone – Πηγή: Das et al, 2016.
- Εικόνα 29:** (a) Αξεσουάρ εξοπλισμού Micro NIR: ① φασματόμετρο micro NIRS, ② δοχείο χαλαζία και ③ δείγματα τσαγιού, (b) εικόνα ενός οργάνου micro NIR συνδεδεμένου σε smartphone - Πηγή: Luqing Li et al., 2021
- Εικόνα 30:** Σχηματική απεικόνιση του φασματόμετρου χειρός, εικόνα και σχήματα της κεφαλής - Πηγή: Yu et al., 2016.
- Εικόνα 31:** Η τεχνολογία θα μας επιτρέψει να "διαβάζουμε" τα τρόφιμα – Πηγή Reporter.gr
- Εικόνα 32:** Το 50° καρέ ενός βίντεο smartphone. Το δείγμα λαδιού φωτίστηκε χρησιμοποιώντας οθόνη smartphone (κυανό χρώμα) και το επιλεγμένο ROI με 70 × 70 pixel σημειώθηκε σε λευκό τετράγωνο, (β) ένα υποσύνολο εικόνων απόδοσης επένδυσης (ROI) και μια ακολουθία χρωμάτων που ποικίλλει από μωβ έως κόκκινο – Πηγή: Weiran Song et al., 2020.
- Εικόνα 33:** Σχηματική περιγραφή του συστήματος αισθητήρων για τον έλεγχο ταυτότητας τροφίμων – Πηγή: Weiran Song et al., 2020.
- Εικόνα 34:** (A) Φωτογραφία του ηλεκτροχημικού βιοαισθητήρα που βασίζεται σε smartphone, (B) Φωτογραφία του smartphone, της θύρας USB, του χίρbox και του τυπωμένου στην οθόνη ηλεκτροδίου άνθρακα, (C) διάγραμμα πλαισίου ηλεκτρικού κυκλώματος της κινητής ηλεκτροχημικής συσκευής, επιτρέπει την εισαγωγή παραμέτρων από το χρήστη στο κινητό τηλέφωνο και τη συλλογή δεδομένων από τρία ηλεκτρόδια που συνδέονται με το τηλέφωνο – Πηγή: Dou et al., 2016.
- Εικόνα 35:** Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροχημικού ανοσολογικού συστήματος για ανίχνευση CLE μέσω επώασης σε ηλεκτρικό πεδίο: (A) αυτοσχέδια ηλεκτροχημική συσκευή που βασίζεται σε smartphone, (B) τυπωμένο τσιπ ηλεκτροδίων, (C) ελεύθερη κλενβουτερόλη σε ανταγωνισμό με CLB-HRP για να συνδεθεί με το περιορισμένο αντίσωμα αντι-κλενβουτερόλη στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Το CLB-HRP σε συνδυασμό με το αντίσωμα κατά της κλενβουτερόλης κατέλυσε την ηλεκτροχημική αντίδραση του διαλύματος υποστρώματος TMB για να ληφθεί ένα σήμα ανίχνευσης ρεύματος. - Πηγή: Dou et al., 2016

- Εικόνα 36:** Φορητή πλατφόρμα για επιτόπιες αναλύσεις: (a) Ηλεκτροχημικό σύστημα, (b) δείγμα μελιού, (c), παροχή ενέργειας, (d) smartphone με ειδικό λογισμικό – Πηγή: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468616320>
- Εικόνα 37:** Στιγμιότυπα οθόνης smartphone που δείχνουν την εφαρμογή TongueMetrix Android: (a) Αρχική οθόνη, (b) τυπικό κυκλικό βολταμμόγραμμα για το $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}/3-$ οξειδωμένος καθετήρας, (c) προαιρετική διαβίβαση δεδομένων μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και (d) οθόνη διεπαφής για το PCA.
- Εικόνα 38:** Στιγμιότυπα οθόνης εφαρμογής iTube που εκτελείται σε κινητό τηλέφωνο Android. Μόλις εκτελεστεί η εφαρμογή, μπορεί να επιλεγεί είτε η καρτέλα «Νέα δοκιμή» είτε η καρτέλα «Οδηγίες». Ο χρήστης μπορεί να διαβάσει το πρωτόκολλο δοκιμών που εξηγείται στις «Οδηγίες». Με την επιλογή του «Νέα Δοκιμή», μπορεί να επιλεγεί ο τύπος του αλλεργιογόνου ενδιαφέροντος στο αναδύμενο μενού. Μετά την ενεργοποίηση της κάμερας του κινητού τηλεφώνου, ο χρήστης μπορεί απλώς να αγγίξει την οθόνη για να τραβήξει τις εικόνες μετάδοσης των δοκιμαστικών σωλήνων και των σωλήνων ελέγχου. Οι ληφθείσες εικόνες υποβάλλονται σε ταχεία επεξεργασία στο κινητό τηλέφωνο για να ποσοτικοποιηθεί η ποσότητα αλλεργιογόνου εντός του δείγματος τροφής στόχου – Πηγή: Ozcan et al., 2013.
- Εικόνα 39:** Αισθητήρας μια χρήσης της OrganaDx™ - Πηγή (<https://www.mydxlife.com/organa-sensor-v2>)
- Εικόνα 40:** Το OrganaDx™ θα λειτουργεί ως προκαταρκτικός ελεγκτής όπου ανιχνεύονται επιβλαβείς χημικές ουσίες στα τρόφιμα μέσα σε λίγα λεπτά – Πηγή: <https://www.mydxlife.com/organa-sensor-v2>
- Εικόνα 41:** FOODSniffer και εφαρμογή FOODSniffer που εκτελεί μια βιο-οργανική δοκιμή που μπορεί να "μυρίσει" και να ελέγξει εάν το κρέας είναι καλό για κατανάλωση – Πηγή: <http://www.myfoodsniffer.com>
- Εικόνα 42:** Συσκευή NIMA – Πηγή: <https://nimasensor.com>

Κατάλογος Πινάκων

- Πίνακας 1:** Σύγκριση συμβατικών και αναδυόμενων τεχνολογιών ελέγχου τροφίμων
- Πίνακας 2:** Συσκευές ανίχνευσης (POC)(point-of-care) για ανάλυση ασφάλειας τροφίμων.
- Πίνακας 3:** Αποτελέσματα προσδιορισμού της MG με χρήση HPLC, φασματοφωτόμετρο φθορισμού και χαρτί φθορισμού με τη βοήθεια smartphone (n = 3).
- Πίνακας 4:** Περίληψη πρόσφατων συστημάτων φασματοσκοπίας smartphone.

1. Εισαγωγή

Τα θέματα που αφορούν στην ποιότητα και στην ασφάλεια των τροφίμων απασχολούν όλο και περισσότερο την παγκόσμια κοινότητα καθώς πληθαίνουν οι ανησυχίες για την υγεία των καταναλωτών. Η συχνότητα της τροφικής δηλητηρίασης φαίνεται ότι έχει αυξηθεί σημαντικά (Karp et al, 2015). Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ), σχεδόν δύο εκατομμύρια άνθρωποι τον χρόνο παγκοσμίως, χάνουν την ζωή τους από διαρροϊκές ασθένειες που προκαλούνται από βακτήρια, παράσιτα και ιούς, που μεταδίδονται είτε από μολυσμένα τρόφιμα είτε από το νερό. Οι τροφιμογενείς ασθένειες προκαλούνται κυρίως από 15 τροφιμογενή παθογόνα και αποτελούν χρόνιο πρόβλημα παγκοσμίως (Zheng et al., 2019). Τα τροφιμογενή παθογόνα έχουν γίνει μια σημαντική ανησυχία για την ασφάλεια των τροφίμων (Yin et al., 2020). Αναφορικά, μεταξύ όλων αυτών των τροφιμογενών παθογόνων, η σαλμονέλα είναι η κύρια αιτία εξάρσεων ασθενειών σε ανθρώπους και ζώα ξενιστές ανεξάρτητα από τις αναπτυσσόμενες ή τις αναπτυγμένες χώρες (Ansari et al., 2017, Li et al., 2020). Με την βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, οι καταναλωτές ανησυχούν όλο και περισσότερο για την ασφάλεια των τροφίμων και τη θρεπτική ποιότητα της διατροφής τους. Η έξαρση αυτών των περιστατικών σε συνδυασμό με την ανάγκη των καταναλωτών για ασφαλή τρόφιμα, οδήγησαν τον κλάδο της γεωργίας και της βιομηχανίας τροφίμων να αναπτύξουν αναλυτικές τεχνολογίες προκειμένου να βελτιωθεί η ασφάλεια και η ποιότητα των τροφίμων.

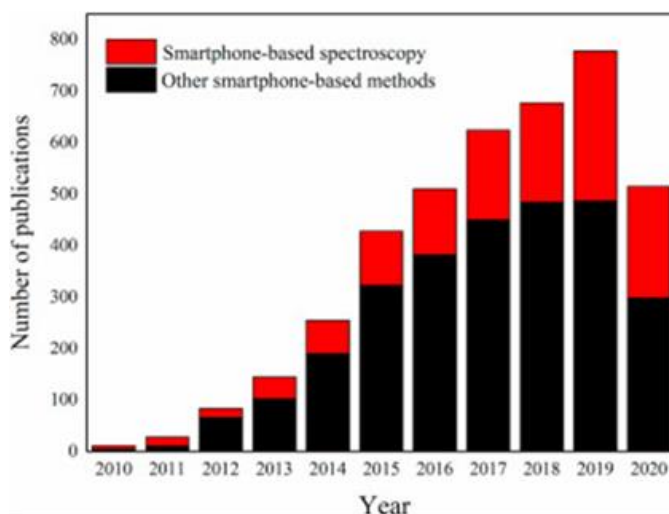
Οι τεχνικές ανάλυσης για την ασφάλεια των τροφίμων που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα είναι η υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης (HPLC), η αέρια χρωματογραφία (GC), η ποσοτική αλυσιδωτή αντίδραση πολυμεράσης σε πραγματικό χρόνο (qPCR) και η ενζυμική ανοσοπροσοφητική δοκιμασία (ELISA), (Law et al., 2015). Ωστόσο, οι τρέχουσες μέθοδοι απαιτούν υψηλές δαπάνες, χρειάζονται από 3 έως 5 ημέρες για την απόκτηση αποτελεσμάτων, καλά εκπαιδευμένους τεχνικούς, περίπλοκες διαδικασίες εξαγωγής DNA και δεν έχουν επαρκή ευαισθησία (Hu et al., 2019, Zheng et al., 2020). Σε απομακρυσμένες περιοχές ή αναπτυσσόμενες χώρες όπου οι πόροι είναι σπάνιοι και η αποστολή των δειγμάτων σε εξειδικευμένο εργαστήριο ανάλυσης μπορεί να είναι δύσκολη έως και ανέφικτη, τις καθιστά αυτομάτως ως λιγότερο εφαρμόσιμες. Για όλους τους προαναφερθέντες λόγους, υπάρχει μεγάλη ζήτηση για την ανάπτυξη οικονομικών, αποδοτικών και ισχυρών αναλυτικών συσκευών για την παρακολούθηση της ασφάλειας των τροφίμων, έτσι ώστε να

δημιουργηθούν αποτελεσματικές στρατηγικές πρόληψης και ελέγχου των τροφίμων.

Η τρέχουσα κατάσταση, δημιούργησε την ανάγκη ανάπτυξης απλών και ισχυρών διαγνωστικών συσκευών ανίχνευσης τις λεγόμενες POC (Point-Of-Care) συσκευές. Οι συσκευές POC πλεονεκτούν έναντι των μεθόδων που ήδη υπάρχουν, συμπεριλαμβανομένων των συσκευών που βασίζονται σε χαρτί και τσιπ, καθώς είναι γρήγορες, οικονομικές και φιλικές προς το χρήστη, προσφέρουν τεράστιες δυνατότητες για ταχεία ανάλυση και εξασφάλιση ό,τι το τρόφιμο είναι ασφαλές (Tang et al., 2017). Οι συγκρίσεις των υφιστάμενων και των αναδυόμενων τεχνολογιών ασφάλειας τροφίμων συνοψίζονται στον **Πίνακα 1** ενώ οι λεπτομέρειες των αναδυόμενων συσκευών POC συνοψίζονται στον **Πίνακα 2**. Οι εν λόγω συσκευές, ιδιαίτερα οι δοκιμαστικές ταινίες πλευρικής ροής (*lateral flow – rapid test concept*) και οι αναλυτικές συσκευές με βάση το *microfluidic* χαρτί (μPAD) είναι γνωστές ως μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες συσκευές POC για την ανάλυση ασφάλειας τροφίμων (Choi et al., 2015). Οι εφαρμογές των συσκευών με βάση το χαρτί θα αναλυθούν στις παρακάτω ενότητες με βάση διάφορες μεθόδους ανίχνευσης, με τις σημαντικότερες των χρωματομετρικών, φθορισμού, ηλεκτροαναλυτικές και φασματοσκοπίας. Ένα σημαντικό μειονέκτημα όμως, των συσκευών που βασίζονται σε χαρτί και αποτελεί και έναν από τους κύριους περιορισμούς είναι η κακή ευαισθησία (Choi et al., 2016). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, διάφορες έρευνες να έχουν επικεντρωθεί στην ενσωμάτωση του smartphone με τις συσκευές που βασίζονται σε χαρτί, ιδιαίτερα τις ταινίες δοκιμών πλευρικής ροής (*rapid test*), για την επίτευξη ποσοτικοποίησης στόχου (Yu et al., 2015).

Η εμφάνιση των smartphone έχει φέρει εκτεταμένες αλλαγές στον τρόπο ζωής μας, από την επικοινωνία μεταξύ μας, τα ψώνια και την απόλαυση της ψυχαγωγίας και από τη μελέτη έως τη λειτουργία στο χώρο εργασίας. Επιπλέον, η εν λόγω φορητή συσκευή έχει προσφέρει νέες δυνατότητες στην επιστημονική έρευνα και στις εφαρμογές. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες πλατφόρμες οπτικής ανίχνευσης που βασίζονται σε smartphone για την ανάλυση βιολογικών δειγμάτων, συμπεριλαμβανομένων αυτόνομων μονάδων smartphone και ενσωματωμένων συστημάτων ανίχνευσης smartphone. Αυτές οι εφαρμογές εστιάζουν κυρίως σε τρεις πτυχές: Μικροσκοπική ανίχνευση απεικόνισης, χρωματομετρική ανίχνευση και ανίχνευση φωταύγειας. Οι συσκευές συνήθως αποτελούνται από πολλαπλά εξαρτήματα, όπως ισχυρούς υπολογιστικούς επεξεργαστές, υψηλής ποιότητας οπτικούς αισθητήρες, προσαρμογέα Wi-Fi, επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και οπτική οθόνη μαζί με προσαρμοσμένες εφαρμογές.

Οι προσπάθειες που γίνονται συνεχώς και βρίσκονται σε εξέλιξη θα βελτιώσουν σημαντικά την απόδοση της συσκευής, όπως η ποσοτικοποίηση στόχου και η ανάλυση σήματος. Η ποσότητα των στόχων μπορεί στη συνέχεια να προσδιοριστεί με ακρίβεια από σήματα (π.χ. χρωματομετρικά, φθορίζοντα ή φωτεινά σήματα) που εμφανίζονται στις εικόνες του smartphone. Επίσης, πλεονεκτούν στο ότι διαθέτουν πολλές δυνατότητες ασύρματης μεταφοράς δεδομένων και αυτόματα αυτό τα κάνει ως ένα πολύτιμο εργαλείο στον ποιοτικό έλεγχο των τροφίμων. Συνδυαστικά λοιπόν, τα smartphone μαζί με εξωτερικές συσκευές έχουν μεγάλες δυνατότητες ως φορητές διαγνωστικές πλατφόρμες για ανάλυση τροφίμων και έχουν σχεδιαστεί για να επεκτείνουν τις δυνατότητές τους για εξαγωγή πιο εξελιγμένων διαγνωστικών πληροφοριών. Στον τομέα των τροφίμων, αυτή η ικανότητα μεταφράζεται σε βελτιωμένη επίγνωση του τι φτάνει στο πιάτο μας. Οι έρευνες εξελίσσονται συνεχώς προκειμένου στο εγγύς μέλλον να έχουμε καλύτερα αποτελέσματα παγκοσμίως σε ότι αφορά τον έλεγχο των τροφίμων. Πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρώσει το ενδιαφέρον τους στην απόδοση ανίχνευσης των smartphone καθώς η παγκόσμια διείσδυση αυτών των συσκευών συνεχίζει να αυξάνεται και να διεισδύει στον ερευνητικό χώρο (Dincer et al., 2019). Ως εκ τούτου, η εφαρμογή των smartphone σε διαφορετικά επιστημονικά πεδία έχει γνωρίσει τεράστια ανάπτυξη (Kanchi et al., 2018). Η αυξανόμενη τάση στον αριθμό των δημοσιεύσεων που παρουσιάζουν τη χρήση smartphone ως συσκευές ανίχνευσης φαίνεται στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Τάση του αριθμού των δημοσιεύσεων για την αναλυτική χημεία με τα smartphone ως συστήματα ανίχνευσης την τελευταία δεκαετία (έως τις 30 Σεπτεμβρίου 2020) – Πηγή: Wenhui Chen et al., 2021

Πίνακας 1: Σύγκριση συμβατικών και αναδυόμενων τεχνολογιών ελέγχου τροφίμων –
 Πηγή: Review Emerging Point-of-care Technologies for Food Safety Analysis, Ru-Choi et al., 2019

Διαγνωστικό τεστ		Τύποι Στόχων	Χρόνος	Κόστος (\$)	Διαγνωστική ειδικότητα (%)	Διαγνωστική ευαισθησία (%)	Απαιτείται τεχνογνωσία	Απαιτείται ειδικό όργανο
Συμβατικές Μέθοδοι	Καλλιέργεια βακτηρίων	παθογόνο	~ 1-2 ημέρες	3–6	100	100	Ναί	Ναί
	ELISA	παθογόνο	~ 6 ώρες	10	70–90	61–99	Ναί	Ναί
	Qpcr	παθογόνο	~ 4 ώρες	20	100	80–100	Ναί	Ναί
	GC	χημική ουσία	~ 30 λεπτά	20–30	95	99	Ναί	Ναί
	HPLC	χημική ουσία	~ 30 λεπτά	20–30	95	99	Ναί	Ναί
Αναδυόμενες τεχνολογίες	Συσκευές POC	παθογόνο και χημικό	~20–30 λεπτά	2	100	80–100	Όχι	Όχι

Συνομογραφία:

- ELISA:** ενζυμική ανοσοπροσροφητική δοκιμασία.
- qPCR:** ποσοτική αλυσιδωτή αντίδραση πολυμεράσης.
- HPLC:** υγρή χρωματογραφία υψηλής απόδοσης.
- GC:** αέρια χρωματογραφία.
- POC:** συσκευές ανίχνευσης Point of care

Πίνακας 2: Συσκευές ανίχνευσης (POC) για ανάλυση ασφάλειας τροφίμων.
(πηγή Review Emerging Point-of-care Technologies for Food Safety Analysis, Jane Ru Choi et al., 2019)

Αναδυόμενες συσκευές POC	Αρχή δοκιμής	Στόχοι Ανίχνευσης	Τύπος δείγματος	Προεπεξεργασία δείγματος	Όριο ανίχνευσης	Χρόνος δοκιμής
Συσκευές που βασίζονται σε χαρτί	Χρωματομετρική	<i>Escherichia coli</i> O157:H7	κινέζικο λάχανο	Άλεσμα/ λειοτριβηση και φιλτράρισμα	10.000 CFU/mL	~ 1 ώρα
	Χρωματομετρική	κλενβουτερόλη	Γάλα	-	0,2 ppb	1 ώρα
	Χρωματομετρική	<i>Cronobacter</i> spp.	Νερό	Προεμπλουτισμός Δείγματος	10 CFU/cm ²	1 ώρα
	Χρωματομετρική	Νιτρώδη ιόντα	Νερό	Προστάδιο Διήθησης	0,5 nmol/L	5 λεπτά
	Χρωματομετρική	Βενζοϊκό οξύ	Νερό	-	500 ppm	1 ώρα
	Χρωματομετρική	Ιόντα χαλκού	Νερό, χυμούς ντομάτας	Προστάδιο Διήθησης	0,3 ng/mL	2 λεπτά
	Χρωματομετρική	<i>E. coli</i> O157:H7	Αλατούχο διάλυμα ρυθμισμένο με φωσφορικά, γάλα, νερό και χυμός μήλου	-	10 CFU/mL	35 λεπτά
	Χρωματομετρική	17β-οιστραδιόλη	Γάλα	Προστάδιο εμπλουτισμού δειγμάτων	0,25 µg/L	10 λεπτά
	Χρωματομετρική	Αλκαλική φωσφατάση	Γάλα	Προστάδιο διαχωρισμού μορίων στόχων	0,1 U/L	10 λεπτά
	Χρωματομετρική	Νιτρώδες αλάτι	Νερό	Προστάδιο Διήθησης	73 ng/mL	15 λεπτά
	Χρωματομετρική	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Νερό	-	20 CFU/mL	50 λεπτά

Αναδυόμενες συσκευές POC	Αρχή δοκιμής	Στόχοι Ανίχνευσης	Τύπος δείγματος	Προεπεξεργασία δείγματος	Όριο ανίχνευσης	Χρόνος δοκιμής
	Χρωματομετρική	<i>E. coli</i>	Νερό, γάλα, σπανάκι	άλεσμα- λεπτή κοπή (για το σπανάκι) και διήθησης για την εξαγωγή και ενίσχυση DNA από σπανάκι	10–1000 CFU /mL	1 ώρα
	Χρωματομετρική	<i>Salmonella typhimurium</i>	Γάλα, χυμός	Απομόνωση και ενίσχυση DNA	100–1000 CFU /mL	1 ώρα
	Χρωματομετρική	i) <i>E. coli</i> O157:H7 ii) <i>S. typhimurium</i>	Αλατούχο διάλυμα ρυθμισμένο με φωσφορικά	-	i) 10 ⁵ CFU /mL ii) 10 ⁶ CFU /mL	10 λεπτά
	Φθορισμός	<i>E. coli</i> O157:H7	Γάλα	-	~100 CFU/mL	30 λεπτά
	Φθορισμός	Φυκοκυανίνη	Νερό	Προστάδιο Διήθησης	2 mg/L	30 λεπτά
	Φθορισμός	<i>E. coli</i>	Νερό, γάλα	-	10–1000 CFU /mL	1,5 ώρα
	Φθορισμός	<i>S. typhimurium</i>	Νερό, υγρό συσκευασίας πουλερικών	-	100–1000 CFU /mL	5 λεπτά
	Φθορισμός	thiram	Νερό	-	0,1 μM	~ 15 λεπτά
	Φθορισμός	<i>E. coli</i> O157:H7, <i>S. paratyphi</i> A, <i>S. paratyphi</i> B, <i>S. paratyphi</i> C, <i>S. typhi</i> , <i>S. enteritidis</i> , <i>S. choleraesuis</i> , <i>Vibrio cholera</i> O1, <i>V. cholera</i> O139 και <i>V. parahemolyticus</i>	Γαλακτοκομικά προϊόντα, θαλάσσινα προϊόντα, ποτά, σνακ και κρέατα	Προστάδιο Ομογενοποίησης	10 ⁴ - 10 ⁵ CFU /mL	20 λεπτά

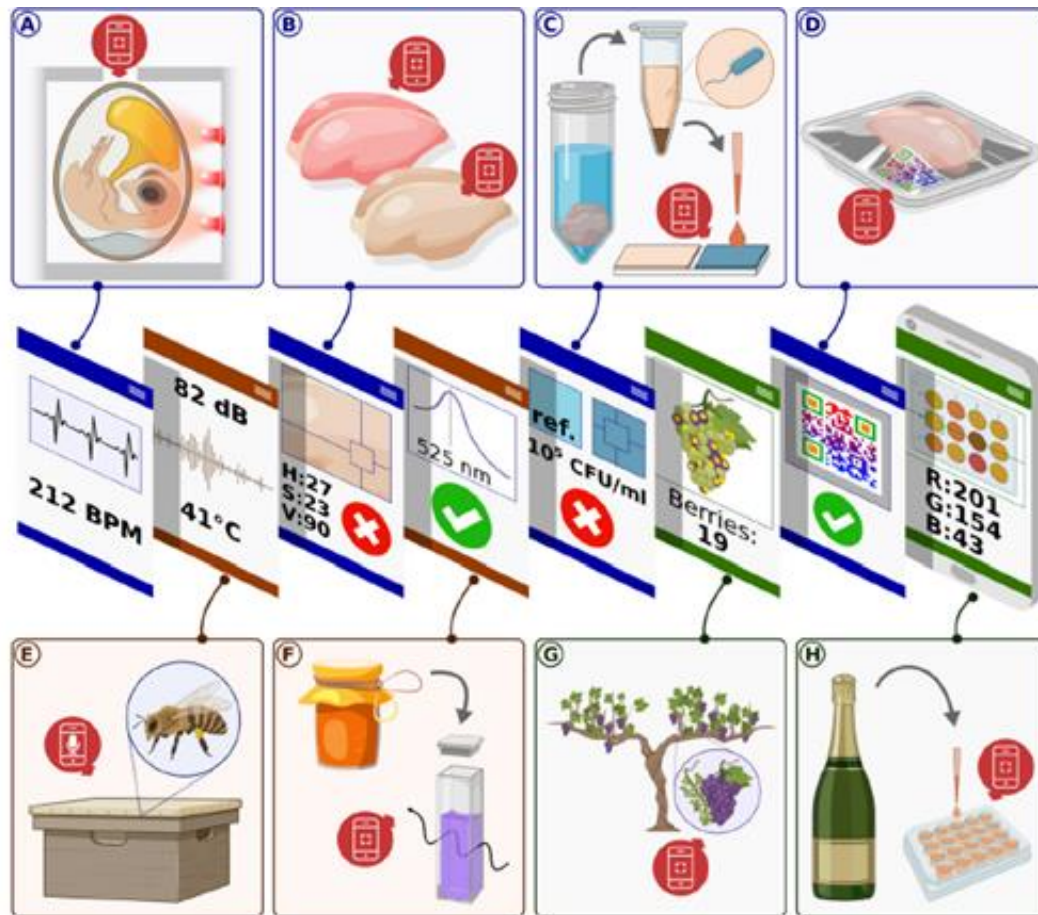
Φθορισμός	i) Υδράργυρος (II) ιόν ii) Αργυρός (I) ιόν iii) νεομυκίνη	Νερό	-	i) 121 nM, ii) 47 nM iii) 153 nM	10 λεπτά
Φθορισμός	<i>E. coli</i>	Νερό	Εξαγωγή και ενίσχυση DNA	5 κύτταρα	60 λεπτά
Ηλεκτροχημική	Νιτρώδες αλάτι	Νερό	Προστάδιο εκχύλισης και διήθησης	0,1 μM	~ 1 ώρα
Ηλεκτροχημική	Αιθανόλη	Μπύρα	-	0,52 mM	1 ώρα
Ηλεκτροχημική	<i>E. coli</i> και <i>Bacillus</i> sp.	Νερό	-	1,9 × 10 ³ CFU/mL	45 λεπτά
Χρωματομετρική και η-λεκτροχημική	i) Ιόν μολύβδου (II) ii) Ιόν καδμίου (II) iii) Ιόν χαλκού (II)	Δείγματα νερού, ρυζιού και ψαριών	Προστάδιο διήθησης για δείγματα νερού Προστάδιο άλεσης, εκχύλισης και διήθησης για δείγματα ρυζιού και ψαριών	i) 0,1 ng/mL ii) 0,1 ng/mL iii) 5 ng/mL	~ 10 λεπτά
Χημειοφωταύγεια	<i>Salmonella</i> sp.	Νερό	-	2,6 × 10 ⁷ CFU/mL	35 λεπτά
Βελτιωμένη επιφανειακή σκέδαση Raman	i) Thiram ii) Θειαβενδαζόλη iii) Μεθυλικό παραθειό	Μήλα, πορτοκάλια, ντομάτες και πράσινα λαχανικά	Κοπή φρούτων	i) 0,26 ng/cm ² ii) 28 ng/cm ² iii) 7,4 ng/cm ²	~ 5 λεπτά
Βελτιωμένη επιφανειακή σκέδαση Raman	i) Thiram ii) Ferbam	Νερό	-	i) 0,46 ηM ii) 0,49 ηM	~ 5 λεπτά

Αναφορικά, υπάρχουν παραδείγματα που η χρήση smartphone στον έλεγχο τροφίμων μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο τόσο σε μη εξιδεικευμένο άτομο όπως για παράδειγμα ενός αλλεργικού ατόμου που θα του παρέχει μια εξατομικευμένη διαγνωστική ικανότητα ανίχνευσης ενός αλλεργιογόνου όπως επίσης και την παροχή ταχείας επιθεώρησης από φορείς που πραγματοποιούν ελέγχους, σε περίπτωση υποψίας μόλυνσης από τροφιμογενή παθογόνα ή άλλους επικίνδυνους ρύπους. Επιπλέον, ακόμη και ο αγροδιατροφικός τομέας θα μπορούσε να επωφεληθεί από την ανάπτυξη φορητών πλατφορμών εργαστηρίου σε smartphone, επιτρέποντας την επιτόπια εξαγωγή πολύτιμων δεδομένων είτε αναφορικά με την ωριμότητα είτε με την κατάσταση της υγείας μιας καλλιέργειας. Με τις προόδους στη μικροκατασκευή, την τεχνολογία αισθητήρων και τα μικροσκοπικά ηλεκτρονικά σήματα, οι διαγνωστικές συσκευές σε smartphones θα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τη διεξαγωγή βιοχημικών ανιχνεύσεων στη διάγνωση της υγειονομικής περίθαλψης, την περιβαλλοντική παρακολούθηση και την αξιολόγηση ποιότητας και ασφάλειας τροφίμων στο εγγύς μέλλον.

1.1 Παραδείγματα μεθόδων αξιολόγησης της ποιότητας τροφίμων που βασίζονται σε smartphone.

1. Η βιωσιμότητα και η ανάπτυξη των εμβρύων κοτόπουλου κατά τη διάρκεια της τεχνητής επώασης μπορεί να μετρηθεί με μη επεμβατικό τρόπο παρακολουθώντας τους καρδιακούς παλμούς τους χρησιμοποιώντας τις δυνατότητες εγγραφής βίντεο των smartphone και μια εξωτερική πηγή κόκκινου φωτός για φωτοπληθυσμογραφία (A) (Phurhanin et al., 2019).
2. Κατά την επεξεργασία, η ποιότητα του ωμού κρέατος πουλερικών, για παράδειγμα, σχετικά με το σύνδρομο ωχρού πουλερικού, μπορεί να εκτιμηθεί αναλύοντας το χρώμα του με βάση την ανάλυση των φωτογραφιών που έχουν τραβηχτεί με την κάμερα του smartphone (B) (Barbin et al., 2016, You, Liu et al., 2020). Η ασφάλεια του καταναλωτή μπορεί στη συνέχεια να διασφαλιστεί πριν από τη διανομή, π.χ. με δοκιμή σαλμονέλας σε κρέας κοτόπουλου χρησιμοποιώντας βιοαισθητήρες μαγνητικών σωματιδίων που βασίζονται σε ανοσοδιαχωρισμό σε περιορισμένους πόρους ή ως φορητά κιτ, με smartphone που χρησιμοποιούνται για ανάλυση εικόνας

(C) (Guo et al., 2019), ή κατά τη διανομή και από τους ίδιους τους καταναλωτές με σάρωση των χρωματομετρικών αισθητήρων που είναι ενσωματωμένοι σε συσκευασμένο κρέας πουλερικών για να ανιχνευθεί η έναρξη της αλλοίωσης (D) (Chen et al., 2017 Lee et al., 2019; Rukchon et al., 2014).



Εικόνα 2: Χρήση εργαλείων εκτίμησης ποιότητας τροφίμων με βάση το smartphone – Πηγή: Kaja Kalinowska et al. 2021

3. Ο μελισσοκόμος έχει την δυνατότητα να μπορεί να παρακολουθεί το μικροκλίμα της κυψέλης και τη θερμική άνεση των μελισσών ανιχνεύοντας αλλαγές στο επίπεδο έντασης του ήχου χρησιμοποιώντας το ενσωματωμένο μικρόφωνο του smartphone (E) (Lima et al., 2019), ενώ ένα αξεσουάρ οπτικής ανίχνευσης τοποθετημένο σε ένα smartphone συνδυαστικά με την χρήση νανοσωματιδίων χρυσού συζευγμένου με απταμερές για επιθεώρηση ασφαλείας στο σημείο ανάγκης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξέταση της συγκέντρωσης της στρεπτομυκίνης στο μέλι (F) (Liu et al., 2017).

4. Οι μέθοδοι αξιολόγησης της ποιότητας των τροφίμων που βασίζονται σε smartphone βρίσκουν επίσης εφαρμογή στην παραγωγή κρασιού από την επιθεώρηση σταφυλιών πριν από τη συγκομιδή στον αμπελώνα (G) (Ang et al., 2018, Aquino et al., 2018) για τον εντοπισμό της υποβάθμισης των οργανοληπτικών ιδιοτήτων του κρασιού κατά την ωρίμανση και την αποθήκευση παρακολουθώντας τη διαδικασία ροδίσματος (H) (Perez et al., 2017).

2. Στόχος της διπλωματικής

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η επισκόπηση μεθοδολογιών και προτάσεων ανίχνευσης και – κατά περίπτωση – ποσοτικοποίησης διαφόρων παραγόντων που συνδέονται με την αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων με χρήση *smartphone*. Δίνεται έμφαση στις εξελίξεις στις οποίες τα *smartphone* χρησιμοποιούνται ως ανιχνευτές, είτε από μόνα τους είτε σε συνδυασμό με πιο περίπλοκες διαδικασίες προετοιμασίας οργάνων και δειγμάτων.

3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

3.1 Αναδυόμενες Διαγνωστικές Τεχνολογίες Τροφίμων που βασίζονται στην χρήση των Smartphone

3.2 Μέθοδοι εφαρμογής αισθητήρων σε smartphone

Οι αποτελεσματικές μέθοδοι για τον εντοπισμό μολυντών στα τρόφιμα και τα ποτά αποτελούν σημαντικό κομμάτι για τη βελτίωση της δημόσιας υγείας. Οι διαγνωστικές προσεγγίσεις τροφίμων που βασίζονται σε smartphone μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- βιοαισθητήρες εργαστηρίου σε smartphone και
- οπτικούς και φασματοσκοπικούς αισθητήρες σε smartphone.

3.3 Βιοαισθητήρες σε smartphone

Οι βιοαισθητήρες είναι αναλυτικές συσκευές που ενσωματώνουν έναν βιο-υποδοχέα με μια κατάλληλη μέθοδο μεταγωγής για την ανίχνευση των στόχων που μας ενδιαφέρουν. Η ειδική αλληλεπίδραση μεταξύ της αναλυόμενης ουσίας-στόχου και του υποδοχέα παράγει ένα μετρήσιμο σήμα εξόδου, το οποίο υπογραμμίζει την παρουσία του αναζητούμενου στοιχείου. Έτσι, αυτή η προσέγγιση έχει υψηλή επιλεκτικότητα, αφού επιτυγχάνεται άμεση ανίχνευση της αναλυόμενης ουσίας στόχου. Ωστόσο, περιλαμβάνει πάντα μια επεμβατική φάση προ-επεξεργασίας δείγματος, για να προκαλέσει την παραγωγή ικανά ισχυρού σήματος προς μεταγωγή. Οι βιοαισθητήρες επιτρέπουν γρήγορη και χαμηλού κόστους ανάλυση, με αποτελέσματα σε λίγα λεπτά, και δείχνουν προοπτικές για περαιτέρω σμίκρυνση και φορητότητα. Εκμεταλλευόμενοι τη συνδυασμένη χρήση smartphone και προσαρμοσμένης βιοχημικής ανάλυσης, τα αναλυτικά συστήματα που βασίζονται σε βιοαισθητήρες είναι πολλά υποσχόμενα εργαλεία για την επιτόπια ανίχνευση των ουσιωδών-στόχου συμπεριλαμβανομένων των ρύπων, φαρμάκων, υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων και τροφιμογενών παθογόνων.

3.4 Χρωματομετρία

Η χρωματομετρία είναι η επιστήμη και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση και τη φυσική περιγραφή της ανθρώπινης αντίληψης των χρωμάτων (Όηνο,

2000). Η χρωματομετρία μπορεί να διαχωριστεί σε δυο υποκατηγορίες, **(α)** την οπτική χρωματομετρία και **(β)** την φωτοηλεκτρική χρωματομετρία.

Η οπτική χρωματομετρία χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της συγκέντρωσης παρατηρώντας την αλλαγή χρώματος του διαλύματος-στόχου με γυμνά μάτια (Wu et al., 2017). Υπάρχει ωστόσο, η δυσκολία να διακρίνει το ανθρώπινο μάτι τις λεπτές χρωματικές διαφορές και αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ακρίβεια μέτρησης της οπτικής χρωματομετρίας να είναι χαμηλότερη από αυτή της φωτοηλεκτρικής χρωματομετρίας.

Η φωτοηλεκτρική χρωματομετρία χρησιμοποιεί συσκευές όπως π.χ. φωτοηλεκτρικό χρωματόμετρο και φασματοφωτόμετρο, το οποίο είναι πιο ακριβές στην ανάλυση αλλαγής χρώματος και στον προσδιορισμό της συγκέντρωσης του στόχου για αυτό τον λόγο εφαρμόζεται περισσότερο σε διάφορους τομείς (Clydesdale, 1978).

Η χρωματομετρική ανίχνευση θεωρείται ως η πιο συνηθισμένη μέθοδο ανίχνευσης σε δοκιμές που έχουν ως βάση το χαρτί, για την παρακολούθηση της ασφάλειας των τροφίμων κυρίως λόγω της εύκολης χρήσης, της απλότητας και της ικανότητάς της να ανιχνεύεται με γυμνό μάτι. Η χρωματομετρική ανάλυση χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της βιοχημείας για τον έλεγχο της παρουσίας διαφόρων στόχων ενδιαφέροντος, όπως ένζυμα, αντισώματα και πεπτίδια. Λειτουργεί μετρώντας την ποσότητα του φωτός που απορροφάται από ένα χρωμογόνο αντιδραστήριο ή ένα προϊόν αντίδρασης σε ένα χαρακτηριστικό μήκος κύματος. Αυτό το μήκος κύματος είναι συγκεκριμένο για το αντιδραστήριο που μετράται και η ποσότητα του απορροφούμενου φωτός είναι ανάλογη της συγκέντρωσης του αντιδραστηρίου.

Η ενσωμάτωση των μεθοδολογιών που υπάρχουν σήμερα για την ανάλυση των τροφίμων με συστήματα ανιχνευτών που βασίζονται σε *smartphone*, αποτελεί ένα ενδιαφέρον παράδειγμα προσπαθειών έτσι ώστε να καταστεί πιο προσιτή η αναλυτική χημεία τροφίμων. Για παράδειγμα, η σύζευξη διαφόρων ανοσολογικών δοκιμών μαζί με *smartphones* κερδίζει έδαφος σε πολλούς τομείς της επιστήμης. Οι μέθοδοι στις οποίες χρησιμοποιείται ο σχηματισμός ενός συμπλόκου μεταξύ του στόχου και ενός αντισώματος για να επιτευχθεί η ανίχνευση, δηλαδή οι ανοσοδοκιμασίες, έχουν αποκτήσει τεράστια δημοτικότητα λόγω της απλότητας στην χρήση τους (Dixit & Twyman, 2019). Υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις όπου τα αποτελέσματα της δοκιμής μπορούν να αξιολογηθούν με γυμνό μάτι, αυτή η προσέγγιση όμως δεν είναι επαρκής σε καταστάσεις στις οποίες τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με ανοσοπροσδιορισμούς είναι ποσοτικά. Οπότε και

πάλι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η σύζευξη με συστήματα ανίχνευσης που βασίζονται σε smartphone είναι απαραίτητη στο να διευκολύνει τον ποσοτικό προσδιορισμό των αποτελεσμάτων, καθώς η ένταση του χρώματος της γραμμής δοκιμής, συνήθως εξαρτάται από τη συγκέντρωση του στόχο.

Οι Coskun et al. (2013) παρουσίασαν ένα νέο σύστημα το οποίο είναι βασισμένο σε κινητά τηλέφωνα (smartphone) για χρωματομετρικές αναλύσεις που πραγματοποιούνται σε δοκιμαστικούς σωλήνες για την ανίχνευση του αλλεργιογόνου φιστικιού σε δείγματα τροφίμων. Ανέπτυξαν ένα εξάρτημα κινητού τηλεφώνου που αποτελείται από δύο δοκιμαστικούς σωλήνες, για το διάλυμα δοκιμής και ελέγχου, που φωτίζονται από δύο LED των οποίων το μήκος κύματος ταιριάζει με το μήκος κύματος απορρόφησης του αντιδραστηρίου που ενεργοποιείται στον δοκιμαστικό σωλήνα. Η ένταση του φωτός μετρήθηκε από μια εφαρμογή που αναπτύχθηκε στο smartphone, για να ποσοτικοποιήσει τη συγκέντρωση αλλεργιογόνου, αφού πρώτα πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση με γνωστές συγκεντρώσεις αναλυόμενης ουσίας εντός του δοκιμαστικού σωλήνα. Οι χρωματομετρικές αναλύσεις διεξήχθησαν με βάση ένα κιτ δοκιμής ELISA ειδικό για τα φιστίκια. Υπήρξε μια φάση προετοιμασίας περίπου 20 λεπτών για τη δειγματοληψία και την επεξεργασία του στοχευόμενου δείγματος τροφής για να είναι έτοιμο για τον ψηφιακό αναγνώστη που εφαρμόζεται στο κινητό τηλέφωνο. Η ξεχωριστή οπτική ανάγνωση, ο βελτιστοποιημένος φωτισμός και η διαμόρφωση απεικόνισης κατέληξαν να είναι ευαίσθητες, επαναλαμβανόμενες και ανεπηρέαστες από χειροκίνητα σφάλματα ανάγνωσης, σε σύγκριση με την οπτική επιθεώρηση που μπορεί να πραγματοποιείται σε μεταβλητές συνθήκες φωτός. Συνοπτικά τα βήματα είναι τα εξής:

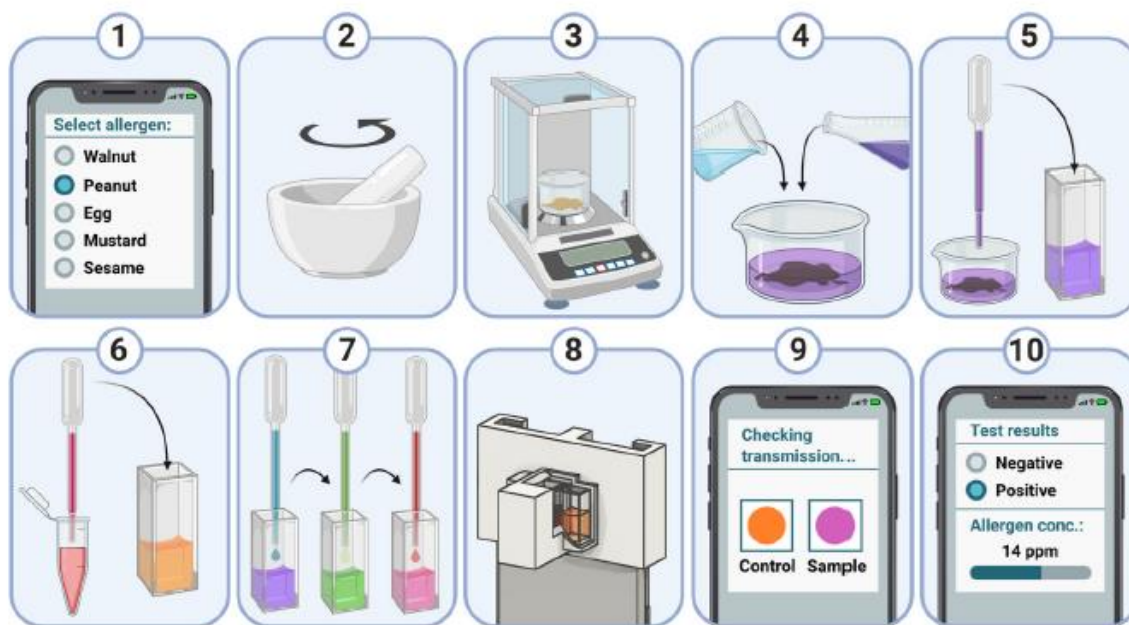
- (1) επιλέγεται το αλλεργιογόνο ενδιαφέροντος στην εφαρμογή.
- (2) το δείγμα τροφίμων είναι αλεσμένο.
- (3) περίπου 5 g του αλεσμένου δείγματος μεταφέρονται σε δοχείο.
- (4) το δείγμα αναμιγνύεται με νερό στους 60 °C και με διαλύτη εκχύλισης.
- (5) 3 σταγόνες του διαλύματος δείγματος προστίθενται στον πρώτο σωλήνα.
- (6) 3 σταγόνες του διαλύματος ελέγχου προστίθενται στον δεύτερο σωλήνα που θα λειτουργήσει ως δείγμα αναφοράς.

(7) μετά από μια περίοδο επώασης 10 λεπτών, τόσο οι δοκιμαστικοί σωλήνες όσο και οι σωλήνες ελέγχου ξεπλένονται διαδοχικά με ένα συζυγές, υπόστρωμα και ένα διάλυμα τερματισμού, με ένα ρυθμιστικό διάλυμα πλύσης που χρησιμοποιείται μεταξύ των

επλύσεων.

(8) η απορρόφηση και των δύο διαλυμάτων μετράται χρησιμοποιώντας ένα ειδικό εξάρτημα smartphone

(9) εμφάνιση των αποτελεσμάτων (ποιοτικές και ποσοτικές). (Εικόνα 3)

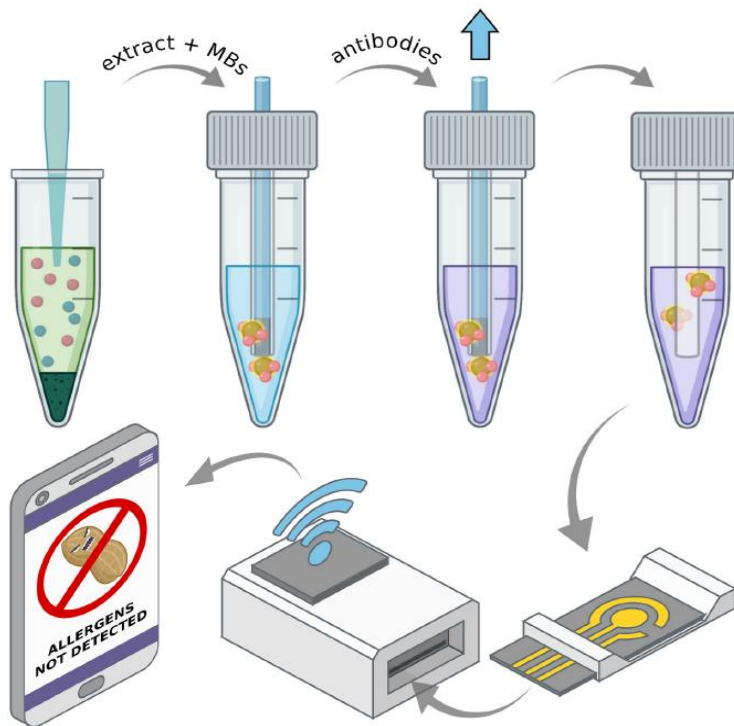


Εικόνα 3: Διαδικασία για τον προσδιορισμό των αλλεργιογόνων σε δείγματα τροφίμων με χρήση προσαρτήματος smartphone και χρωματομετρικών αναλύσεων - Πηγή: Kaja Kalinowska et al. 2021

Η ευκολία στην χρήση, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις διάφορες μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν για την ανίχνευση αλλεργιογόνων σε προϊόντα διατροφής ως απάντηση στην ανάγκη των καταναλωτών (Ye et al., 2020).

Οι Lin et al., το 2017 δοκίμασαν ένα σύστημα μεγέθους τσέπης που χρησιμοποιεί έναν μαγνητοχημικό αισθητήρα για την ανίχνευση αντιγόνων (**Εικόνα 4**). Το σύστημα αποτελείται από ένα ανιχνευτή σε μέγεθος τσέπης, ένα ηλεκτρόδιο και ένα κιτ εξαγωγής που μπορεί να απορριφθεί μετά τη χρήση. Τα αντιγόνα εξάγονται από τα τρόφιμα, καθώς συμπυκνώνονται με τη χρήση του κιτ, και στη συνέχεια ποσοτικοποιούνται χρησιμοποιώντας μια συσκευή ανάγνωσης σε μέγεθος μπρελόκ, με τα αποτελέσματα να εξάγονται σε λιγότερο από 10 λεπτά. Δεδομένου ότι το κόστος μιας μεμονωμένης ανάλυσης που εκτιμάται από τους συγγραφείς ότι είναι χαμηλότερο από 4 \$, αντιπροσωπεύει ένα απτό βήμα προς την εφαρμογή των όρων της «δίκαιης» χημείας. Το πρωτότυπο σύστημα δοκιμάστηκε μόνο για πέντε μοντέλα αντιγόνων και θα πρέπει να διεξαχθεί περαιτέρω έρευνα

προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση των διαφόρων τεχνικών επεξεργασίας τροφίμων. Ωστόσο, αναδεικνύει τη δυνατότητα τοποθέτησης βιοαισθητήρων που βασίζονται σε smartphone στα χέρια των καταναλωτών, που θα ήταν πολύ σημαντικό για αυτούς να χρησιμοποιήσουν την εν λόγω συσκευή.



Εικόνα 4: Σύστημα μεγέθους τσέπης για ανίχνευση αντιγόνου. Τα αντιγόνα συλλαμβάνονται σε μαγνητικά σφαιρίδια (MB) τα οποία συγκρατούνται κατά τη διάρκεια του σταδίου εκχύλισης χρησιμοποιώντας μαγνητική ράβδο και στη συνέχεια επισημαίνονται με αντισώματα συζευγμένα με οξειδωτικούς παράγοντες. Στη συνέχεια, τα MB αναμιγνύονται με διαμεσολαβητές ηλε-κτρονίων και εφαρμόζονται σε ένα ηλεκτρόδιο το οποίο στη συνέχεια εισάγεται σε έναν αναγνώστη ο οποίος με τη σειρά του μεταδίδει τα δεδομένα σε ένα smartphone, επιτρέποντας την καταχώριση δεδομένων και τον έλεγχο του συστήματος – Πηγή: Lin et al., 2017

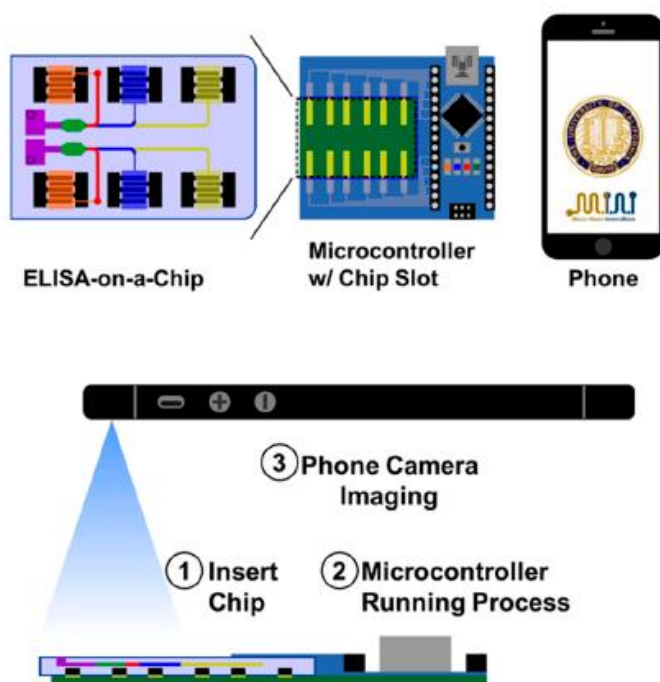
Οι Lin et al., το 2017 στην μελέτη που πραγματοποίησαν, με ανοσοχρωματογραφία μικροσφαιρών λατέξ, χρησιμοποίησαν μια συσκευή η οποία βασίζεται σε smartphone προκειμένου να πραγματοποιηθεί ποσοτική ανίχνευση της ζεαραλενόνης, η οποία είναι μια μυκοτοξίνη που υπάρχει συχνά στα δημητριακά και στις ζωοτροφές. Με τη χρήση δοκιμαστικής ταινίας, smartphone, συσκευής εκτυπωμένης 3D με δύο φακούς και κάμερα obscura, έλαβαν αποτελέσματα τα οποία ήταν αρκετά σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν τόσο με τα εμπορικά κιτ όσο και με την μέθοδο της υγρής χρωματογραφίας-φασματομετρίας μάζας το LC-MS/MS.

Οι έρευνες και οι δοκιμές με το πέρασμα των χρόνων αυξάνονται συνεχώς και μέχρι σήμερα υπάρχουν πολλά παραδείγματα δοκιμών που δείχνουν τον δρόμο της βελτίωσης στην ανάλυση των τροφίμων με επιτόπιους ελέγχους τόσο των καταναλωτών όσο και των ελεγκτών τροφίμων.

Οι Lee et al. το 2013 ανέπτυξαν μια απλή, γρήγορη αποτελεσματική μικροκατασκευή πλευρικής ροής – όπως τα γνωστά shelf-test κορονοϊού – που βασίζεται στην χρήση του smartphone ως συσκευής ανάγνωσης ανοσοδοκιμασίας (LFIA lateral flow immunoassay) για τη διάγνωση της αφλατοξίνης-B1 στον αραβόσιτο. Οι αφλατοξίνες είναι τοξικές δευτερογενείς μεταβολίτες που παράγονται από ένα είδος μυκήτων καλαμποκιού και είναι εξαιρετικά επικίνδυνες για τον άνθρωπο. Η ανοσοδοκιμασία πλευρικής ροής (LFIA) είναι μια μέθοδος που βασίζεται σε λωρίδες χαρτιού για την ανίχνευση και τον ποσοτικό προσδιορισμό των αναλυτών. Η διαδικασία είναι σχετικά απλή. Ένα υγρό δείγμα που περιέχει την αναλυόμενη ουσία που μας ενδιαφέρει κινείται υπό τριχοειδή δράση μέσα από διάφορες ζώνες λωρίδας, στις οποίες συνδέονται μόρια που μπορούν να αλληλεπιδράσουν με την αναλυόμενη ουσία. Ξεκινώντας από το ένα άκρο, το δείγμα ρέει κατά μήκος της λωρίδας και δεσμεύεται από συγκεκριμένα αντισώματα συζευγμένα με έγχρωμα ή φθορίζοντα σωματίδια, που τελικά φθάνοντας στο άλλο άκρο της ανίχνευσης στο οποίο λαμβάνει χώρα η αναγνώριση, η ανάγνωση είναι ανιχνεύσιμη με οπτική επιθεώρηση ή ειδικό αναγνώστη. Σε αυτή την δοκιμή χρησιμοποιήθηκε ένα Smartphone Samsung Galaxy S2 ως αναγνώστης (LFIA) μαζί με έναν κοντινό φακό και ένα λευκό LED, για τη βελτίωση του ορίου ανίχνευσης και της ευαισθησίας του LFIA για την αφλατοξίνη AFB1 στον αραβόσιτο, ελαχιστοποιώντας έτσι τα σφάλματα ανάγνωσης που προκαλούνται από την οπτική επιθεώρηση. Το τελικό αποτέλεσμα ωστόσο, δεν βασίστηκε στην υποκειμενική ερμηνεία ενός μόνο χειριστή.

Οι Chen et al. το 2014 συνδυάζοντας συσκευές microfluidics και την ανταγωνιστική ELISA, ανέπτυξαν ένα φορητό σύστημα που βασίζεται σε smartphone για την ανίχνευση του 2,2',4,4'-τετραβρωμοδιφαινυλαιθέρας (BDE47) είναι ο κυρίαρχος συγγενής PBDE στους ανθρώπους, την άγρια ζωή και το περιβάλλον. Στα ζώα, το BDE47 έχει αναγνωριστεί ως ένα αναπτυξιακό, αναπαραγωγικό και νευρολογικά τοξικό προϊόν που δημιουργεί προβλήματα σε πολλά ενδοκρινικά συστήματα του ζώου και επίσης μπορεί να προκαλέσει κυτταροτοξικότητα στον άνθρωπο (Zheng et al., 2012). Μέσω της θύρας USB, το smartphone τροφοδοτεί έναν μικροελεγκτή Arduino Nano ενσωματωμένο σε μια PCB

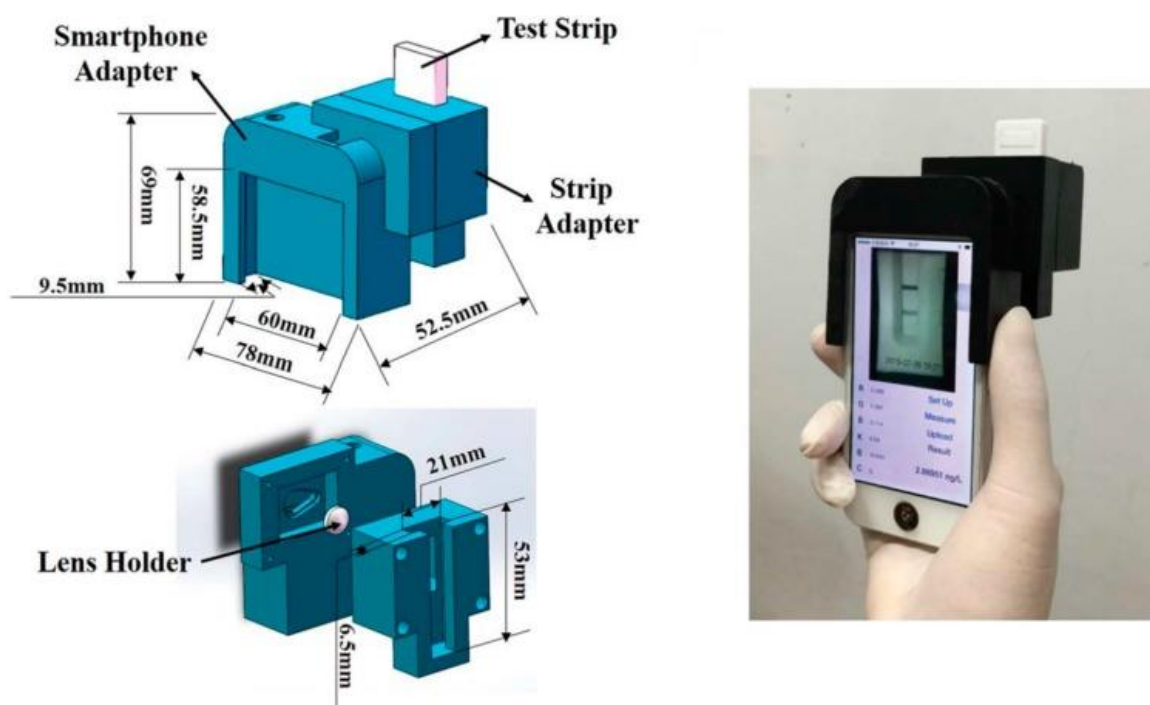
(πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος), η οποία με τη σειρά της οδηγεί ρεύμα σε ένα τσιπ ELISA, πυροδοτώντας την αντίδραση που προκαλείται από τον στόχο. Στη συνέχεια, η χρωματομετρική ανάγνωση αποκτήθηκε από την κάμερα του smartphone και στη συνέχεια η εικόνα μεταφέρεται ασύρματα σε έναν υπολογιστή-διακομιστή (computer server) για μεταγενέστερη-επεξεργασία. Η συγκεκριμένη δοκιμασία σε τσιπ έδειξε σημαντική διαφορά στον χρόνο ανάγνωσης που ήταν 15 λεπτά, σε σύγκριση με τις συμβατικές ELISA που συνήθως χρειάζονται τουλάχιστον 2 ώρες. Επίσης, ο όγκος του εισερχόμενου δείγματος μειώθηκε σημαντικά σε σχέση με την εργαστηριακή ELISA (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Σχηματική απεικόνιση της ενσωματωμένης διαγνωστικής πλατφόρμας με διασύνδεση κινητής τηλεφωνίας – Πηγή: Chen et al., 2014.

Για να την αποφυγή περιστατικών δηλητηρίασης, από τοξίνες που βρίσκονται σε θαλάσσιους οργανισμούς και είναι εξαιρετικά επικίνδυνες για τον άνθρωπο, οι Fang et al., το 2016 πρότειναν μια επιτόπια (*in situ*) διαγνωστική πλατφόρμα χρησιμοποιώντας ένα κινητό smartphone με ταινίες ανοσοπροσδιορισμού για την ανίχνευση τους. Το οκαδαϊκό οξύ (OA) και η σαξιτοξίνη (STX) είναι οι πιο κοινές θαλάσσιες τοξίνες που μπορούν να συσσωρευτούν στα οστρακοειδή και να επηρεάσουν την ανθρώπινη υγεία μέσω της τροφικής αλυσίδας. Το smartphone χρησιμοποιήθηκε για τη λήψη εικόνας και την επεξεργασία των δεδομένων. Ένα φορητό αξεσουάρ του smartphone με 3D εκτύπωση χρησιμοποιήθηκε για τη στερέωση των ταινιών δοκιμής. Αρχικά, καθορίστηκαν οι καμπύλες βαθμονόμησης με

τους αναλυτές-στόχους αραιωμένους σε πέντε τιμές συγκέντρωσης. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν πειράματα πραγματικού δείγματος χρησιμοποιώντας λωρίδες για το οκαδαϊκό οξύ (OA) και για την σαξιτοξίνη (STX) και ένα εμπορικό κιτ. Μέσω του προσαρμογέα λωρίδας, η ανάγνωση αποκτήθηκε χρησιμοποιώντας μια βελτιστοποιημένη ρύθμιση για τη συλλογή φωτός από την κάμερα του smartphone και αναλύθηκε. Η προτεινόμενη μέθοδος έδειξε όριο ανίχνευσης LOD $2,800 \text{ ng mL}^{-1}$ για το οκαδαϊκό οξύ OA και $9,808 \text{ ng mL}^{-1}$ για την σαξιτοξίνη STX αντίστοιχα, παρόμοια αποτελέσματα με αυτά του εμπορικού κιτ πλάκας. Η διάρκεια της δοκιμής ήταν 30 λεπτά και το σύστημα ήταν εύκολο στη λειτουργία, επιτρέποντας την επιτόπια ανάλυση με χαμηλό χρόνο απόκρισης (Εικόνα 6).

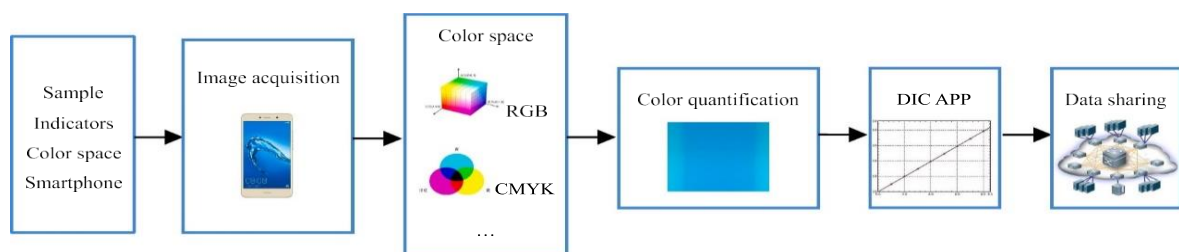


Εικόνα 6: Επιτόπιος διαγνωστικός προσαρμογέας θαλάσσιων τοξινών – Πηγή: Fang et al, 2016

3.4.1 Χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας (DIC)

Η χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας (DIC) σε νέας τεχνολογίας κινητά τηλέφωνα smartphone μπορεί να θεωρηθεί σήμερα ως μια αξιόπιστη, γρήγορη και χαμηλού κόστους μέθοδος ανάλυσης για τη μέτρηση του στόχο-στόχου, με αλλαγές χρώματος της ψηφιακής εικόνας που λαμβάνονται από την ενσωματωμένη κάμερα κινητού. Η χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας (DIC) έχει εξελιχθεί σε ένα σημαντικό και πολύ ενδιαφέρον ερευνητικό θέμα. Τα smartphone χρησιμοποιούνται ως εργαλεία λήψης εικόνας στο DIC λόγω της ραγδαίας αύξησης της χρήσης τους, της βελτίωσης των λειτουργιών της κάμερας καθώς και

της ευρείας χρήσης εφαρμογών (APPs) (Coskun et al., 2013). Την προηγούμενη δεκαετία, πραγματοποιήθηκαν μελέτες για το DIC για την χρησιμότητα του στον προσδιορισμό επικίνδυνων ουσιών σε βιολογικά και χημικά δείγματα και είχε αποδειχθεί ότι είναι μια μέθοδος εύκολης λειτουργίας, γρήγορη και οικονομικά αποδοτική (Kanchi et al., 2018). Σήμερα, η τρέχουσα κατάσταση για την χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας DIC στο smartphone για την ανάλυση διαφόρων ουσιών όπως, μετάλλων/βαρέων μετάλλων, ζιζανιοκτόνων, φυτοφαρμάκων, αντιβιοτικών, βιολογικών και ιατρικών δεικτών, φυσικών ενώσεων και βακτηρίων θα πρέπει να επιτευχθεί περαιτέρω βελτίωση με ελεγχόμενη γεωμετρία και τυπικές πηγές φωτισμού, έτσι ώστε να γίνουν περισσότερο αξιόπιστες αναλυτικές διαδικασίες. Στη διαδικασία του DIC υπάρχουν πολλά και διαφορετικά βήματα που ακολουθούνται, με τα πιο σημαντικά από αυτά να είναι η απόκτηση εικόνας με την χρήση smartphone και η ποσοτικοποίηση των χρωμάτων με χρήση ενός ειδικού λογισμικού επεξεργασίας εικόνας όπως για παράδειγμα (Adobe Photoshop, Image J, Matlab, Pantone Studio, κ.λπ.) κάτω από τον κατάλληλο χρωματικό χώρο (**Εικόνα 7**). Στη συνέχεια, η σχέση μεταξύ των δεδομένων, των ποσοτικοποιημένων εικόνων και της συγκέντρωσης της αναλυόμενης ουσίας μπορεί να δημιουργηθεί και τα αποτελέσματα μπορούν να αναγνωστούν με ευκολία χρησιμοποιώντας μια προσαρμοσμένη εφαρμογή για κινητά. Συμπερασματικά λοιπόν, το DIC γίνεται ένα ισχυρό, γρήγορο και χαμηλού κόστους εργαλείο για την ανάλυση της συγκέντρωσης του στόχου με οπτική αξιολόγηση των αλλαγών του χρώματος της ληφθείσας ψηφιακής εικόνας, ειδικά για χρήστες που θέλουν να εκτελούν χρωματομετρικές αναλύσεις με μια σχετικά εύκολη διαδικασία και ανεξάρτητα από την τοποθεσία που βρίσκονται (Costa et al., 2015).



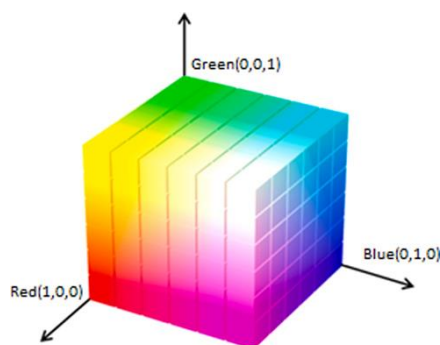
Εικόνα 7: Γενική διαδικασία για χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας σε smartphone

3.4.2 Βασικές αρχιτεκτονικές χρωματομετρίας ψηφιακής εικόνας smartphone

Οι βασικές αρχιτεκτονικές της χρωματομετρίας ψηφιακής εικόνας περιλαμβάνουν τους: χρωματικούς χώρους, τα εργαλεία για την λήψη της εικόνας, τις συνθήκες φωτισμού και

την ποσοτικοποίηση των χρωμάτων APP και DIC APP. Για να θεωρηθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης αξιόπιστα, αρχικά επιλέγονται οι κατάλληλοι χρωματικοί χώροι ανάλογα με τις διαφορετικές απαιτήσεις που προκύπτουν. Ένας χρωματικός χώρος, που ονομάζεται επίσης εύρος ή φάσμα, είναι ένα σύνολο χρωμάτων «ορατών» στο ανθρώπινο μάτι ή σε μια συσκευή. Το εύρος μιας οθόνης αντιπροσωπεύει όλα τα χρώματα που μπορούν να εμφανιστούν. Οι χρωματικοί χώροι που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι μοντέλα χρώματος που περιλαμβάνουν τα RGB, CMYK, XYZ, HSV και το μοντέλο Gray. Τα μοντέλα RGB και Gray είναι αυτά που χρησιμοποιούνται περισσότερο ως συστήματα χρωμάτων.

- **Μοντέλο RGB:** Αναλυτικά θα αναφερθούμε στο μοντέλο RGB ως το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο. Αρχικά ο χρωματικός χώρος για ένα σύστημα οθόνης που βασίζεται σε υπολογιστή συχνά οπτικοποιείται από έναν κύβο μονάδας. Κάθε χρώμα (Κόκκινο, Πράσινο και Μπλε) καταχωρείται σε ένα από τους τρεις ορθογώνιους άξονες συντεταγμένων στον τρισδιάστατο χώρο. Ένας τέτοιος κύβος φαίνεται παρακάτω μαζί με μερικά από βασικά χρώματα και τις συντεταγμένες τους (**Εικόνα 8**). Κατά μήκος κάθε άξονα του κύβου χρώματος, τα χρώματα κυμαίνονται από τη μη συμβολή αυτού του συστατικού σε ένα πλήρως κορεσμένο χρώμα. Ο κύβος χρώματος είναι συμπαγής και οποιοδήποτε σημείο (χρώμα) μέσα στον κύβο καθορίζεται από τρεις αριθμούς δηλαδή, R, G, B. Η διαγώνια γραμμή του κύβου από το μαύρο (0, 0, 0) στο λευκό (1, 1, 1) αντιστοιχεί σε όλα τα γκρι και οι τρεις άξονες αντιπροσωπεύουν όλα τα κόκκινα, πράσινα και μπλε, αντίστοιχα. Στην πράγματικότητα, διαφορετικοί συνδυασμοί υλικού/λογισμικού υπολογιστή θα χρησιμοποιούν διαφορετικές σειρές χρωμάτων. Ο χρωματικός χώρος RGB βρίσκεται μέσα στον αντιληπτικό μας χώρο, δηλαδή, ο κύβος RGB αντιπροσωπεύει λιγότερα χρώματα από όσα μπορούμε να αντιληφθούμε. Το μοντέλο RGB εφαρμόζεται συχνά σε ψηφιακά προϊόντα και χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία παραγωγής (Khairy et al., 2019).



Εικόνα 8: Κύβος χρωματικού χώρου RGB – Πηγή: Khairy et al., 2019

3.4.3 Ενδεικτικές εφαρμογές χρωματομετρίας μέσω smartphone

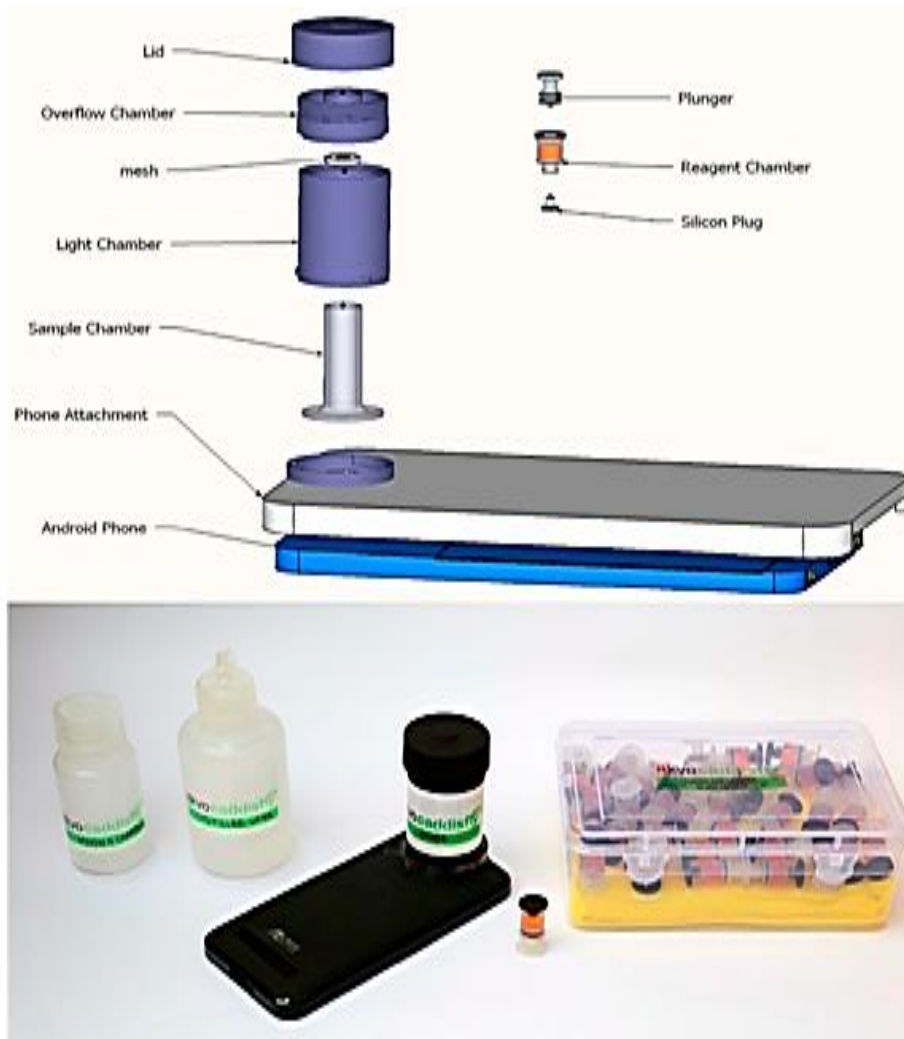
3.4.3.1 Μέταλλα και Βαρέα Μέταλλα – Χημικές ενώσεις

Τα βαρέα μέταλλα είναι εξαιρετικά τοξικά τόσο για τον άνθρωπο όσο και για το περιβάλλον και όταν εντοπιστούν ειδικά σε τρόφιμα η τοξικότητα τους έχει δείξει μεγάλη απειλή παγκοσμίως για το καταναλωτικό κοινό. Ωστόσο, οι περισσότερες μέθοδοι ανάλυσης για βαρέα μέταλλα απαιτούν ακριβά όργανα, χρονοβόρα διαδικασία και μπορούν να πραγματοποιηθούν μόνο σε εξειδικευμένα εργαστήρια. Η χρήση της χρωματομετρίας ψηφιακής εικόνας (DIC) σε smartphone για ανίχνευση βαρέων μετάλλων μπορεί να είναι μια ειδική εναλλακτική λύση για γρήγορες επιτόπιες αναλύσεις.

Οι El Kaoutit et al. (2013) παρουσίασαν χρωματομετρικές αισθητήριες μεμβράνες για την ανίχνευση υδραργύρου Hg(II) σε υδατικά μέσα χρησιμοποιώντας ψηφιακές εικόνες των μεμβρανών που λαμβάνονται με συμβατικές κάμερες ενός κινητού. Η νανομοριακή συγκέντρωση του υδραργύρου Hg(II) θα μπορούσε να ανιχνευθεί ποιοτικά με γυμνά μάτια σύμφωνα με τις χρωματικές αλλαγές των μεμβρανών και η χιλιογραμμομοριακή συγκέντρωση σε νανομοριακή συγκέντρωση του υδραργύρου Hg(II) θα μπορούσε να ποσοτικοποιηθεί μέσω ανάλυσης των ψηφιακών πληροφοριών των εικόνων που λαμβάνονται από αυτές βυθίζοντάς τις μεμβράνες μέσα νερό που περιέχει κατιόν υδραργύρου Hg(II). Στη συνέχεια, οι Firdaus et al. (2019) προσάρτησαν τα νανοσωματίδια αργύρου (AgNPs) τα οποία χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στις πράσινες τεχνολογίες λόγω μη-τοξικότητας, για να δημιουργήσουν μια αναλυτική συσκευή με βάση το χαρτί για τη μέτρηση του υδραργύρου Hg(II) χρησιμοποιώντας χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας DIC στο smartphone. Η μέθοδος έχει καλή ευαισθησία με όριο ανίχνευσης LOD 0,86 ppb.

Οι Levin et al. (2016) οδηγούμενοι από το ινδικό ζήτημα της ενδημικής φθορίωσης, μιας χρόνιας ασθένειας που προκύπτει από την υπερβολική πρόσληψη φθορίου, παρουσίασαν ένα χρωματόμετρο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο χωράφι για τον έλεγχο των υπόγειων υδάτων για την ύπαρξη φθορίου σε ενδημικές περιοχές. Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποίησε ένα εμπορικά διαθέσιμο αντιδραστήριο και προσάρμοσε ένα smartphone ως χρωματόμετρο. Ένας εύκαμπτος, συμπαγής προσαρμογέας θαλάμου δειγμάτων για smartphone σχεδιάστηκε για να βελτιστοποιήσει τη χρωματομετρική ανίχνευση. Χρησιμοποίησαν τρία smartphones όπου η βαθμονόμηση κάθε τηλεφώνου ήταν απαραίτητη λόγω σημαντικών διαφορών στην ανίχνευση χρώματος μεταξύ των καμερών. Η διαδικασία βαθμονόμησης περιελάμβανε την ανάλυση πέντε διαφορετικών προτύπων

φθορίου. Έπειτα, ένα πρόγραμμα λογισμικού αναπτύχθηκε για χρήση με το τηλέφωνο για την εγγραφή και ανάλυση του χρώματος RGB της εικόνας. Οι εικόνες που προέκυψαν αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας μια γραμμική παρεμβολή για τον υπολογισμό των αναμενόμενων χρωμάτων μεταξύ των βαθμονομημένων χρωμάτων. Το γραμμικό εύρος για την εκτίμηση φθορίου ήταν 0-2 mg L⁻¹ και τα αποτελέσματα ήταν συγκρίσιμα με εκείνα της ακριβής εργαστηριακής μεθόδου αναφοράς Ion Selective Electrode, χωρίς την ανάγκη τεχνικής εμπειρογνωμοσύνης για τη διεξαγωγή της ανάλυσης δοκιμής (Εικόνα 9).



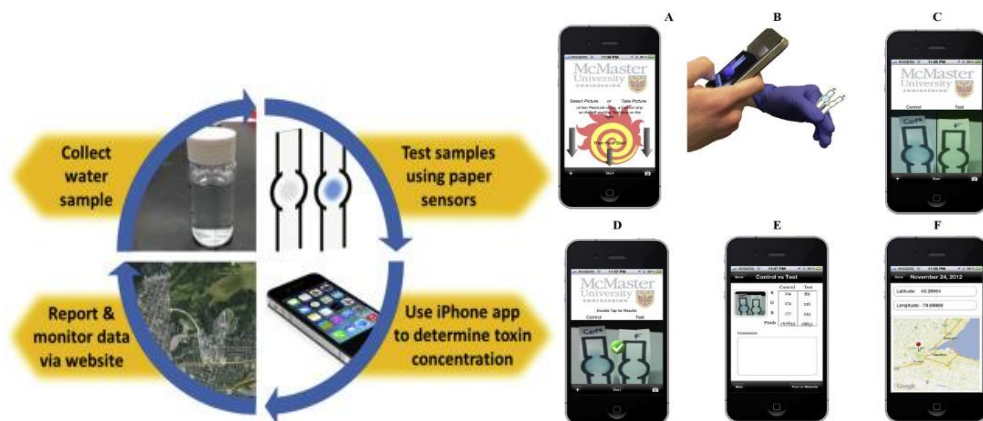
Εικόνα 9: Σχηματική αναπαράσταση και εικόνα της δοκιμής ανίχνευσης φθορίου που βασίζεται σε smartphone – Πηγή: Levin et al., 2016

3.4.3.2 Φυτοφάρμακα

Τα φυτοφάρμακα χρησιμοποιούνται ευρέως στη γεωργία για την καταπολέμηση των διαφόρων παράσιτων και των εντόμων για να βελτιώσουν τις αποδόσεις των καλλιερ-

γειών. Λόγω της κατάχρησης τους που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια, είναι σχεδόν αναπόφευκτο τα τρόφιμα να μην μολυνθούν από υπολείμματα φυτοφαρμάκων, με αποτέλεσμα να υπάρξει η συσσώρευση τους σε τρόφιμα και κάθε χρόνο ένα τεράστιο ποσοστό ανθρώπων να έχει σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία του σε σημείο που μπορεί να επιφέρει μέχρι και τον θάνατο. Επομένως, δημιουργήθηκε η επιτακτική ανάγκη να καθιερωθεί κάποια μέθοδος ταχείας ανάλυσης με υψηλότερη ευαισθησία και επιλεκτικότητα στο να αναλύει τα υπολείμματα φυτοφαρμάκων για την ασφάλεια των τροφίμων και της ανθρώπινης υγείας.

Οι Sicard et al. (2015) χρησιμοποίησαν έναν συνδυασμό αισθητήρων με βάση το χαρτί και μια νέα εφαρμογή APP για να αναλύσουν ποσοτικά τα οργανοφωσφορικά φυτοφάρμακα στο νερό με χρωματομετρικές μετρήσεις επί τόπου με την χρήση ενός smartphone. Μετά τη λήψη εικόνων μιας αναλυτικής συσκευής που βασίζεται σε χαρτί (μPAD), τα χρωματομετρικά σήματα αναλύθηκαν από την εφαρμογή Sentinel Reports που αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα iOS. Το μPAD μπορεί να ανιχνεύσει την παρουσία οργανοφωσφορικών φυτοφαρμάκων στο νερό με βάση την ανασταλτική τους δράση. Έτσι το smartphone έχει την ικανότητα να μπορεί να μεταδώσει τα αποτελέσματα σε έναν συγκεκριμένο ιστότοπο και να εμφανίσει ποσοτικά αποτελέσματα δειγμάτων νερού σε χάρτη με σήμανση GPS της τοποθεσίας δοκιμής (Εικόνα 10).



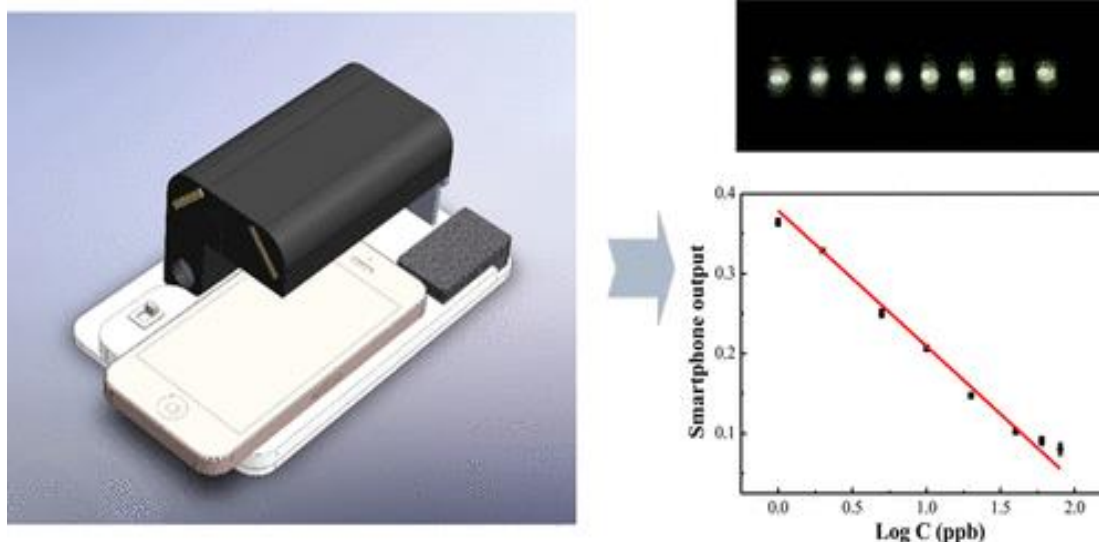
Εικόνα 10: Smartphone (iPhone) για την εφαρμογή ποσοτικού προσδιορισμού οργανοφωσφορικών φυτοφαρμάκων στο νερό: (Α) Αρχική οθόνη στην εφαρμογή, (Β) Τοποθέτηση του δείγματος και του μάρτυρα σε σχέση με το τηλέφωνο, (C) Εικόνα των ταινιών που περιέχουν το δείγμα και το μάρτυρα, (D) αποδοχή των εικόνων για επεξεργασία, (E) αριθμός εικονοστοιχείων για το χειριστή-ριο, (F) συντεταγμένες GPS για τη θέση όπου τραβήχθηκαν οι φωτογραφίες – Πηγή: Sicard et al., 2015

3.4.3.3 Ζιζανιοκτόνα

Η επιτόπια ανίχνευση ζιζανιοκτόνων και υπολειμμάτων ζιζανιοκτόνων σε περιβαλλοντικά και βιολογικά δείγματα είναι σημαντική για τη γεωργία, τις περιβαλλοντικές ανησυχίες και

την ασφάλεια των τροφίμων. Η παραδοσιακή μέθοδος ανίχνευσης ζιζανιοκτόνων απαιτεί ακριβό εργαστηριακό εξοπλισμό επομένως, είναι ζωτικής σημασίας η ταχεία ανίχνευση των ζιζανιοκτόνων σε δείγματα τροφίμων έτσι ώστε να προληφθούν και να εξαληφθούν οι πιθανοί κίνδυνοι για την υγεία των καταναλωτών.

Οι Wang et al. (2017) σχεδίασαν μια πλατφόρμα χρωματομετρίας ψηφιακής εικόνας DIC με πλάκα μονής λωρίδας για εύχρηστες, γρήγορες και χαμηλού κόστους επιτόπιες δοκιμές ζιζανιοκτόνων, με βαθμονόμηση του R και κανάλια G σε smartphone χρησιμοποιώντας διαλύματα βαφής μπλε του μεθυλίου (MB) και ροδαμίνης (B). Στη συνέχεια, με το πρόγραμμα Matlab για φορητές συσκευές λάμβαναν τη μέση τιμή έντασης των καναλιών R, G και B της εικόνας. Το ζιζανιοκτόνο 2,4-διχλωροφαινοξικό οξύ σε δείγματα νερού βρύσης, πλάσματος και ανθρώπινου ορού μπορεί να ανιχνευθεί με ποσοστό ανάκτησης που μπορεί να φτάσει 93,7%– 106,9% και με το εύρος από 1 έως 80 ppb (**Εικόνα 11**).



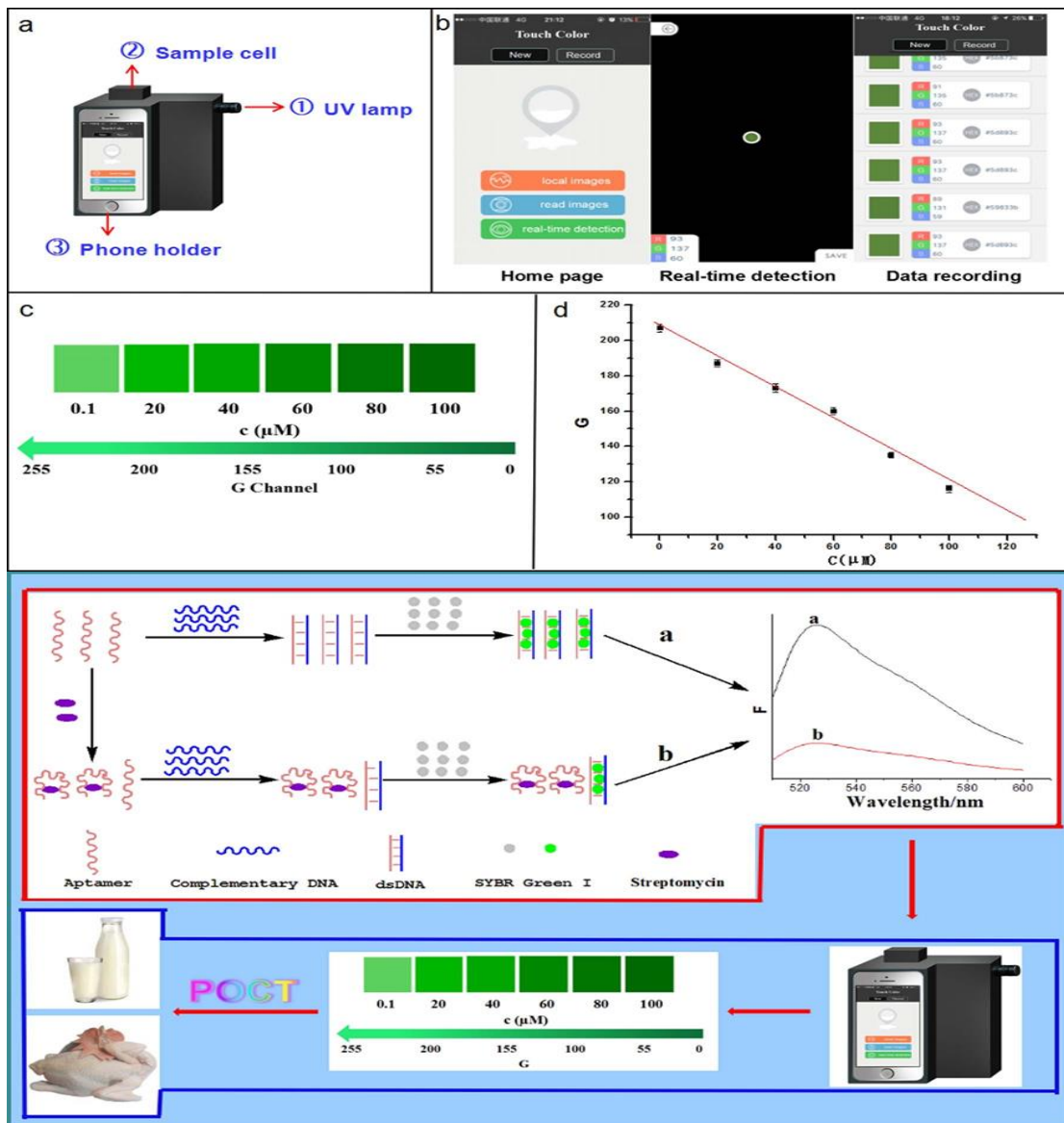
Εικόνα 11: Πλατφόρμα οπτικής ανίχνευσης smartphone – Πηγή: Sicard et al., 2015

3.4.3.4 Αντιβιοτικά

Η ταχεία ανίχνευση υπολειμμάτων αντιβιοτικών είναι πολύ σημαντική για την ασφάλεια των τροφίμων στην καθημερινή ζωή του καταναλωτή. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί ο επιτόπιος έλεγχος και οπτικός προσδιορισμός του αντιβιοτικού οι Masawat et al. (2015) χρησιμοποίησαν ορισμένες μεθόδους με τη χρήση χρωματομετρίας ψηφιακής εικόνας DIC σε smartphone. Οι τιμές χρώματος μετρήθηκαν από κάθε εικόνα των τυπικών διαλυμάτων τετρακυκλίνης και στην συνέχεια αναπτύχθηκε μια εφαρμογή με το όνομα *ColorConc* για το iPhone που χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο αντιστοίχισης εικόνας για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης της τετρακυκλίνης στο βόειο γάλα που κυμαίνεται από 0.5–10 $\mu\text{g mL}^{-1}$

με όριο ανίχνευσης LOD $0.5 \mu\text{g mL}^{-1}$ και LOQ $1.5 \mu\text{g mL}^{-1}$. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εκχύλιση της στερεάς φάσης για την αύξηση του εγγενούς χρώματος της τετρακυκλίνης, προτού χρησιμοποιηθεί η ψηφιακή εικόνα DIC στο smartphone για την ανάλυση της τετρακυκλίνης στο γάλα, με τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου να μην παρουσιάζουν σημαντική διαφορά από εκείνα της υπεριώδους/ορατής φασματοφωτομετρίας.

Οι Lin et al. (2018) προκειμένου να καθιερωθεί μια επιτόπια και οπτική μέθοδος που θα μπορούσε να εφαρμοστεί αποτελεσματικά για την ανίχνευση των αντιβιοτικών υπολειμμάτων στα τρόφιμα, συνδύασαν την ανάλυση φθορισμού και την ψηφιακή χρωματομετρία εικόνας που βασίζεται σε smartphone έτσι ώστε να καθιερώσουν μια ευαίσθητη και ταχεία μέθοδο ανίχνευσης για τα αντιβιοτικά. Χρησιμοποίησαν την στρεπτομυκίνη ως μοντέλο αναλυτέας ουσίας των αντιβιοτικών. Η στρεπτομυκίνη αναγνωρίζεται κατά κύριο λόγο από το απταμερές (ολιγονουκλεοτιδικά ή πεπτιδικά μόρια που συνδέονται με ένα συγκεκριμένο μόριο στόχο) όπου η περίσσεια απταμερούς υβριδοποιείται με το συμπληρωματικό DNA για να σχηματίσει το dsDNA. Το SYBRTM Green I (παθητική βαφή αναφοράς) συνδυάστηκε με το dsDNA και εκπέμπει εμφανή πράσινο φθορισμό, η ένταση του οποίου μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης της στρεπτομυκίνης. Αφού αποκτηθούν οι εικόνες του φθορισμού που προέρχονται από τα δείγματα με κάμερα smartphone, η εφαρμογή Touch Color APP που είναι εγκατεστημένη στο ίδιο smartphone διαβάζει τις τιμές RGB των εικόνων. Διαπιστώθηκε ότι, υπήρχε μια γραμμική σχέση μεταξύ των τιμών G και των συγκεντρώσεων στρεπτομυκίνης. Μια γραμμική σχέση που επιβεβαιώθηκε μεταξύ των τιμών G και των συγκεντρώσεων στρεπτομυκίνης στο εύρος των $10 \times 10^{-7} - 1,0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ με όριο ανίχνευσης LOD $9.4 \times 10^{-8} \text{ mol/L}$ ήταν χαμηλότερο από το μέγιστο όριο υπολειμμάτων που ορίζεται από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (ΠΟΥ). Έτσι, η οπτική μέθοδος για τη στρεπτομυκίνη καθιερώθηκε και χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία για την επιτόπια ανίχνευση στρεπτομυκίνης στα πραγματικά δείγματα. Εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό της στρεπτομυκίνης σε δείγματα κοτόπουλου και γάλακτος με ανακτήσεις σε 94,1-110%. Η μέθοδος ήταν απλή και δεν απαιτούσε εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό ούτε πολύπλοκο εξοπλισμό. Τέλος, αν το απταμερές της στρεπτομυκίνης αντικατασταθεί από το απταμερές άλλων αντιβιοτικών, αυτή η μέθοδος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για την ανίχνευση άλλων αντιβιοτικών (Εικόνα 12).

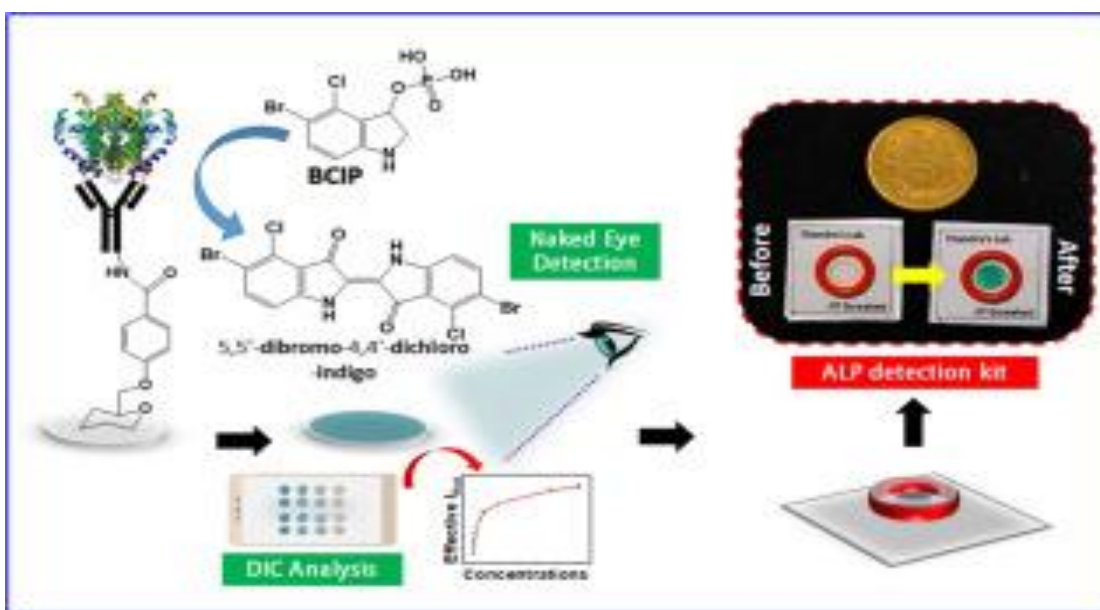


Εικόνα 12: (a) Κατασκευή συσκευής που βασίζεται σε smartphone, (b) Η εφαρμογή Touch Color APP που είναι εγκατεστημένη στο smartphone, (c) Εικόνες δειγμάτων διαλυμάτων που περιέχουν διάφορες συγκεντρώσεις στρεπτο-μυκίνης, (d) Σχέση μεταξύ των τιμών G και των συγκεντρώσεων στρεπτομυκίνης – Πηγή: Lin et al., 2018

3.4.3.5 Βιοχημικοί δείκτες - ένζυμα

Το 2008, οι Martinez et al. (2008) χρησιμοποίησαν ένα smartphone για τη συλλογή εικόνων ενός διαλύματος αντίδρασης, με αντιδρώντα την γλυκόζη και μια πρωτεΐνη με χρωμογόνα αντιδραστήρια αντίστοιχα, όπου τα αποτελέσματα ανατροφοδοτήθηκαν για να επιτευχθεί μια διαδικασία προεπιλογής. Η αλκαλική φωσφατάση (ALP) ως μεταλλοπρωτεΐνη θεωρείται ως ένα σημαντικός βιοδείκτης στον ποιοτικό έλεγχο του νωπού γάλακτος. Ο ποσοτικός προσδιορισμός πραγματοποιείται από την ανάλυση ψηφιακής εικόνας DIC σε smartphone με την ομοιοπολική ακινητοποίηση του αντισώματος anti-ALP στην λειτουργική επιφάνεια χαρτιού που λειτουργεί ως αισθητήρας, ο οποίος αντιδρά με

το ALP και παράγει μπλε-πράσινο ίζημα. Η εξαρτώμενη από τη δόση εμφάνιση του μπλε-πράσινου συμπλέγματος καταγράφηκε με τη χρήση κάμερας smartphone χρησιμοποιώντας το σύστημα Red, Green και Blue (RGB), όπου επιτεύχθηκε η μέγιστη ευαισθησία για το κανάλι του κόκκινου χρώματος. Με βάση την ανάλυση DIC, ένα ευρύ δυναμικό εύρος για την ανίχνευση ALP λαμβάνεται από 10 έως 1000 U/mL με όριο ανίχνευσης 0,87 (\pm 0,07) U/mL. Ο σχεδιασμένος βιοαισθητήρας με βάση το χαρτί εφαρμόζεται με επιτυχία για την ανίχνευση ALP σε εμπορικά και ακατέργαστα δείγματα γάλακτος (Εικόνα 13).

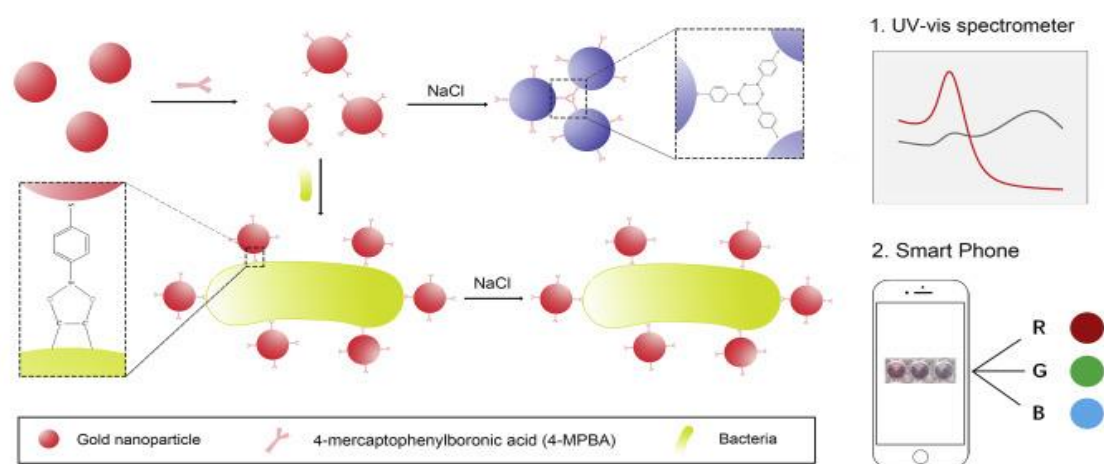


Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση της αρχής κατασκευής και ανίχνευσης βιοαισθητήρα ALP – Πηγή: Martinez et al., 2008

3.4.3.6 Βακτήρια και ιοί

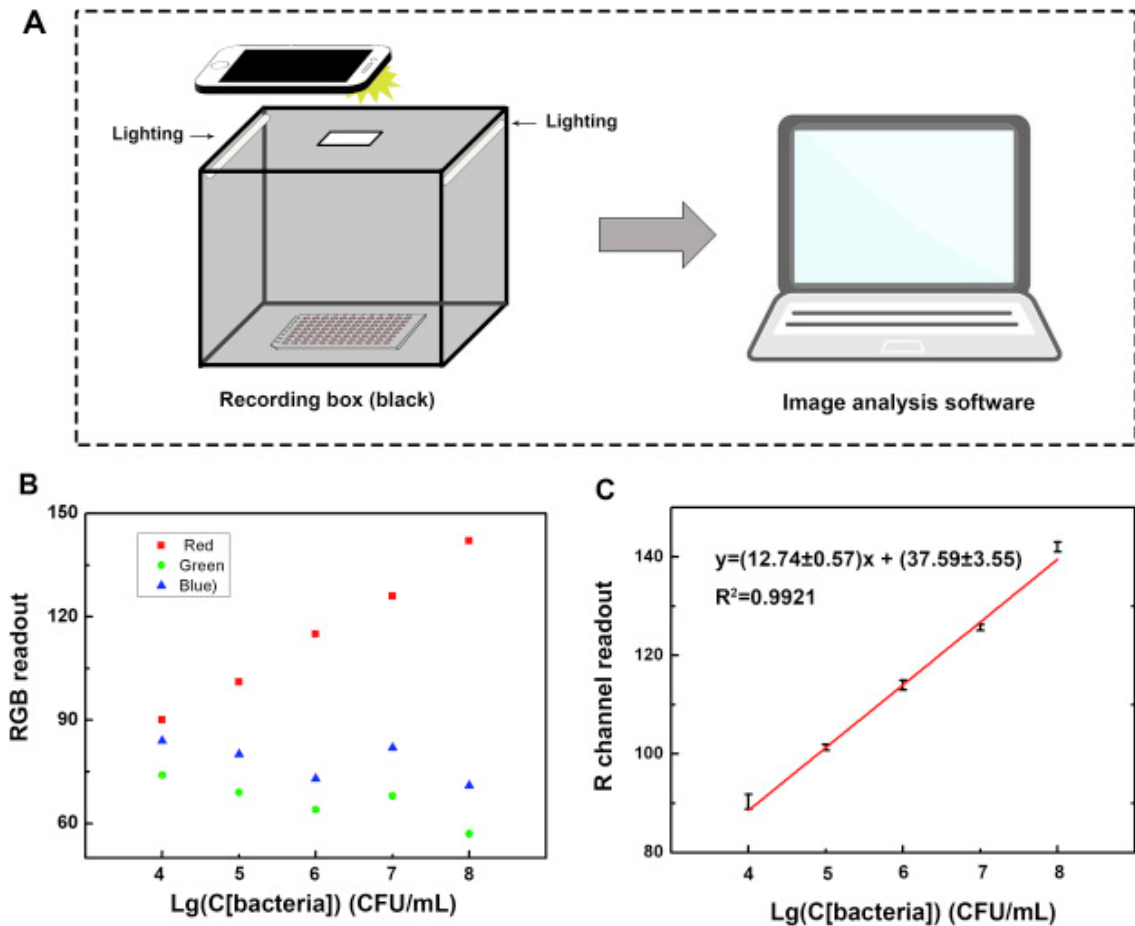
Βακτήρια ή ιοί (όπως ο νέος κορωνοϊός του 2019) με υψηλή παθογονικότητα αποτελούν σημαντική απειλή για την ανθρώπινη υγεία σε όλο τον κόσμο. Η βακτηριακή μόλυνση που μεταδίδεται από το νερό είναι ένα αυξανόμενο πρόβλημα παγκοσμίως. Παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μεγάλη ζήτηση για μια γρήγορη και αξιόπιστη μέθοδος ανίχνευσης της μόλυνσης του πόσιμου νερού. Οι Huang et al. (2020) εισάγουν μια χρωματομετρική στρατηγική ανίχνευσης βακτηρίων που βασίζεται σε λειτουργικά νανοσωματίδια χρυσού (AuNPs) με 4-μερκαπτοφαινυλοβορονικό οξύ (4-MPBA). Η ακινητοποίηση των 4-MPBA-AuNPs στην επιφάνεια των βακτηριακών κυττάρων μέσω ομοιοπολικών δεσμών εμποδίζει την επαγόμενη από NaCl συσσωμάτωση των 4-MPBA-AuNPs (Εικόνα14). Η χρωματική αλλαγή λόγω

της συσσωμάτωσης των AuNPs διακρίνεται με γυμνό μάτι και είναι μετρήσιμη μέσω ψηφιακής εικόνας DIC με μια γραμμική σχέση μεταξύ της έντασης απορρόφησης και της αφθονίας των βακτηρίων στα 524 nm από $10^4 \times 10^7$ CFU mL⁻¹ ($r^2 = 0,9577$) (Εικόνα 15). Η συγκεκριμένη πλατφόρμα έχει επικυρωθεί με πέντε στελέχη βακτηρίων, τα οποία απέδειξαν την ικανότητά της, για ανίχνευση βακτηρίων ευρέως φάσματος. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί μόνο την προσθήκη 10 μ L δείγματος ανίχνευσης και 10 μ L NaCl και τα αποτελέσματα είναι άμεσα διαθέσιμα σε διάστημα 20 λεπτών. Ωστόσο μέχρι στιγμής, δεν υπάρχει ταχεία ανίχνευση ιών από την ψηφιακή εικόνα στο smartphone, καθώς οι εξαιρετικά παθογόνοι ιοί θα πρέπει να ανιχνεύονται χρησιμοποιώντας κιτ νουκλεϊκού οξέος σε εργαστήριο P3 ή P4 που έχει εγκριθεί από την Εθνική Επιτροπή Υγείας.



Εικόνα 14: Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού ανίχνευσης βακτηρίων. Χωρίς βακτήρια, η επαγωγή NaCl συσσωματώνει τα 4-MPBA-AuNP και το χρώμα του διαλύματος αλλάζει από κόκκινο σε μπλε. Με την παρουσία βακτηρίων, τα 4-MPBA-AuNPs δεσμεύονται στην επιφάνεια των βακτηρίων και το χρώμα του διαλύματος παρέμεινε κόκκινο. Η χρωματική απόκριση μπορεί να καταγραφεί μέσω φασματομέτρου UV-Vis και ανάλυσης RGB που βασίζεται σε ψηφιακή κάμερα – Πηγή: Huang et al., 2020

Τέλος, οι DuVall et al., το 2015 παρουσίασαν μια μέθοδο ταχείας ανίχνευση παθογόνων που προκαλούνται από τα τρόφιμα χρησιμοποιώντας ένα κινητό τηλέφωνο και μια προσαρμοσμένη εφαρμογή, στην οποία η φυσική ταυτοποίηση έγινε με μεταγωγή του DNA παθογόνου, με τη μεσολάβηση μαγνητικής συσσωμάτωσης σφαιριδίων με παθογόνα θραύσματα DNA. Το smartphone χρησιμοποιήθηκε για να αποκτήσει την εικόνα της αντίδρασης ανάλυσης και να την αναλύσει για να πραγματοποιήσει ποιοτική ανίχνευση της παρουσίας του παθογόνου. Η προτεινόμενη μέθοδος ανίχνευσης ήταν πλήρως φορητή για την ανίχνευση των παθογόνων που μεταδίδονται από τα τρόφιμα και είναι η *Escherichia coli* O157: H7 και *Salmonella enterica*.



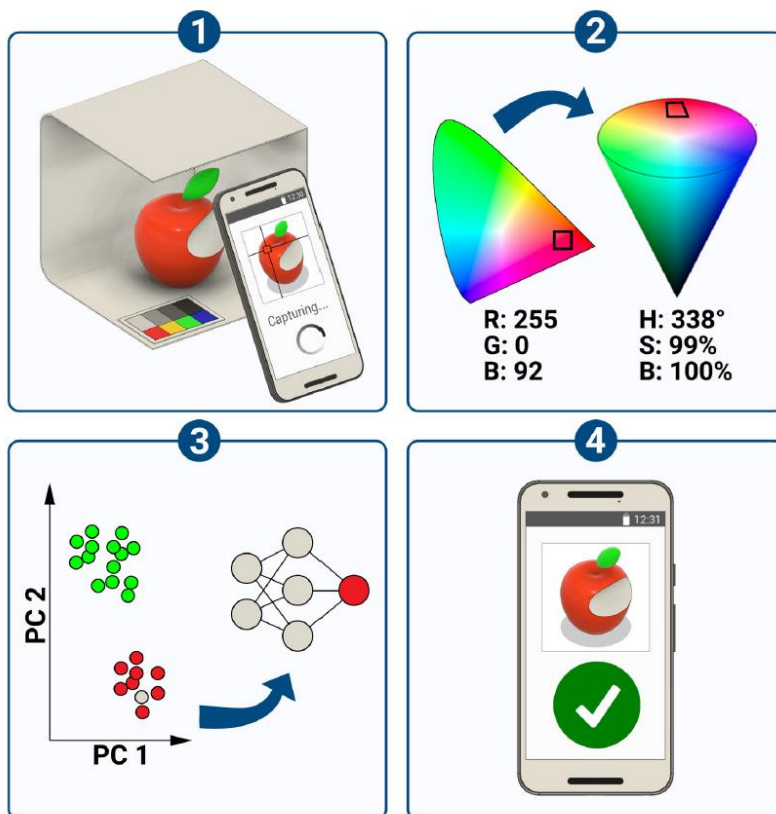
Εικόνα 15: Ανάλυση RGB βασισμένη σε ψηφιακή κάμερα: (Α) Οι εικόνες καταγράφηκαν από κάμερα από το iPhone 8© υπό σταθερό φως και υποβλήθηκαν σε επεξεργασία από την Python© για την εξαγωγή τιμών RGB, (Β) Ανάγνωση RGB διαφορετικών συγκεντρώσεων βακτηρίων, (C) Η γραμμική προσαρμογή της ανάγνωσης καναλιού R. Η ένδειξη του καναλιού R δείχνει μια ακριβή γραμμική σχέση με τη συγκέντρωση του E. coli που κυμαίνεται από 104 –108 CFU/mL –Πηγή: Huang et al., 2020



Εικόνα 16: Ανίχνευση Salmonella spp. χρησιμοποιώντας τροποποιημένη εφαρμογή Android: (Α) Επιλέγεται η ρύθμιση της κάμερας για τη λήψη εικόνας, (Β) περικοπή της εικόνα εάν χρειάζεται, (C) Η εικόνα αναλύεται χρησιμοποιώντας έναν προσαρμοσμένο αλγόριθμο για τον υπολογισμό της «Ποσοστό συγκέντρωσης», (D) Τα αποτελέσματα δίνονται ως μια απλή έξοδος ΝΑΙ/ΟΧΙ για ευκολία στην ερμηνεία – Πηγή: DuVall et al., 2015

3.4.4 Τρέχουσα κατάσταση χρωματομετρίας ψηφιακής εικόνας σε smartphone

Σήμερα, υπάρχει σημαντική πρόοδος στην απεικόνιση σε κινητά smartphone και είναι πλέον εφικτό να γίνει διάκριση μεταξύ των εντάσεων του χρώματος, που σε άλλη περίπτωση θα ήταν ανέφικτο να διακριθούν με γυμνό μάτι, ειδικά μετά τη μετατροπή του χρώματος από κόκκινο, πράσινο, μπλε μοντέλο (RGB) σε π.χ. μοντέλο χρώματος απόχρωσης, κορεσμού, έντασης (HSI), όπου το συστατικό της έντασης μπορεί εύκολα να απομονωθεί (Εικόνα 17). Η πρόσφατη αυτή πρόοδος στην ψηφιακή απεικόνιση δημιούργησε μια φωτογραφία υψηλής ανάλυσης που παράγεται από την κάμερα smartphone η οποία πλεονεκτεί στο ότι είναι πιο οικονομική και πιο πρακτική. Η εκτεταμένη χρήση ψηφιακών εικόνων παρέχει τρέχουσες ευκαιρίες ανάπτυξης γρήγορου και χαμηλού κόστους DIC σε smartphone για ημιποσοτικές και ποσοτικές αναλύσεις για μέταλλα/βαρέων μέταλλα, ζιζανιοκτόνα, φυτοφάρμακα, αντιβιοτικά, βιοχημικούς δείκτες και βακτήρια/ιούς.



Εικόνα 17: Σχηματική αναπαράσταση της προσέγγισης για την αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων με βάση την τηλεπισκόπηση με κάμερα smartphone: (1) λήψη μιας εικόνας σε ελεγχόμενο περιβάλλον, με χρώματα αναφοράς για βαθμονόμηση, (2) επεξεργασία εικόνας: ισορροπία λευκού, βαθμονόμηση, μετατροπή RAW, μετάφραση χρωματικού χώρου κ.λπ. (3) εξαγωγή και τυποποίηση μεταβλητών και εφαρμογή μοντέλου μηχανικής μάθησης, (4) αποτέλεσμα εκφρασμένο με τρόπο κατανοητό για τον τελικό χρήστη – Πηγή: Kaja Kalinowska et al. 2021

3.5 Φθορισμός

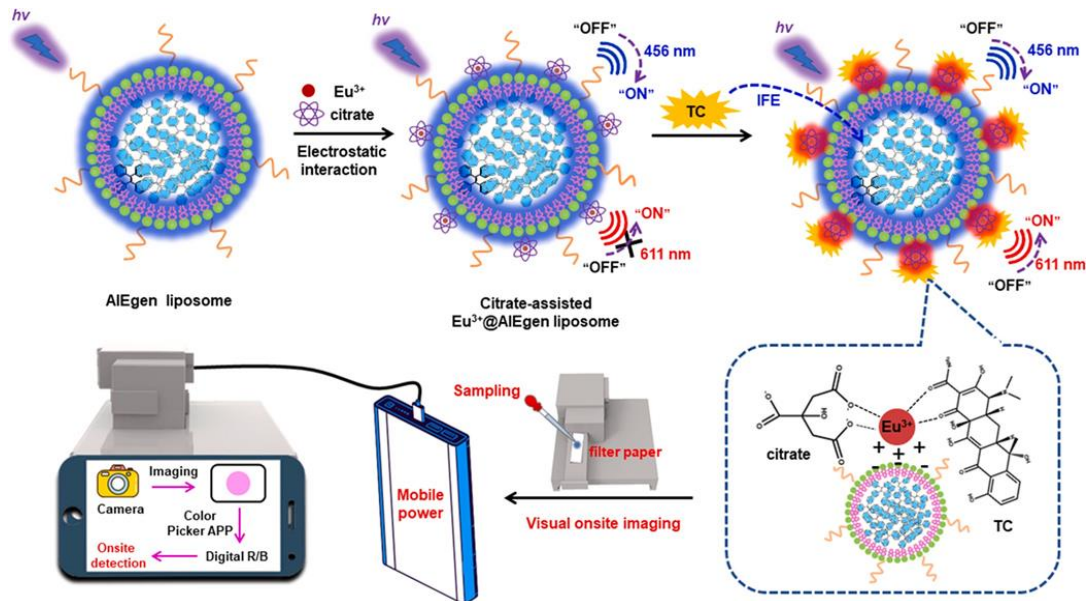
Φθορισμός είναι η ακτινοβολία που εκπέμπουν κάποια σώματα υπό ειδικές συνθήκες φωτισμού ή ακτινοβόλησης τους. Η απεικόνιση φθορισμού είναι η απεικόνιση φθοριζόντων βαφών ως ετικετών για βιολογικά ή χημικά μόρια ενδιαφέροντος. Καταλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πειραματικών παρατηρήσεων, όπως της θέσης της γονιδιακής έκφρασης, της έκφρασης των πρωτεϊνών και των μοριακών αλληλεπιδράσεων σε κύτταρα και ιστούς. Για να επισημανθεί ένα βιολογικό μόριο, θα πρέπει να εισαχθεί ένας φθορίζων δείκτης, ο οποίος έχει την ικανότητα να δεσμεύσει το μόριο-στόχο. Οι ρυθμίσεις που εκτελούν την απεικόνιση φθορισμού, περιλαμβάνουν μια μονοχρωματική πηγή φωτός, συνήθως ένα UV LED, για τη δημιουργία διέγερσης της βαφής και μια κάμερα smartphone που χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής για τη συλλογή και τη μέτρηση της έντασης φθορισμού. Τα συστήματα, που προτείνονται για μια συγκεκριμένη εφαρμογή ανίχνευσης, έχουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλους στόχους μέσω της χρήσης διαφορετικών ειδικών μοριακών χρωστικών. Έχει αποδειχθεί ότι η προσέγγιση του φθορισμού είναι πιο ευαίσθητη από τη χρωματομετρική προσέγγιση και η ενσωμάτωση ενός smartphone με τη συσκευή φθορισμού που βασίζεται στο δείγμα για ακριβή ποσοτικοποίηση θα ανοίξει ένα νέο δρόμο για μια πιο ελπιδοφόρα ανάλυση που θα εξασφαλίσει την ασφάλεια των τροφίμων.

3.5.1 Οπτική ανίχνευση τετρακυκλίνης

Η αξιόπιστη επιτόπια παρακολούθηση των υπολειμμάτων αντιβιοτικών αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα για τη δημιουργία ενός αποτελεσματικού μηχανισμού έγκαιρης προειδοποίησης για την ασφάλεια των τροφίμων. Ως αντιβιοτικό ευρέος φάσματος, η τετρακυκλίνη (TC) έχει εφαρμοστεί σε μεγάλο βαθμό στην κτηνοτροφία και την υδατοκαλλιέργεια λόγω του χαμηλού κόστους, της υψηλής αντιμικροβιακής της δράσης. (Hou et al., 2016, Li et al., 2020a). Η κατάχρηση της όμως, ως κτηνιατρικό φάρμακο για την πρόληψη βακτηριακών λοιμώξεων δημιουργεί υπολείμματα φαρμάκων σε τρόφιμα (όπως γάλα, κρέας, αυγό, ψάρι και μέλι), τα οποία αποτελούν σοβαρή απειλή για την ανθρώπινη υγεία, συμπεριλαμβανομένης της ηπατοτοξικότητας, των γαστρεντερικών διαταραχών, των αλλεργικών αντιδράσεων και της βακτηριακής αντοχής στα αντιβιοτικά (Wang et al., 2018, Han et al., 2020). Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θεσπίσει τα ανώτατα όρια καταλοίπων τετρακυκλίνης TC

στο γάλα σε 225 nM (Hu et al., 2020). Έτσι, για να διασφαλιστεί η ασφάλεια των τροφίμων, είναι ιδιαίτερα επιθυμητή η ανάπτυξη αποτελεσματικών πλατφορμών για την υπερευαίσθητη, οπτική και άμεση ανίχνευση κατάλοιπων της. Οι κβαντικές κουκίδες πυριτίου (SiQDs), διατηρούν μεγάλο δυναμικό εφαρμογής στην ανίχνευση και βιοατήμηση του φθορισμού λόγω των μοναδικών πλεονεκτημάτων τους, όπως η υψηλή φωτοσταθερότητα (Liu et al., 2020), η χαμηλή /μη τοξικότητα, η προεξέχουσα βιοσυμβατότητα και η προσαρμοστικότητα της επιφάνειας (Wang et al., 2020). Ειδικά, η χαμηλή /μη τοξικότητα καθιστά την πρακτική τους χρήση πιο ελκυστική σε σύγκριση με τις συμβατικές κβαντικές κουκίδες με βάση το μέταλλο (Morozova et al., 2020). Η ομάδα των Liu et al. χρησιμοποίησε ένα smartphone βασισμένο σε λογικομετρική πλατφόρμα ανίχνευσης φθορισμού για επιτόπια ανάλυση υπολειμμάτων τετρακυκλίνης TC, εκμεταλλευόμενη τον αποτελεσματικό συντονισμό της με το Eu^{3+} . Χρησιμοποίησε νανοφύλλα C_3N_4 συζευγμένα με Eu^{3+} ως σήματα φωταύγειας για να επιτύχει την ταχεία επιτόπια αναλογική φθορίζουσα απόκριση της τετρακυκλίνης σε smartphone. Επομένως, για την πραγματοποίηση επί τόπου αναλογικής φθορίζουσας απεικόνισης με βάση ένα smartphone για υπολείμματα τετρακυκλίνης TC, η βασική πρόκληση είναι να σχεδιαστούν και να προετοιμαστούν σταθερά υλικά φθορισμού που μπορούν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της μη ειδικής δέσμησης.

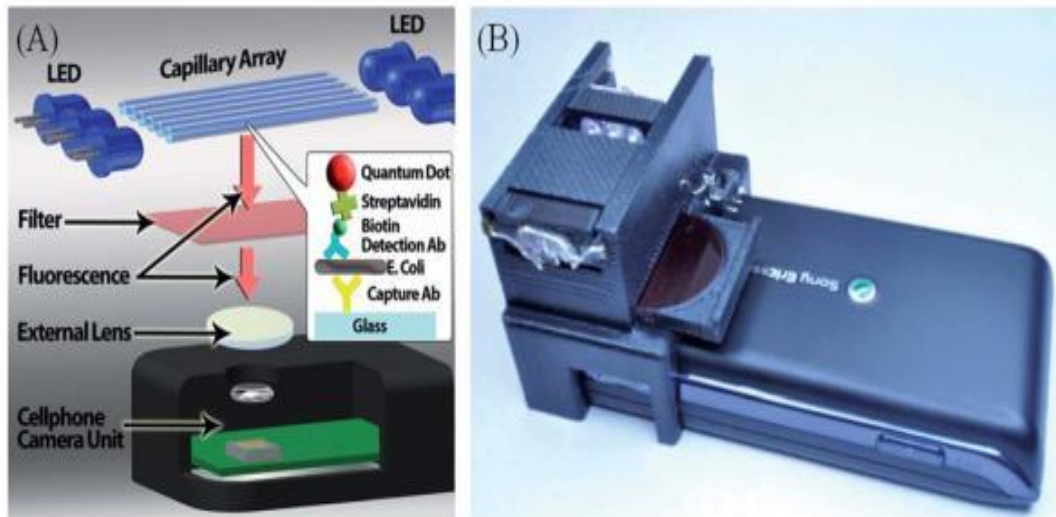
Συμπερασματικά, μετά το πείραμα αποδείχθηκε επιτυχώς ότι η μηχανική του smartphone θα χρησιμοποιηθεί ως ιδέα απόδειξης για την ακριβή και επιτόπια αναφορά των επιπέδων ρύπανσης του υπολείμματος τετρακυκλίνης TC σε πραγματικά δείγματα τροφίμων. Καθοδηγούμενη από την ευαισθητοποίηση του κιτρικού άλατος, η τετρακυκλίνη πυροδότησε αποτελεσματικά την αλλαγή της φωτεινής μπλε απεικόνισης φθορισμού του λιποσώματος Eu^{3+} @AIEgen σε ροζ απεικόνιση με την απλή διέγερση μιας λάμπας 365 nm, που αποδίδει την απόκριση αναλογίας φθορισμού διπλής εκπομπής. Με τα πλεονεκτήματα της υψηλής ευαισθησίας, της επιλεκτικότητας, του γρήγορου χρόνου απόκρισης και της οικονομικής αποδοτικότητας συγκεντρώθηκε γρήγορα ένα επίπεδο υπολειμμάτων τετρακυκλίνης TC που εξαρτάται από τις αναλογικές φθορίζουσες εικόνες με την ενσωματωμένη κάμερα, η οποία θα μπορούσε να αλλάξει περαιτέρω σε τιμές ψηφιακών έγχρωμων RGB μέσω της εγκατεστημένης εφαρμογής Color Picker APP, επιτυγχάνοντας έτσι την επιτόπια ποσοτική ανάλυση των υπολειμμάτων τετρακυκλίνης TC σε τρόφιμα (π.χ. γάλα, νερό βρύσης).



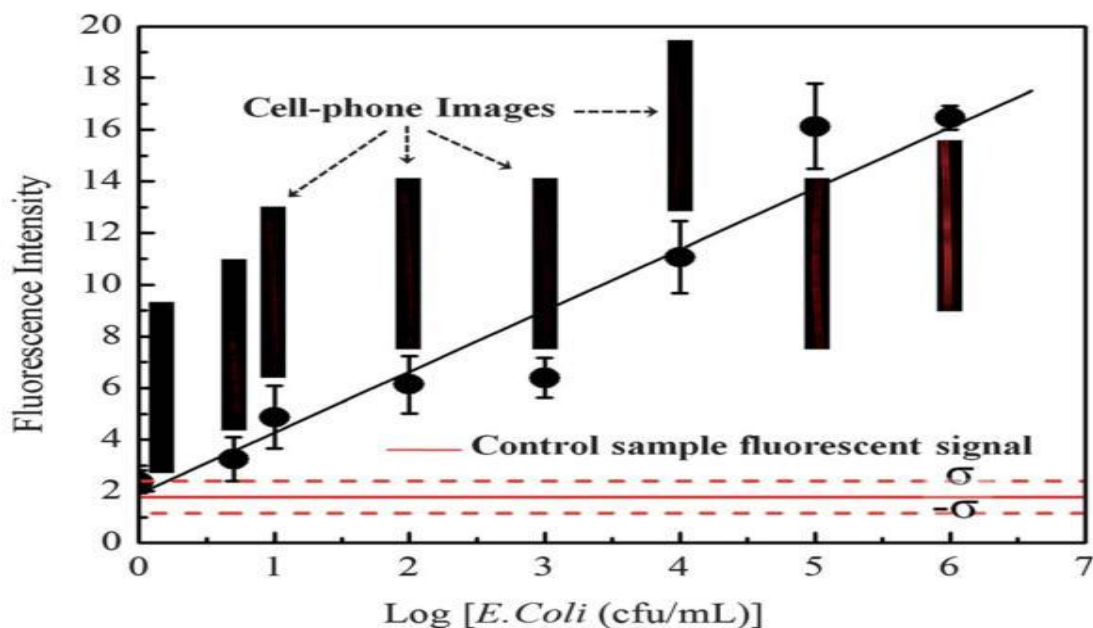
Εικόνα 18: Περιγραφή του φορητού αναλογικού αισθητήρα φθορισμού που αποκρίνεται σε TC ενσωματώνοντας το λιπόσωμα Eu^{3+} @AIEgen υποβοηθούμενο από κιτρικό άλας σε smartphone – Πηγή: Liu et al., 2017

3.5.2 Ανίχνευση *Escherichia coli* σε δειγμάτα νερού και τροφίμων

Το 2012, οι Zhu et al. ανέπτυξαν μια φορητή πλατφόρμα ανίχνευσης *Escherichia coli* για τον έλεγχο δειγμάτων νερού και τροφίμων. Η πλατφόρμα απεικόνισης φθορισμού που βασίζεται σε κινητό τηλέφωνο smartphone υλοποιήθηκε για να ποσοτικοποιήσει τη βακτηριακή συγκέντρωση σε ένα δείγμα νερού. Δευτερεύοντα αντισώματα, συζευγμένα με κβαντικές κουκκίδες, διανεμήθηκαν στα τριχοειδή αγγεία και χρησίμευσαν ως σήμα φθορισμού. Οι κβαντικές κουκκίδες είναι ανόργανοι νανοκρύσταλλοι με μοναδικές οπτικές και χημικές ιδιότητες που τους δίνουν εξαιρετική φωτεινότητα και φωτοσταθερότητα. Τα UV-LED ήταν αυτά που παρείχαν το σήμα διέγερσης. Η εκπομπή από τις κβαντικές κουκκίδες μέσω ενός πρόσθετου φακού μεταφέρθηκε στη μονάδα κάμερας του τηλεφώνου. Στην συνέχεια σχεδιάστηκε ένα ελαφρύ (~28 g) και συμπαγές εξάρτημα στην ήδη υπάρχουσα μονάδα κάμερας ενός κινητού τηλεφώνου έτσι ώστε να φιλοξενεί τη διαγνωστική πλατφόρμα. Με ποσοτικοποίηση της εκπομπής φωτός φθορισμού από κάθε τριχοειδή σωλήνα, προσδιορίστηκε η συγκέντρωση *E. coli* στο δείγμα (**Εικόνα 19**). Οι συγγραφείς επισήμαναν ότι η δοκιμή μπορεί να ολοκληρωθεί εντός 2 ωρών, συμπεριλαμβανομένης της προετοιμασίας του δείγματος, της φόρτωσης του δείγματος και της επώασης, με όριο ανίχνευσης 5–10 CFU/mL σε ρυθμιστικό διάλυμα. Έδειξαν επίσης, την αποτελεσματικότητα αυτής της προσέγγισης χρησιμοποιώντας ως δείγμα γάλα χωρίς λιπαρά, όπου επιτεύχθηκε ένα παρόμοιο όριο ανίχνευσης.



Εικόνα 19: Σχηματικό διάγραμμα (A) και εικόνα (B) του οπτικού προσαρτήματος για ανίχνευση *E. coli* σε smartphone χρησιμοποιώντας την ανάλυση σάντουιτς με βάση την κβαντική κουκκίδα σε γυάλινους τριχοειδείς σωλήνες. Ολόκληρο το εξάρτημα στο κινητό ζυγίζει ~28 γραμμάρια και έχει διαστάσεις ~3,5 × 5,5 × 2,4 cm. Αυτή η συμπαγής και ελαφριά μονάδα έχει οπτικό πεδίο απεικόνισης 11 mm × 11 mm και μπορεί να παρακολουθεί ~ 10 τριχοειδείς σωλήνες παράλληλα. Μπορεί επίσης να συνδεθεί και να αποσπαστεί επανειλημμένα από το σώμα του κινητού τηλεφώνου χωρίς να χρειάζεται λεπτή ευθυγράμμιση, καθιστώντας τη διεπαφή του αρκετά εύκολη στη χρήση – Πηγή: Zhu et al., 2012

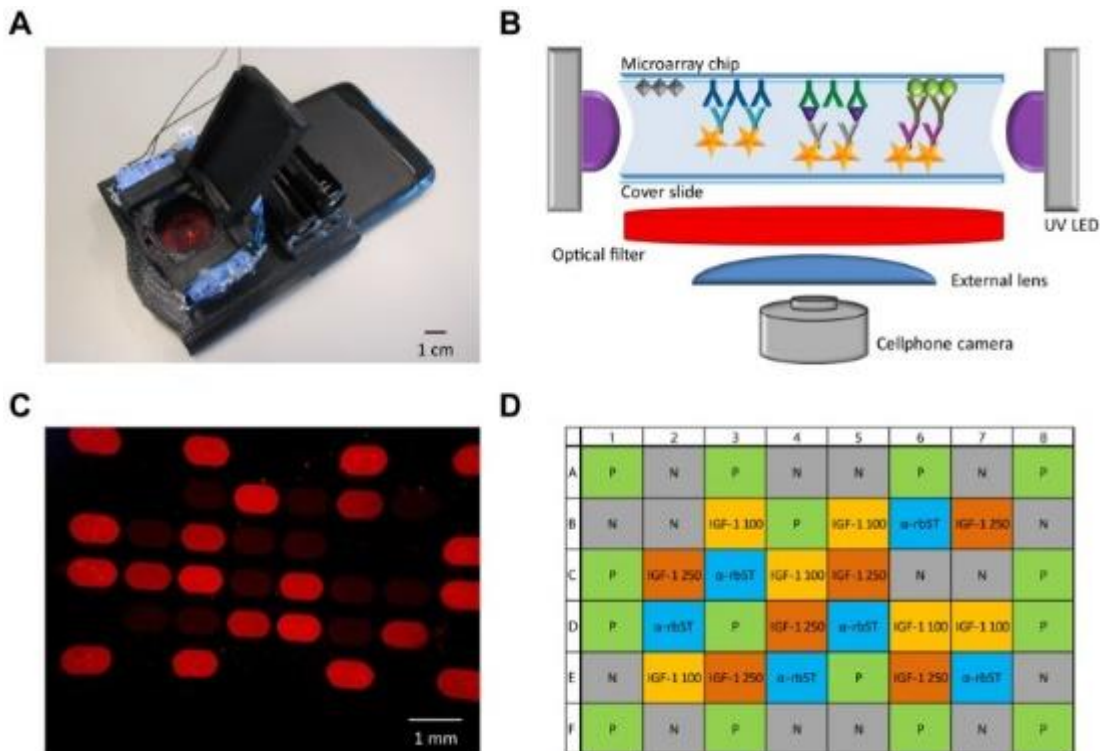


Εικόνα 20: Καμπύλη δόσης-απόκρισης για *E. coli* O157:H7 σε ρυθμιστικό διάλυμα ζελα-τίνης-PBS 2% χρησιμοποιώντας την ανάλυση με βάση την κβαντική κουκκίδα που εφαρμόστηκε σε κινητό τηλέφωνο. Αυτή η καμπύλη απόκρισης παρέχει μια γραμμική προσαρμογή ($F = 1,89 \times \log[E. coli] + 2,36$) με $R = 0,985$. Το όριο ανίχνευσης είναι ~5 έως 10 cfu mL⁻¹. Για κάθε σημείο μέτρησης, χρησιμοποιούνται 3 διαφορετικά δείγματα (δηλαδή, $n = 3$). Η τυπική απόκλιση (σ) για το επίπεδο σήματος φθορισμού του δείγματος ελέγχου είναι 0,62. – Πηγή: Zhu et al., 2012

3.5.3 Ανίχνευση σωματοτροπίνης βοοειδών (rbST) στο γάλα

Η ίδια τεχνική – ανοσοδοκιμασία φθορισμού μικροσφαιρών – χρησιμοποιήθηκε και από

τους Ludwig et al. το 2014 για την ανίχνευση της παρουσίας αντισωμάτων αντι-ανασυνδυασμένης σωματοτροπίνης βοοειδών (rbST) στο γάλα, ο οποίος είναι ένας ενισχυτής παραγωγής γάλακτος σε βοοειδή γαλακτοπαραγωγής, που είναι παράνομος στην Ευρωπαϊκή Ένωση και αποτελεί ανησυχία για τη δημόσια υγεία στις Η.Π.Α. Για τον σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε μια πλατφόρμα απεικόνισης βασισμένη σε κινητό τηλέφωνο για μια ανοσοδοκιμασία φθορισμού μικροσφαιρών που ανιχνεύει την παρουσία αντισωμάτων αντι-ανασυνδυασμένης σωματοτροπίνης βοοειδών (rbST) σε εκχυλίσματα γάλακτος. Το κινητό τηλέφωνο παρακολουθεί την παρουσία αντισωμάτων anti-rbST (rbST biomarker), τα οποία παράγονται ενδογενώς κατά τη χορήγηση του rbST και απεκκρίνονται στο γάλα. Ο βιοδείκτης rbST που υπάρχει στα εκχυλίσματα γάλακτος, συλλήφθηκε από τα rbST ομοιοπολικά συζευγμένος με παραμαγνητικές μικροσφαίρες και επισημάνθηκε με αντισώματα ανίχνευσης συζευγμένα με κβαντική κουκκίδα (QD). Το εκπεμπόμενο φως φθορισμού από αυτά τα ληφθέντα (QD) απεικονίστηκε στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την κάμερα του κινητού τηλεφώνου. Επιπλέον, λήφθηκε μια εικόνα σκοτεινού πεδίου στην οποία όλες οι μικροσφαίρες που υπήρχαν ήταν ορατές. Οι μικροεικόνες φθορισμού και σκοτεινού πεδίου αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας μια προσαρμοσμένη εφαρμογή Android που εκτελείται ταυτόχρονα στο ίδιο κινητό τηλέφωνο. Με αυτή τη ρύθμιση, η ανοσοδοκιμασία φθορισμού μικροσφαιρών και η ανίχνευση με βάση το κινητό τηλέφωνο εφαρμόστηκαν με επιτυχία σε εκχυλίσματα δειγμάτων γάλακτος από αγελάδες που υποβλήθηκαν σε αγωγή με rbST και χωρίς θεραπεία. Επιτεύχθηκε 80% αληθές-θετικό ποσοστό και 95% αληθές-αρνητικό ποσοστό. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί σε οποιοδήποτε διαθέσιμο κινητό τηλέφωνο που διαθέτει μονάδα κάμερας απλώς τροποποιώντας τις διαστάσεις της θήκης κινητού τηλεφώνου (**Εικόνα 21**). Αξίζει να αναφερθεί ότι, η πλατφόρμα ανίχνευσης που βασίζεται σε smartphone συγκρίθηκε έναντι μιας νέας εναλλακτικής διάταξης επίπεδης απεικόνισης που αναπτύχθηκε πρόσφατα και βρέθηκε ότι έχει εξίσου απόδοση σε σχέση με την πολύ πιο εξελιγμένη εναλλακτική. Η χρήση της επιτόπιας ανάλυσης που βασίζεται σε κινητό τηλέφωνο σε μελλοντική παρακολούθηση υπολειμμάτων μπορεί να περιορίσει τον αριθμό των δειγμάτων για εργαστηριακή ανάλυση ήδη σε πρώιμο στάδιο. Με αυτόν τον τρόπο, ολόκληρη η διαδικασία παρακολούθησης μπορεί να γίνει πολύ πιο αποτελεσματική και οικονομική.



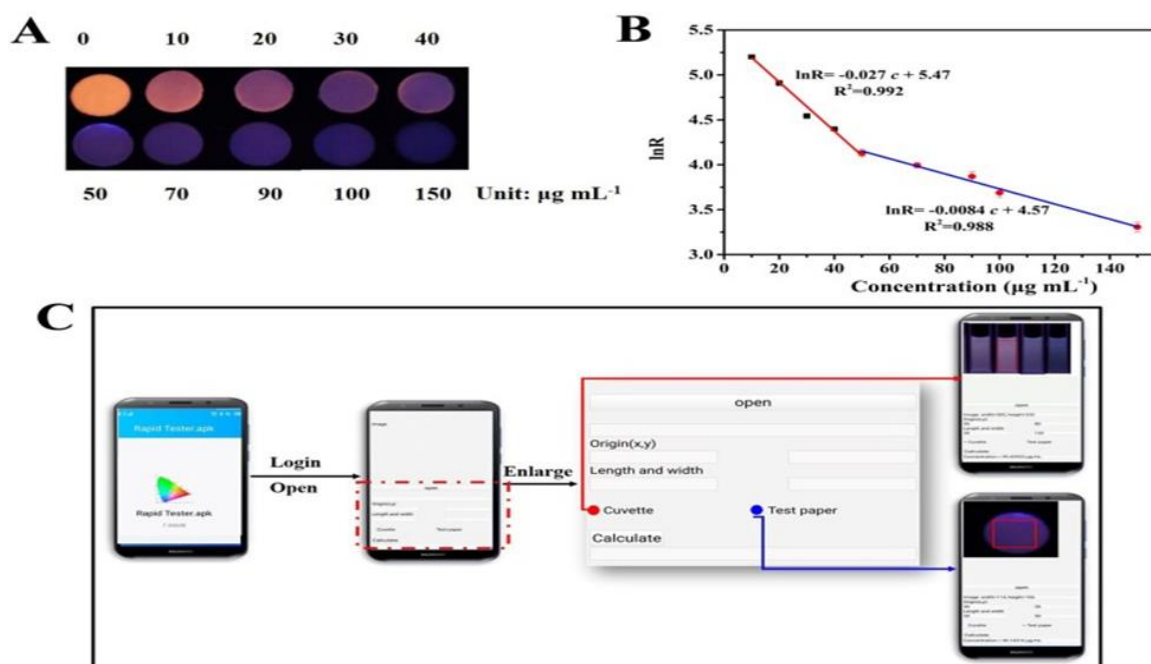
Εικόνα 21: Smartphone με προσάρτηση μικροσκοπίου φθορισμού, ρύθμιση ανίχνευσης και εικόνα μικροσυστοιχίας: (A) Φωτογραφία του τρισδιάστατου ε-κτυπωμένου προσαρτήματος μικροσκοπικής απεικόνισης στο smartphone που χρησιμοποιήθηκε για ανάλυση, (B) Ρύθμιση της πλατφόρμας ανίχνευσης βιοδεικτών smartphone, (C) Ενδεικτική εικόνα μικροσυστοιχίας που ελήφθη χρησιμοποιώντας το μικροσκόπιο φθορισμού smartphone, (D) Διάταξη μικροσυστοιχίας για κηλίδες τεσσάρων διαφορετικών πρωτεϊνών: ανασυνδυασμένη βόεια σωματοτροπίνη (rbST) για την ανίχνευση του βιοδείκτη αντισώματος anti-rbST (α -rbST, μπλε), αντίσωμα κατά του αυξητικού παράγοντα-1 (IGF-1) που μοιάζει με ινσουλίνη (με κηλίδες σε δύο συγκεντρώσεις: 100 $\mu\text{g mL}^{-1}$ και 250 $\mu\text{g mL}^{-1}$) για την ανίχνευση του βιοδείκτη IGF-1 (IGF-1 100, κίτρινο, IGF-1 250, πορτοκαλί), ωλοευκωματίνη ως αρνητικό μάρτυρα (N, γκρι) και IgG προβάτου ως θετικό μάρτυρα (P, πράσινο) – Πηγή: Ludwig et al., 2014

3.5.4 Οπτική ανίχνευση πράσινου μαλαχίτη

Η δημιουργία μιας έξυπνης, ευαίσθητης και ταχείας ανίχνευσης κτηνιατρικών υπολειμμάτων είναι μια επιτακτική ανάγκη για τη διασφάλιση της ποιότητας και της ασφάλειας των τροφίμων. Ο πράσινος μαλαχίτης (MG) αποτελεί ένα από τα πιο τοξικά κτηνιατρικά υπολείμματα λόγω της πιθανής καρκινογένεσης και τερατογένεσης του σε ζώα και ανθρώπους (Hu et al., 2021, Luo et al., 2018). Πολλές χώρες έχουν απαγορεύσει την χρήση του στην υδατοκαλλιέργεια και την παραγωγή τροφίμων, παρόλα αυτά χρησιμοποιείται παράνομα λόγω του αντιβακτηριακού του φάσματος, του χαμηλού κόστους και της διαθεσιμότητάς του (Abbasi et al., 2020, Ju et al., 2018).

Οι αισθητήρες φθορισμού πλεονεκτούν σε σχέση με το ανθρώπινο μάτι, ιδιαίτερα στην ικανότητα ανάγνωσης για προσδιορισμό των αναλυτών με τη βοήθεια μιας α-









πλής λάμπας υπεριώδους (UV). Οι Xiaoqun Yue et al ανέπτυξαν μια φορητή συσκευή ανάλυσης με βάση το χαρτί φωταύγειας για την ανάπτυξη μιας εύκολης, γρήγορης και έξυπνης μεθόδου για να ανιχνεύσουν τον πράσινο μαλαχίτη MG. Οι φωτεινές έγχρωμες εικόνες με ποικίλες συγκεντρώσεις MG τραβήχτηκαν με smartphone για να γίνει το φωταυγές χαρτί προσβάσιμο για επιτόπια εφαρμογή (Εικόνα 22). Όταν προστέθηκαν οι διαφορετικές συγκεντρώσεις MG, το φωτεινό χρώμα του χαρτιού της δοκιμαστικής ταινίας άλλαξε από πορτοκαλί σε μπλε κάτω από μια λάμπα UV 365 nm.



Εικόνα 22: (A) Αναλογικές φθορίζουσες εικόνες του επικαλυμμένου με ανιχνευτή δι-ηθητικού χαρτιού κάτω από μια λάμπα UV 365 nm μετά από επώαση με MG σε διαφορετικές συγκεντρώσεις (0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 100, 150 µg/mL), (B) Σχεδιάσμος των τιμών lnR που ενεργοποιούνται από τη χρωματική παραλλαγή σε σχέση με τις συγκεντρώσεις MG στην περιοχή από 0 έως 150 µg/mL, (C) Σχηματική απεικόνιση της χρήσης της σχεδιασμένης εφαρμογής για την ανίχνευση MG. – Πηγή: Xiaoqun Yue et al., 2021

Στην συνέχεια, μια εφαρμογή για κινητά με το όνομα "Rapid Tester" σχεδιάστηκε έτσι ώστε να επιτευχθεί έξυπνη ανίχνευση. Τα smartphones μπορούσαν να συλλάβουν εύκολα τις εικόνες λόγω της κάμερας τους που έχει υψηλή ανάλυση. Ο απώτερος στόχος του ανεπτυγμένου αισθητήρα φθορισμού ήταν η πρακτική εφαρμογή του. Το προτεινόμενο αυτό σύστημα ανίχνευσης χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση μαλαχίτη MG σε δείγματα κυπρίνου και σταυροειδών. Ο Πίνακας 3 δείχνει ότι τα αποτελέσματα ανίχνευσης που λήφθηκαν χρησιμοποιώντας το φασματοφωτόμετρο φθορισμού και το smartphone ήταν σε καλή συμφωνία με αυτά που ελήφθησαν χρησιμοποιώντας υγρή χρωματογραφία HPLC.

Πίνακας 3: Αποτελέσματα προσδιορισμού της MG με χρήση HPLC, φασματοφωτόμετρο φθορισμού και χαρτί φθορισμού με τη βοήθεια smartphone (n = 3).

Είδος Δείγματος	Δείγμα (μg mL ⁻¹)	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ							
		Προτεινόμενος αισθητήρας (μg mL ⁻¹)	HPLC (μg mL ⁻¹)	Εικόνες	Μετρήση με smartphone	Ανάκτηση (%) που λαμβάνεται από τον προτεινόμενο αισθητήρα	RSD (%) που λαμβάνεται από τον προτεινόμενο αισθητήρα	Ανάκτηση (%) μετρημένη από smartphone	RSD (%) μετρημένο από smartphone
Κυπρίνου	0	ND	ND		ND	–	–	–	–
	5	5.05	4.47		4,55	101.00	4,69	91.00	1,54
	10	8.53	8.13		10.06	85.30	1,53	100,60	4.62
	20	16.59	16.06		22.60	82,95	1,60	113.00	3.56
Σταυροειδές	0	ND	ND		ND	–	–	–	–
	5	5,40	5.27		4.73	108.00	2.56	94,60	6,55
	10	8.19	8.24		9,85	81,90	1.00	98,50	2,50
	20	16.82	17.52		21.75	84.10	1.31	108,75	4.44

Επίσης, η μέθοδος που αναπτύχθηκε έδειξε ικανοποιητικές ανακτήσεις που κυμαίνονται από 81,90% έως 108,00% και χαμηλές σχετικές τυπικές αποκλίσεις (RSD) 1,00%-4,69%. Το RSD υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση $RSD = \sigma/c$ (σ είναι η τυπική απόκλιση 3 τυφλών δειγμάτων, c είναι η μετρηθείσα μέση συγκέντρωση 3 δειγμάτων). Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος είναι εξαιρετικά ακριβής και αξιόπιστη και μπορεί να εφαρμοστεί για την ανίχνευση μαλαχίτη MG σε δείγματα.

3.5.5 Ανίχνευση πολλαπλών φυτοφαρμάκων με φθορισμό

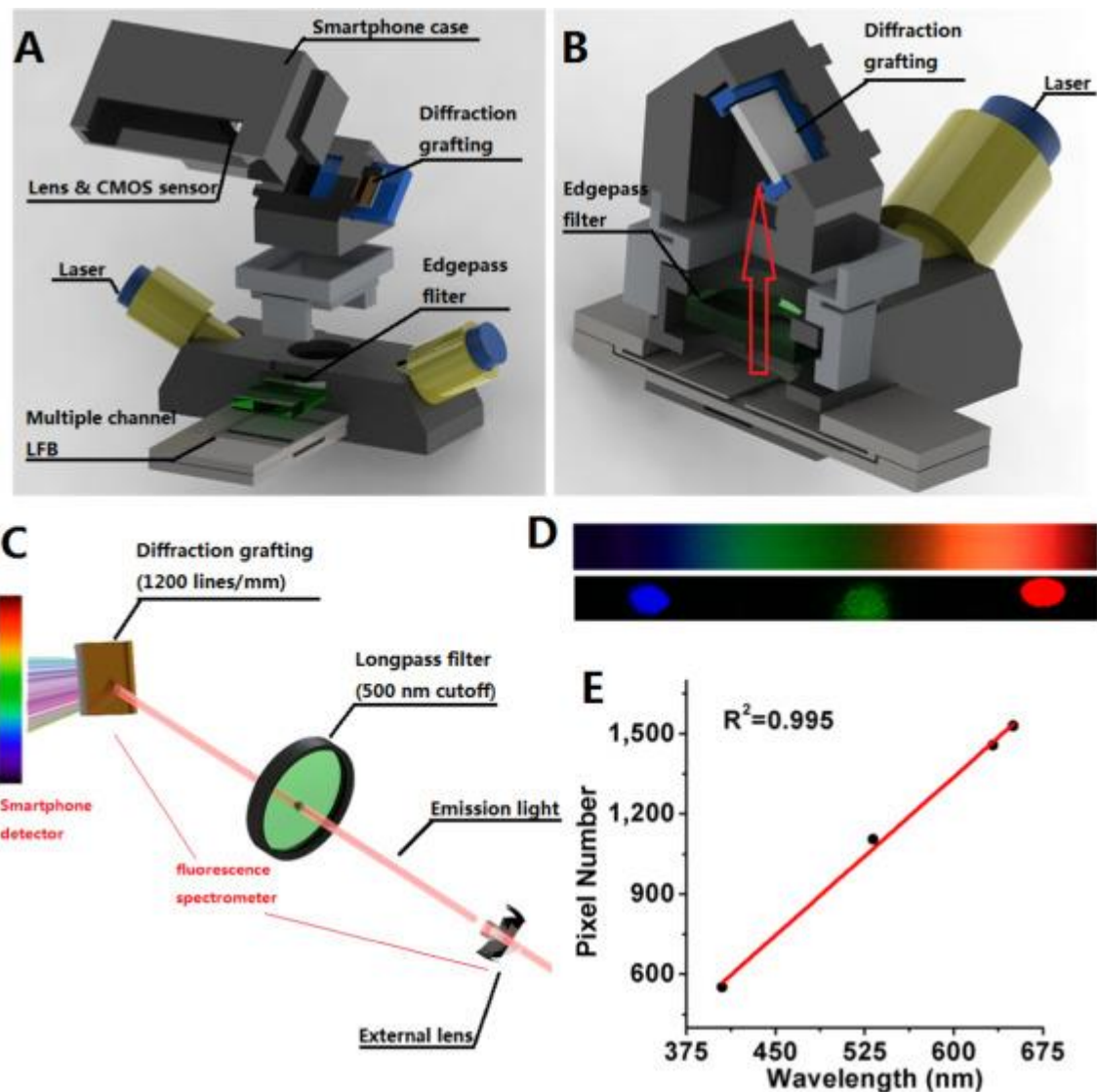
Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενες ενότητες, η ευρεία χρήση πολλαπλών φυτοφαρμάκων έχει προκαλέσει σοβαρή ανησυχία σχετικά με τις επιπτώσεις τους τόσο στο φυσικό περιβάλλον όσο και στην ανθρώπινη υγεία (Calvert et al. 2004, Pingali and Roger, 2012). Μια βασική λύση του προβλήματος έτσι ώστε να υπάρχει εποπτεία των φυτοφαρμάκων, είναι η συνεχής καινοτομία και η πρόοδος της τεχνολογίας ανίχνευσης.

Οι Nan Cheng et al αναπτύξαν έναν βιοαισθητήρα πλευρικής ροής με βάση το απταμερές φθορισμού (apta-LFB) ενσωματωμένο με νανοζεύγη σβέσης φθοροφόρων και έναν αναγνώστη φάσματος smartphone έτσι ώστε να επιτευχθεί ανίχνευση του τριπλού στόχου chlorpyrifos, diazinon και malathion. Ο συγκεκριμένος σχεδιασμός αντιπροσωπεύει τρία κύρια πλεονεκτήματα: α) χρησιμοποιεί απταμερή ως στοιχεία αναγνώρισης αντί για αντισώματα, επιτυγχάνοντας ταυτόχρονη ανίχνευση τριπλού αναλύτη (chlorpyrifos, diazinon και malathion), β) ανιχνεύει ένα εξαιρετικά ευαίσθητο σήμα «ενεργοποίησης» που λειτουργεί με βάση ένα νέο σύστημα σβέσης φθορισμού (QDs-AuNSs), γ) λαμβάνει μια ανάγνωση μηδενικού φόντου χρησιμοποιώντας έναν τρισδιάστατο εκτυπωμένο αναγνώστη που βασίζεται σε smartphone που μετρά τα πλήρη φάσματα εκπομπής του φθορίζοντος apta-LFB, σηματοδοτώντας την πρώτη επιτυχημένη εφαρμογή σε LFB. Η διαδικασία είναι η εξής: Τα απταμερή χρησιμεύουν ως εναλλακτικά στοιχεία αναγνώρισης αντί για αντισώματα στο LFB, προσφέροντας καλύτερη σταθερότητα. Ένα νέο νανο-ζεύγος φθοροφόρων-σβεστών (νανοσφαιρίδια κβαντικών κουκκίδων και AuNSs -χρυσά νανοστάρ) εφαρμόστηκε για την εκτέλεση "signal-on" αντί για "signal-off". Μετά τη βελτιστοποίηση, το όριο ανίχνευσης των chlorpyrifos, diazinon και malathion προσδιορίστηκε ότι είναι 0,73 ng/mL, 6,7 ng/mL και 0,74 ng/mL, αντίστοιχα. Η αυξημένη ευαισθησία μπορεί να προέλθει από τον συνδυασμό βελτιωμένου σήματος και μηδενικού φόντου. Αυτή η καινοτόμος στρατηγική μέθοδος επέτρεψε τη μείωση του ορίου ανίχνευσης του επιπέδου υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων στα τρόφιμα, το οποίο θεωρείται σε μεγάλο βαθμό ικανοποιητικό. Η ακρίβεια και η πρακτικότητα αυτού του σχεδιασμού για αποτελεσματική επιτόπια ποσοτικοποίηση των πολλαπλών φυτοφαρμάκων επιβεβαιώθηκαν περαιτέρω χρησιμοποιώντας 12 δείγματα λαχανικών και φρούτων. Οι εκτιμώμενες ανακτήσεις ήταν μεταξύ 82,4% και 112,8% σε δείγματα λαχανικών, γεγονός που επιβεβαίωσε ότι η μέθοδος

που αναπτύχθηκε είναι ικανή να ανιχνεύει πολλαπλά φυτοφάρμακα σε δείγματα τροφίμων. Η συγκεκριμένη μέθοδος ανοίγει τον δρόμο έτσι ώστε μελλοντικά να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο για πρακτική εφαρμογή επιτόπιων αναλύσεων και ποσοτικοποίηση πολλαπλών φυτοφαρμάκων. Σημειώνεται ότι τα **Golden nanostars** είναι τελευταίας τεχνολογίας μεταλλικά νανοσωματίδια που διαθέτουν εγγενή χαρακτηριστικά όπως αξιοσημείωτες οπτικές ιδιότητες και εξαιρετικές φυσικοχημικές δραστηριότητες. Αυτά τα νανοσωματίδια χρυσού σε σχήμα αστεριού μπορούν κυρίως να χρησιμοποιηθούν σε βιοαισθητήρες, φωτοθερμική θεραπεία, απεικόνιση, φασματοσκοπία Raman ενισχυμένης επιφάνειας και εφαρμογές χορήγησης φαρμάκων στόχων λόγω της χαμηλής τοξικότητάς τους και των εξαιρετικών οπτικών χαρακτηριστικών τους (Chin Wei Lai et al., 2020).

3.5.6 Ανίχνευση δειγμάτων επί του πεδίου

Τα λαχανικά και τα φρούτα θεωρούνται προϊόντα υψηλού κινδύνου υπολειμμάτων φυτοφαρμάκων. Πραγματοποιήθηκε ανίχνευση σε δείγματα από 13 λαχανικά και φρούτα, τα οποία είναι: ο αραβόσιτος, το μακρύ φασόλι, το κουνουπίδι, η μελιτζάνα, τα μανιτάρια, τα shiitake μανιτάρια, το μήλο, το πορτοκάλι, η ντομάτα, το βατόμουρο, το σπανάκι, το μαρούλι, το λάχανο. Και τα 13 δείγματα τροφίμων έδειξαν «μη ανιχνευμένα» αποτελέσματα σε chlorpyrifos, diazinon και malathion με αέρια χρωματογραφία (NY/T 761–2008, πρότυπο γεωργικής βιομηχανίας της Κίνας) και στην προτεινόμενη μέθοδο των Nan Cheng et al. (2018). Παρασκευάστηκε μια σειρά διαφορετικών συγκεντρώσεων δειγμάτων με ακίδα (100 ng/mL, 50 ng/mL και 10 ng/mL). Τα ποσοστά ανάκτησης εκτιμήθηκαν μεταξύ 83,4% και 110,7% για την αέρια χρωματογραφία και μεταξύ 82,4% και 112,8% για την προτεινόμενη μέθοδο των συγγραφέων. Τα δεδομένα αποκάλυψαν ότι δεν υπήρχε διαφορά μεταξύ των δύο δοκιμασιών, επιβεβαιώνοντας την ακρίβεια του ανεπτυγμένου φορητού συστήματος για την ανίχνευση πολλαπλών φυτοφαρμάκων. **(Εικόνα 23)** Συμπερασματικά, τα συγκεκριμένα αποτελέσματα έδειξαν ότι έχει σημαντική δυνατότητα για πρακτική εφαρμογή στην ανάλυση τροφίμων.



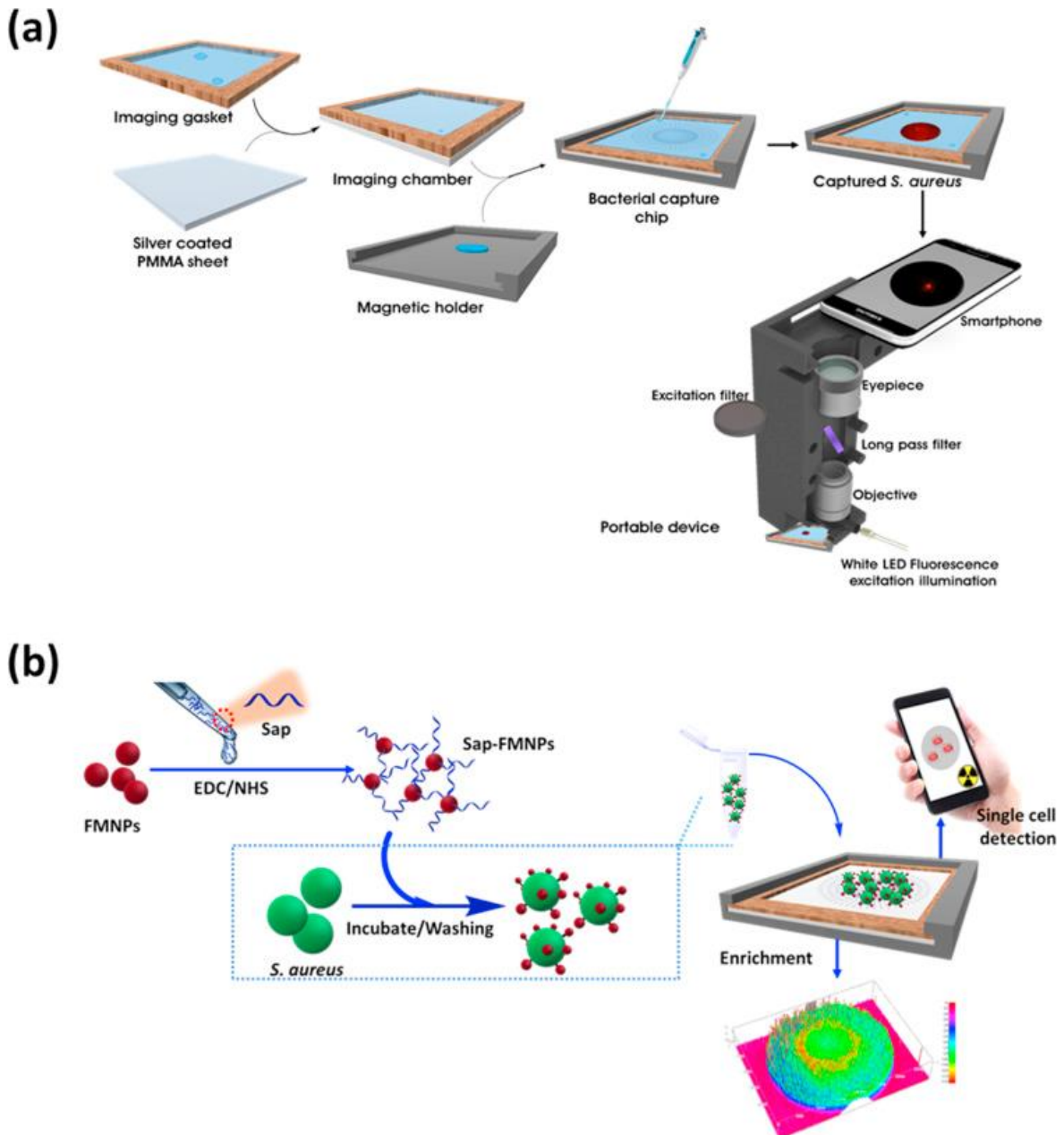
Εικόνα 23: Αναγνώστης φάσματος φθορισμού κινητού τηλεφώνου: (A) Ανατομία της συσκευής, (B) Σχηματική πλάγια όψη που δείχνει την εσωτερική δομή, (C) Αρχή ανίχνευσης φθορισμού που βασίζεται σε smartphone: Το λέιζερ διέγερσης (405 nm) φωτίζει τη ζώνη ελέγχου που περιέχει τα διπλά εξαρτήματα ανιχνευτή-στόχου όπου ένα μέρος της εκπομπής συγκεντρώνεται - μέσω ενός φακού συλλογής προσανατολισμένου κάθετα στο λέιζερ - και αποστέλλεται μέσω φίλτρου, σε ένα πλέγμα περίθλασης που τοποθετείται ακριβώς μπροστά από την κάμερα, (D) εικόνες ευρυζωνικού φωτός, κόκκινου, πράσινου και μπλε δείκτες λέιζερ πάνω από την οθόνη smartphone, (E) Βαθμονόμηση pixel σε σχέση με το μήκος κύματος με τρεις δείκτες λέιζερ. – Πηγή: Nan Cheng et al., 2018

3.5.6.1 Ποσοτική ανίχνευση με φθορισμό του βακτηρίου *Staphylococcus aureus* σε δείγμα γάλακτος φιστικιού

Υπάρχει επιτακτική ανάγκη να πραγματοποιείται αξιόπιστη επιτόπια ανίχνευση βακτηριακών παθογόνων σε διάφορα δείγματα τροφίμων με γρήγορο και ποσοτικό τρόπο. Οι Sajal Shrivastava et al., (2018) πραγματοποίησαν πείραμα για την ανίχνευση του *Staphylococcus aureus* που βασίζεται σε smartphone χωρίς καλλιέργεια από ελάχιστα επεξεργασμένα υγρά δείγματα γάλακτος φιστικιού, χρησιμοποιώντας φθορίζοντα μαγνη-

τικά νανοσωματίδια λειτουργικά με απταμερές. Τα κύτταρα του *S. aureus* που είχαν επισημανθεί καταγράφηκαν μαγνητικά, σε μια κασέτα ανίχνευσης και στη συνέχεια απεικονίστηκε ο φθορισμός χρησιμοποιώντας μια κάμερα smartphone και μια δίοδο εκπομπής φωτός ως πηγή διέγερσης. Η πλατφόρμα σε smartphone έχει την ικανότητα να εκμεταλλεύεται τις διπλές λειτουργίες των μαγνητικών νανοσωματιδίων φθορισμού (FMNPs) για ταυτόχρονη σύλληψη στο τσιπ και την ποσοτική ανίχνευση βακτηρίων με απεικόνιση smartphone (**Εικόνα 24**). Συνοπτικά τα βήματα είναι τα εξής: (α) Ένα εξαιρετικά ανακλαστικό, πολυανθρακικό φύλλο με εναπόθεση αργύρου προσαρτήθηκε σε ένα βύσμα για την κατασκευή ενός σφραγισμένου θαλάμου με εισόδους σε δύο γωνίες για φόρτωση και πλήση του δείγματος. Ένα στήριγμα τοποθετημένο σε μαγνήτη εκτυπώθηκε σε 3D και ο σφραγισμένος θάλαμος εισήχθη για να δημιουργηθεί μια κασέτα ανίχνευσης βακτηρίων. Μόλις φορτωθεί με υγρό δείγμα, η κασέτα βακτηριακής ανίχνευσης αφέθηκε να συλλάβει το παθογόνο στόχο, το οποίο ακολούθησε πλήση και απεικόνιση με μικροσκόπιο φθορισμού smartphone ειδικά σχεδιασμένο για απεικόνιση φθορισμού με δίοδο εκπομπής φωτός. (β) Ένα ειδικό απταμερές *S. aureus* (Sap) προσαρτήθηκε ομοιοπολικά σε φθορίζοντα μαγνητικά νανοσωματίδια (FMNPs). Τα συζευγμένα με Sap FMNPs (Sap-FMNPs) χρησιμοποιήθηκαν για την επισήμανση βακτηρίων-στόχων και αυτά τα βακτήρια με φθορισμό επισημάνθηκαν στη συνέχεια σε ένα ελάχιστα επεξεργασμένο, πολύπλοκο υγρό δείγμα. Τα δείγματα φορτώθηκαν στην κασέτα ανίχνευσης βακτηρίων για σύλληψη και μετέπειτα ποσοτικοποίηση χρησιμοποιώντας απεικόνιση smartphone. Η σύλληψη των βακτηριδίων από το δείγμα απαιτούσε περίπου 10 λεπτά και ο φθορισμός από τα βακτηριακά κύτταρα απεικονίστηκε χρησιμοποιώντας μια κάμερα smartphone. Επιπλέον, αξίζει να επισημανθεί ότι η συσκευή που βασίζεται σε smartphone αποτελείται από μια κασέτα ανίχνευσης βακτηριδίων μιας χρήσης και μια δίοδο εκπομπής λευκού φωτός (LED) ενσωματωμένο στο smartphone που απαιτεί ελάχιστη ισχύ για τη λειτουργία του. Η εν λόγω προσέγγιση που βασίζεται σε smartphone μπορεί να ανιχνεύσει μεμονωμένα βακτήρια και δεν απαιτεί περίπλοκες διαδικασίες και προ-επεξεργασίες των δειγμάτων. Τα αποτελέσματά που προέκυψαν, τους έδειξαν την ικανότητα της μεθόδου ποσοτικής ανίχνευσης με ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση τόσο χαμηλή περίπου στο 10 CFU/mL μετρώντας μεμονωμένα κύτταρα βακτηρίων, συλλαμβάνοντας αποτελεσματικά κύτταρα *S. aureus* απευθείας από ένα δείγμα γάλακτος φιστικιού. Αναφορικά, η επιλεκτικότητα της ανίχνευσης διερευνήθηκε με τη χρήση δειγμάτων και με άλλα παθογόνα βακτήρια και δεν προέκυψε σημαντική

μη ειδική ανίχνευση. Επιπλέον, στελέχη *S. aureus* από διάφορες προελεύσεις έδειξαν συγκρίσιμα αποτελέσματα, διασφαλίζοντας ότι η προσέγγιση μπορεί να υιοθετηθεί ευρέως. Συμπερασματικά, η μέθοδος ποσοτικής απεικόνισης φθορισμού σε ένα smartphone θα μπορούσε να διευκολύνει την επιτόπια ανίχνευση βακτηρίων, παρέχοντας μεγάλη βοήθεια κατά τη διάρκεια μεγάλων εστιών μολυσματικών ασθενειών σε απομακρυσμένες και περιορισμένες σε πόρους περιοχές.



Εικόνα 24: Σχηματική αναπαράσταση σύλληψης βακτηρίων και ποσοτική ανίχνευση από ελάχιστα επεξεργασμένα δείγματα. Πηγή:Sajal Shrivastava et al., 2018

3.6 Φασματοσκοπία Smartphone

Οι νέες τεχνολογίες για τον έλεγχο των τροφίμων που βασίζονται σε smartphone, έχουν

την δυνατότητα να φέρουν επανάσταση στον τομέα των τροφίμων επιτρέποντας ταχεία, επιτόπια και οικονομική ανάλυση τροφίμων και προϊόντων διατροφής (Rateni et al., Dario, & Cavallo, 2017). Αυτή η δυνατότητα αναγνωρίστηκε και από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) όπου το 2016 πραγματοποιήθηκε διαγωνισμός με τίτλο «Food Scanner» για την ανάπτυξη προσιτών και μη επεμβατικών εφαρμογών για κινητές συσκευές, που θα επιτρέπουν στους χρήστες να μετρούν και να αναλύουν τα τρόφιμα που είναι προς κατανάλωση. Νικητές αναδείχθηκαν τρεις ευρωπαϊκές νεοφυείς επιχειρήσεις: η Spectral Engines (νικητής), η SCIO (επιλαχούσα) και η TellSpec (επιλαχούσα) (Horizon, 2016). Αυτές οι τρεις εταιρείες έχουν αναπτύξει νέες εφαρμογές διάγνωσης τροφίμων που βασίζονται σε smartphone χρησιμοποιώντας την αναλυτική δύναμη της φασματοσκοπίας εγγύς υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIRS). Σε αντίθεση με την προσέγγιση που βασίζεται στους βιοαισθητήρες, στην οποία είναι απαραίτητο ένα αντιδραστήριο για να ενεργοποιηθεί η μεταγωγή, στην περίπτωση αυτή η ανάλυση πραγματοποιείται με μη επεμβατικό τρόπο. Τα NIRS χρησιμοποιούν τη φασματική περιοχή από 800 nm έως 2500 nm προκειμένου να παρέχουν χημικές πληροφορίες μέσω της διαφορετικής απόκρισης των μοριακών δεσμών και των δομικών πληροφοριών του σαρωμένου δείγματος (Burns & Ciurczak, 2007). Όσον αφορά στις εμπορικές εφαρμογές, ένας μεγάλος αριθμός startups παγκοσμίως προσφέρουν NIRS που βασίζονται σε smartphone εκτινάσσοντας τις τεχνολογικές εξελίξεις στην κατασκευή μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMS) και συστοιχιών μικροκατοπτρισμού μεγάλου όγκου. Οι τρέχουσες εξελίξεις κατέστησαν δυνατή την κατασκευή μικροσκοπικών και φθηνών φασματόμετρων NIR, διατηρώντας όμως παράλληλα την απόδοση σε παρόμοια επίπεδα με τον εξοπλισμό ενός πάγκου εργαστηρίου. (Ozcan, 2016). Τα ερευνητικά πειράματα που θα δούμε στην παρούσα ενότητα, ανήκουν στη μακρο-κατηγορία οπτικών διαγνωστικών. Ειδικότερα, η φασματοσκοπία είναι ένα ισχυρό εργαλείο στην έρευνα και τις βιομηχανικές εφαρμογές. Χρησιμοποιείται ευρέως και επιτυχώς σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν διαγνωστικά, αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων, περιβαλλοντική ανίχνευση και δοκιμές ανάλυσης φαρμάκων. Τα τελευταία χρόνια λόγω των προόδων στην τεχνολογία και τις μεθόδους κατασκευής τους, έχουν πραγματοποιηθεί περισσότερα φορητά φασματόμετρα. Η τεχνολογική πρόοδος επέτρεψε την απελευθέρωση μικροφασματομετρικών που εκμεταλλεύονται νέες μικρο-τεχνολογίες όπως μικροηλεκτρομηχανικά συστήματα (MEMS), μικρο-οπτο-ηλεκτρομηχανικά συστήματα (MOEMS), συστοιχίες μι-

κρο-καθρέφτη κ.λπ. Ο απώτερος σκοπός, μελλοντικά είναι η ενσωμάτωση ενός φασματόμετρου σε ένα smartphone, έτσι ώστε να αξιοποιηθούν οι εξαιρετικά αποδοτικές δυνατότητες επεξεργασίας στη συμπαγή διαμόρφωση, για να προσφέρει φασματοσκοπικές πληροφορίες σε οποιοδήποτε σημείο ελέγχου χρειαζόμαστε, καθώς θα χρησιμοποιήσουν τη μεγάλη κοινότητα χρηστών για να δημιουργήσουν τράπεζες δεδομένων με βάση τη μηχανική εκμάθηση μέσω εφαρμογών (Βουγέ et al., 2016).

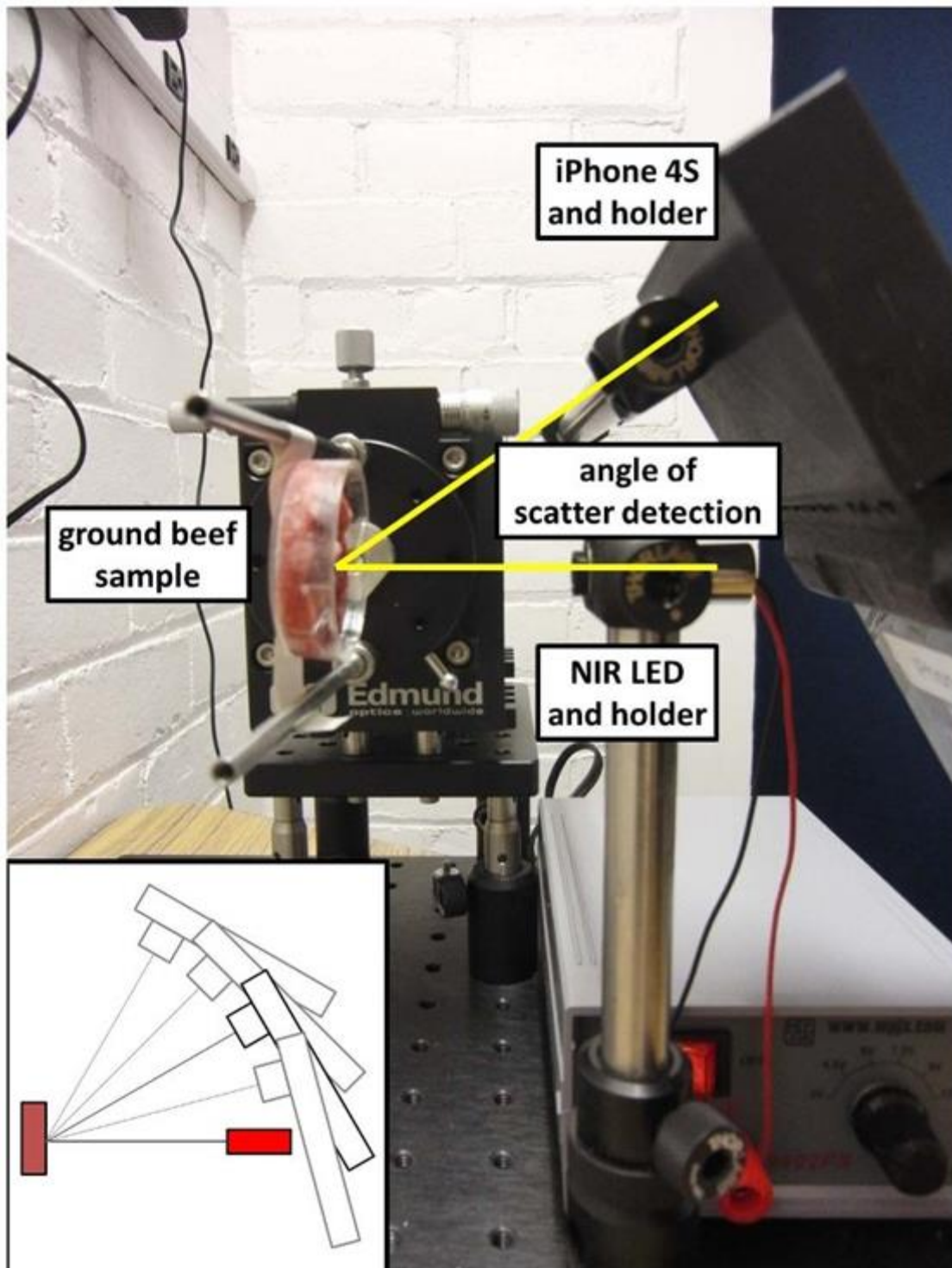
Πίνακας 4: Περίληψη πρόσφατων συστημάτων φασματοσκοπίας smartphone.

Στόχος ανίχνευσης	Μεθοδολογία	Υλικά	LoD/ Απόδοση	Smartphone Χρήση
Μικροβιακή αλλοίωση στο βόειο κρέας	Mie	Στάδια τοποθέτησης, LED NIR 880 nm	10^1 CFU mL ⁻¹ έως 10^8 CFU mL ⁻¹	Ενσωματωμένος αισθητήρας και φασματοσκοπία κάμερας
Γενική εφαρμογή	Φασματοσκοπική χρωματομετρία	Τρισδιάστατο περίβλημα, πίνακα LED, πίνακας Phidgets και φασματόμετρο VIS	Καλή συμφωνία με πιστοποιημένα φάσματα με dE/E που κυμαίνονται από 0,5% έως 1,5%	Συσκευή IoT για χρήση με smartphone
Γλυκόζη και αιθανόλη σε αλκοολούχα ποτά	Φασματοσκοπία FTIR και ανεξάρτητη ανάλυση συστατικών	Πηγή φωτός γραφίτη, πρίσματα ATR, δισδιάστατη συσκευή λήψης φωτός για smartphone	Ανάλυση μήκους κύματος 0,057 μm	Προτείνεται ως φασματοσκοπική μονάδα μεγέθους φασολιών που θα τοποθετηθεί σε smartphone
Ανίχνευση ChIF σε ποικιλία δειγμάτων μήλου	Φασματοσκοπία φθορισμού UV	UV LED, φασματόμετρο VIS περιβλήματος τύπου ακροφυσίου, Arduino pro mini μ, Bluetooth	Παρατηρήθηκε ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των σημάτων και φθορισμού	Διεπαφή εφαρμογής στο smartphone για επικοινωνία, λήψη, σχεδίαση και ανάλυση φασματικών δεδομένων
Γενική εφαρμογή ανίχνευσης τροφίμων	Υπερφασματική απεικόνιση	Ρυθμιζόμενη MEMS FPI, Bluetooth	Εύρος λειτουργίας 450-550 nm με φασματική ανάλυση 8-15 nm @FWHM	Συμβατό με κινητό τηλέφωνο υπερφασματική απεικόνιση

Στόχος ανίχνευσης	Μεθοδολογία	Υλικά	LoD/ Απόδοση	Smartphone Χρήση
Μόλυνση με <i>E.coli</i> στο κρέας	Απεικόνιση με βάση τον φθορισμό	LED 4405-nm 10 W, κάμερα CCD, οπτικό φίλτρο στα 670 nm και πομπός Wi-Fi	Εντοπίστηκε επιτυχώς ο εντοπισμός των περισσότερων σημείων μόλυνσης κοπράνων	Περιγράφηκε η μετάδοση σε πραγματικό χρόνο στη συσκευή παρακολούθησης, όπως το smartphone
Δοκιμή ποιότητας τροφίμων	Διαθλαστική παρεμβολή	Κόκκινο λέιζερ ημιαγωγών 5 mW, κυκλικό χωρικό φίλτρο, ανιχνευτές Si και συσκευή PDMS	LoD 4×10^{-4} RIU	Περιγραμμένη διεπαφή smartphone βασισμένη στη διαμόρφωση της λειτουργίας μετάδοσης
Πρόβλεψη περιεκτικότητας σε ζάχαρη σε αχλάδια	Φασματομετρία NIR και PLS	4 λαμπτήρες βολφραμίου, LVF 620–1080 nm και σειρά γραμμικών ανιχνευτών CMOS	Χαμηλή ισχύς, λόγος SNR έως 5000, R^2 0,96, SEC 0,29 ° Bx και SEP 0,46 ° Bx	Όργανα ασύρματα που λειτουργεί με smartphone

3.6.1 Μέθοδος ανίχνευσης για μικροβιακή αλλοίωση βοείου κρέατος μέσω ενός οπτικού διαγνωστικού συστήματος που βασίζεται σε smartphone

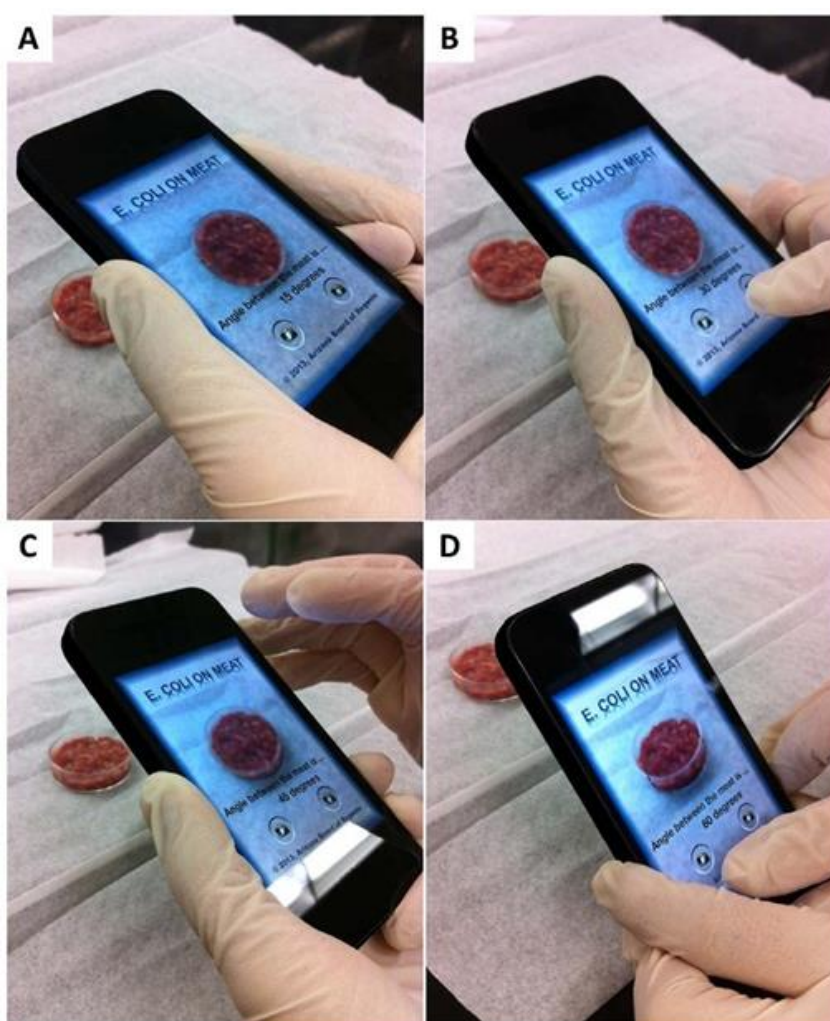
Οι Liang et al., το 2014 ανέπτυξαν έναν βιοαισθητήρα που χρησιμοποιείται από smartphone για την ανίχνευση μικροβιακής αλλοίωσης στον κιμά βοείου κρέατος, χωρίς τη χρήση αντισωμάτων, μικροσφαιριδίων ή άλλων αντιδραστηρίων, ένα προκαταρκτικό εργαλείο ελέγχου για μικροβιακή μόλυνση σε προϊόντα κρέατος. Η διαδικασία ήταν η εξής: 150 mL απιονισμένου νερού (αρνητικός μάρτυρας) και σειρά διαλυμάτων *Escherichia coli* K12 σειριακά αραιωμένα ($10^1 - 10^8$ CFU/mL), προστέθηκαν σε προϊόντα κιμά βοείου κρέατος για την προσομοίωση της μικροβιακής αλλοίωσης.



Εικόνα 25: Επιτραπέζιο σύστημα αποτελούμενο από ένα smartphone (iPhone 4S), ένα NIR LED και δείγμα κιμά και τη θήκη του. Η γωνία ανίχνευσης διασποράς είναι η γωνία μεταξύ της κάμερας του smartphone και της πηγής φωτός NIR LED – Πηγή: Liang et al., 2014

Ένα LED 880 nm κοντά στο υπέρυθρο (NIR) ακτινοβολήσε κάθετα στην επιφάνεια του κιμά, ενώ η ψηφιακή κάμερα ενός smartphone εντόπισε το σήμα διασποράς υπό γωνία 15°, 30°, 40° και 60° μοιρών αντίστοιχα, από το προσπίπτον φως. Αρχικά, η ακτινοβολία NIR και η ανίχνευση διασποράς έγιναν στα στάδια τοποθέτησης. Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε

επανάληψη των πειραμάτων χωρίς να χρησιμοποιηθούν τα στάδια τοποθέτησης, ενώ η απόσταση και η γωνία ενός smartphone από τον κιμά και το NIR LED διορθώθηκαν μέσω μιας εφαρμογής λογισμικού και του ενσωματωμένου γυροσκοπίου ενός smartphone (Εικόνα 25, 26). Συμπερασματικά, αυτό το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια εφαρμογή smartphone για να αντικαταστήσουμε το σύστημα πάγκου ενός εργαστηρίου που είναι χρονοβόρο και αρκετά ακριβό και να κάνουμε την συσκευή πραγματικά φορητή και φθηνή, διατηρώντας παράλληλα το χαμηλό όριο ανίχνευσης. Η προτεινόμενη μέθοδος παρουσιάστηκε ως ένα προκαταρκτικό εργαλείο ελέγχου για την παρακολούθηση της μικροβιακής μόλυνσης των προϊόντων κρέατος.



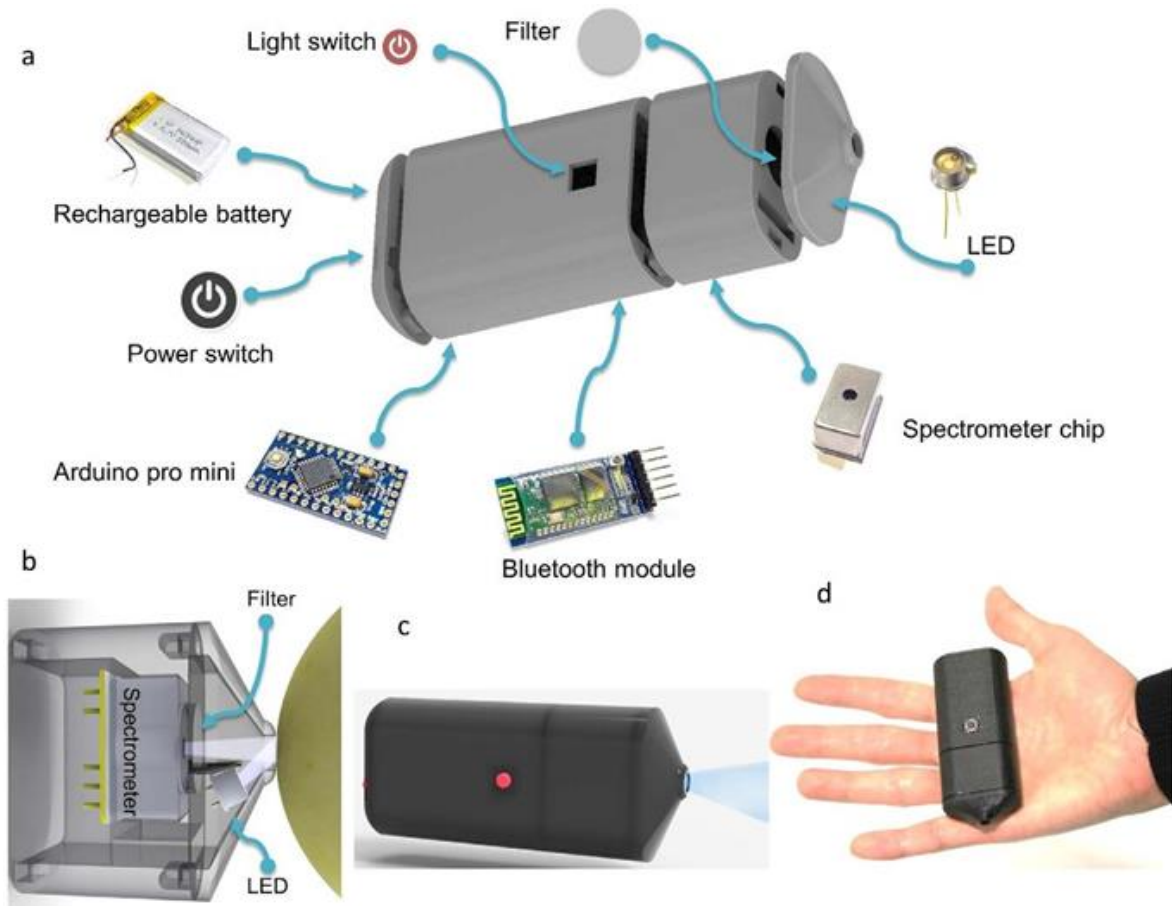
Εικόνα 26: Φωτογραφίες που δείχνουν τη λειτουργία της εφαρμογής smartphone στις τέσσερις συγκεκριμένες γωνίες ανίχνευσης διασποράς: (A) 15°, (B) 30°, (C) 45° και (D) 60°- Πηγή: Liang et al.,2014

3.6.2 Έλεγχος της ωρίμανσης των φρούτων με την χρήση φασματόμετρου smartphone

Ο έλεγχος της ωρίμανσης των φρούτων που βασίζεται σε smartphone μπορεί να είναι εξαιρετικά χρήσιμος για χρήστες από διαφορετικούς κλάδους. Μέχρι σήμερα, ο έλεγχος της

ωριμότητας στα μήλα και σε πολλά άλλα φρούτα γίνεται με καταστροφικό τρόπο με την χρήση μηχανικών δοκιμών. Οι οπτικές δοκιμές των φρούτων, μπορούν να βοηθήσουν τον έλεγχο της ωρίμανσης σε διάφορους κλάδους, όπως για παράδειγμα τους αγρότες στον καθορισμό των βέλτιστων χρόνων συγκομιδής της παραγωγής τους. Η συσκευή που προτείνεται στην συνέχεια, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γρήγορη διαλογή σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης διαφορετικών ποικιλιών φρούτων και για την αξιολόγηση της ωρίμανσης τους. Επιπλέον, θα μπορούσε να προσαρμοστεί για καταναλωτικές εφαρμογές όπως, για τον έλεγχο για ελαττώματα που ενδέχεται να μην μπορούν να αποτυπωθούν οπτικά. Οι Das et al. (2016) ανέπτυξαν μια κινητή συσκευή για την αξιολόγηση της ωριμότητας των φρούτων. Χρησιμοποίησαν το φορητό πρωτότυπο φασματόμετρο για να μελετήσουν τον φθορισμό UV της χλωροφύλλης (ChlF) στα φρούτα. Ανέδειξαν έναν σχεδιασμό φασματόμετρου που βασίζεται σε smartphone, λειτουργεί αυτόνομα και υποστηρίζεται σε ασύρματη πλατφόρμα. Ως συσκευή έχει υπολογιστεί ότι είναι χαμηλού κόστους και η κατανάλωση της ενέργειας της, είναι ελάχιστη. Τα βασικά εξαρτήματα της συσκευής όπως η πηγή φωτός, το φασματόμετρο, τα φίλτρα, ο μικροελεγκτής για μετατροπή A/D και τα ασύρματα κυκλώματα έχουν συναρμολογηθεί σε ένα περίβλημα διαστάσεων 88 mm × 37 mm × 22 mm και ολόκληρη η συσκευή ζυγίζει περίπου 48 g. Επιπλέον αποτελείται από το τσιπ φασματόμετρου, λευκό ή UV LED, μονάδα Bluetooth για ασύρματη μεταφορά δεδομένων και επαναφορτιζόμενη μπαταρία Li-ion μαζί με διακόπτες για τροφοδοσία. Το LED είναι τοποθετημένο κοντά στο άνοιγμα του ακροφυσίου υπό γωνία ως προς το φασματόμετρο επιτρέποντας αποτελεσματικό φωτισμό με μέγεθος σημείου 4,5 mm (**Εικόνα 27**). Το αναλογικό σήμα από το φασματόμετρο αποτελείται από μια σειρά παλμών. Ο γραμμικός αισθητήρας μέσα στο τσιπ του φασματόμετρου έχει 256 pixels που αντιστοιχούσαν σε μήκη κύματος στην περιοχή 340–780 nm. Κατά τη λήψη της εντολής από τη συνοδευτική εφαρμογή για την καταγραφή του φάσματος, ενεργοποιήθηκε ένας παλμός ST που ξεκινάει την ενσωμάτωση φόρτισης κάθε εικονοστοιχείου. Μετά τον χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση, ενεργοποιήθηκε ένας δεύτερος παλμός ST για να τερματιστεί η ολοκλήρωση φόρτισης. Εδώ να επισημάνουμε ότι δεδομένου ότι η ανάγνωση είναι διαδοχική, η ενσωμάτωση φόρτισης λαμβάνει χώρα σε διαφορετικούς χρόνους σε κάθε εικονοστοιχείο και ο επόμενος παλμός έναρξης μπορεί να δημιουργηθεί μόνο αφού ολοκληρωθεί η ανάγνωση. Ο αισθητήρας παρείχε επίσης ένα σήμα λήξης σάρωσης (EOS) που χρησιμοποιή-

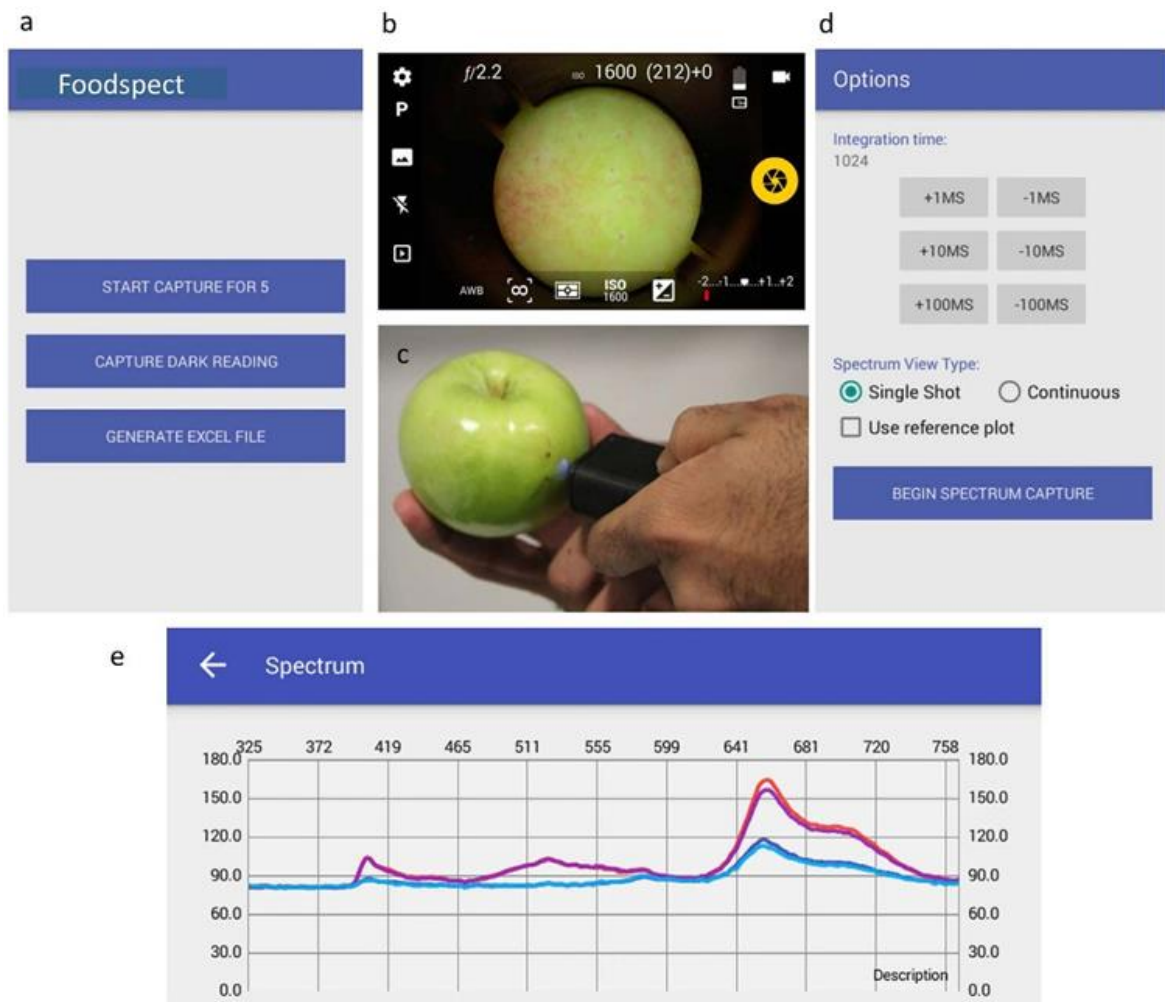
θηκε για τον τερματισμό της διαδικασίας ανάγνωσης και την έναρξη της διαδικασίας μετάδοσης δεδομένων μέσω Bluetooth σε οποιοδήποτε smartphone ήταν εξοπλισμένο με την συγκεκριμένη εφαρμογή. Μόλις τα εικονοστοιχεία συσχετίστηκαν με την παλμική ακολουθία πραγματοποιήθηκε ένα βήμα βαθμονόμησης για τη μετατροπή των εικονοστοιχείων σε μήκος κύματος. Μετά τη βαθμονόμηση ρυθμίστηκε μια διεπαφή Bluetooth για επικοινωνία με το smartphone (**Εικόνα 28**).



Εικόνα 27: (a) Σχηματική απεικόνιση των διαφορετικών στοιχείων του πρωτοτύπου φασματόμετρου smartphone, (b) πλάνο του ακροφυσίου που απεικονίζει το φωτισμό και τη γεωμετρία συλλογής, (c) Μοντέλο του συναρμολογημένου πρωτοτύπου, (d) Φωτογραφία πρωτοτύπου μεθόδου- Πηγή: Das et al, 2016.

Στην συνέχεια, η προσαρμοσμένη εφαρμογή αναπτύχθηκε στο λειτουργικό σύστημα Android για επικοινωνία με το φασματόμετρο, για ανάλυση των φασμάτων στο smartphone. Η ανάλυση του φασματόμετρου είναι 15 nm, παρέχοντας ακριβείς και επαναλαμβανόμενες μετρήσεις. Επίσης, σε ότι αφορά την σταθερότητα και την ανάλυση του μήκους κύματος του φασματόμετρου smartphone, διαπίστωσαν ότι είναι συγκρίσιμη με τα υπάρχοντα φασματόμετρα πάγκου. Ο υπεριώδης (UV) φθορισμός από τη χλωροφύλλη, μετρήθηκε σε διάφορες ποικιλίες μήλων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ωρίμανσης και

συσχετίστηκε με δοκιμές που ήδη έχουν εφαρμοστεί για τον έλεγχο της. Παρατηρήθηκε μια ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των σημάτων ωρίμανσης και φθορισμού. Η συγκεκριμένη μέθοδος, είναι ένα βήμα προς πιθανές καταναλωτικές και διαγνωστικές εφαρμογές που μπορούν να πραγματοποιηθούν με ταχύ και αξιόπιστο τρόπο.



Εικόνα 28: Διαδικασία απόκτησης δεδομένων χρησιμοποιώντας τη διεπαφή εφαρμογής στο smartphone – Πηγή: Das et al, 2016.

3.6.3 Φασματοσκοπία micro NIR σε smartphone για ποιοτικό έλεγχο του πράσινου τσαγιού

Το πράσινο τσάι καταναλώνεται ευρέως τόσο στις Ασιατικές χώρες όσο και στην Ευρώπη, καθώς είναι ευεργετικό για την υγεία (Lorenzo et al., 2016) . Ωστόσο, χημικά συστατικά όπως οι τανίνες, η καφεΐνη και οι κατεχίνες ενισχύουν την συτυπτικότητα και την πικρή γεύση του πράσινου τσαγιού (Zhang et al., 2020). Έχει παρατηρηθεί ότι αρκετοί παραγωγοί, προσθέτουν ζάχαρη και κολλώδες ρυζάλευρο κατά την επεξεργασία του πράσινου

τσαγιού έτσι ώστε να βελτιώσουν την πικρή γεύση του. Οι Xiang et al. (2019) απέδειξαν ότι η νοθεία ζάχαρης επηρεάζει την ποιότητα αποθήκευσης του τσαγιού και έχει πιθανούς κινδύνους για την ασφάλεια του, λόγω ανάπτυξης βακτηρίων. Επομένως, θα πρέπει να αναπτυχθεί μια αποτελεσματική και ακριβής μέθοδος ανίχνευσης μολυντών στο πράσινο τσάι.

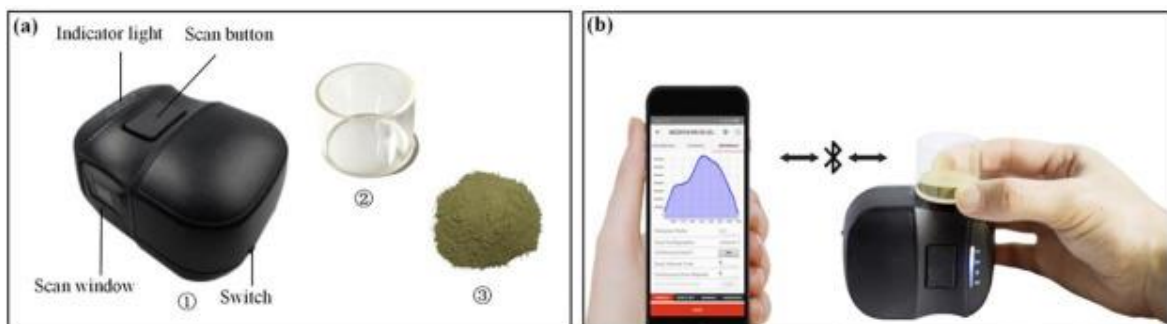
Το micro NIRS έχει προσελκύσει την προσοχή από τους ερευνητές εξαιτίας της φορητότητάς του, του χαμηλού κόστους και της καταλληλότητάς του για δοκιμές στην παραγωγή και την διανομή των τροφίμων. Υπάρχουν παραδείγματα όπου το micro NIRS έχει χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία τροφίμων για τον εντοπισμό νοθευτών τροφίμων. Αναφορικά, οι Oliveira et al. (2020) χρησιμοποίησαν ανάλυση μερικής διάκρισης ελαχίστων τετραγώνων (PLS-DA) και μερικής παλινδρόμησης ελαχίστων τετραγώνων (PLSR) για να αποδείξουν ότι το micro NIRS είναι μια χρήσιμη τεχνική διαλογής για τον εντοπισμό και τον ποσοτικό προσδιορισμό της νοθείας στην πάπρικα. Η συγκεκριμένη μελέτη, υποδεικνύει ότι το micro NIRS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση πιθανών νοθειών για ανώτερο ποιοτικό έλεγχο των τροφίμων. Οι Luqing Li et al., το 2021 πρότειναν μια φορητή και ακριβής τεχνολογία για τον ποιοτικό έλεγχο του πράσινου τσαγιού. Το πείραμα είχε περιλάμβανε τα ακόλουθα βήματα:

1. Προετοιμασία νοθευμένων δειγμάτων που περιέχουν διαφορετικές συγκεντρώσεις ζάχαρης ή κολλώδες ρυζάλευρο.
2. Απόκτηση φασμάτων micro NIRS καθώς και προεπεξεργασία δεδομένων νοθευμένου τσαγιού και καθαρού τσαγιού.
3. Καθιέρωση μοντέλων ταξινόμησης για τους τρεις τύπους δειγμάτων
4. Καθιέρωση ενός ποσοτικού μοντέλου και για τους δύο τύπους νοθευμένων δειγμάτων.

Τα δείγματα τσαγιού νοθευμένα με ζάχαρη συμβολίζονται ως S tea, τα δείγματα νοθεμένου κολλώδους-ρυζάλευρου τσαγιού συμβολίζονται ως G tea και τα δείγματα καθαρού τσαγιού συμβολίζονται ως P tea. Η συγκέντρωση νοθείας στα νοθευμένα δείγματα τσαγιού χρησιμοποιήθηκε ως η χαρακτηριστική ποσοτική παράμετρος των δειγμάτων.

Ένα μικροφασματοόμετρο NIRS βασισμένο στην ψηφιακή επεξεργασία φωτός (DLP) (NIR-S-R2 InnoSpectra Corporation, Ταϊβάν) χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή φασμάτων στην περιοχή 900-1700 nm σε ανάλυση 10-12 nm. Τα δεδομένα μεταδόθηκαν μεταξύ του φασματομέτρου micro NIRS και ενός smartphone (Xiaomi Redmi 7, Beijing

Xiaomi Technology Co., Ltd., Κίνα) μέσω Bluetooth. Κάθε φάσμα αποτελούνταν από 228 σημεία δεδομένων και καταγράφηκε ως αρχείο CSV, το οποίο εξήχθη από το smartphone για περαιτέρω ανάλυση σε υπολογιστή. Κάθε δείγμα σαρώθηκε, αφού τοποθετήθηκε σε δοχείο χαλαζία έτσι ώστε ο πυθμένας του δοχείου να καλυφθεί πλήρως από το δείγμα. Η φασματική λήψη και ο έλεγχος οργάνων πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας την εφαρμογή ISC NIRScan (InnoSpectra Corporation, Ταϊβάν, Κίνα). Ο εξοπλισμός και η διαδικασία σάρωσης απεικονίζονται παρακάτω (**Εικόνα 29**). Οι περισσότερες μελέτες για την ποιότητα του τσαγιού που βασίζονται στο NIR έχουν διεξαχθεί με τη χρήση φασματόμετρου επιτραπέζιου υπολογιστή, το οποίο έχει μειονεκτήματα, όπως κακή κινητικότητα και υψηλό κόστος. Συμπερασματικά, το πείραμα κατέληξε ότι ο συνδυασμός μια συσκευής φασματόμετρου micro NIR και ενός smartphone είναι μια γρήγορη, φορητή και χαμηλού κόστους μέθοδος για την ανίχνευση των νοθευτών του τσαγιού που μελλοντικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιτόπια για την διατήρηση της ασφάλειας του πράσινου τσαγιού.

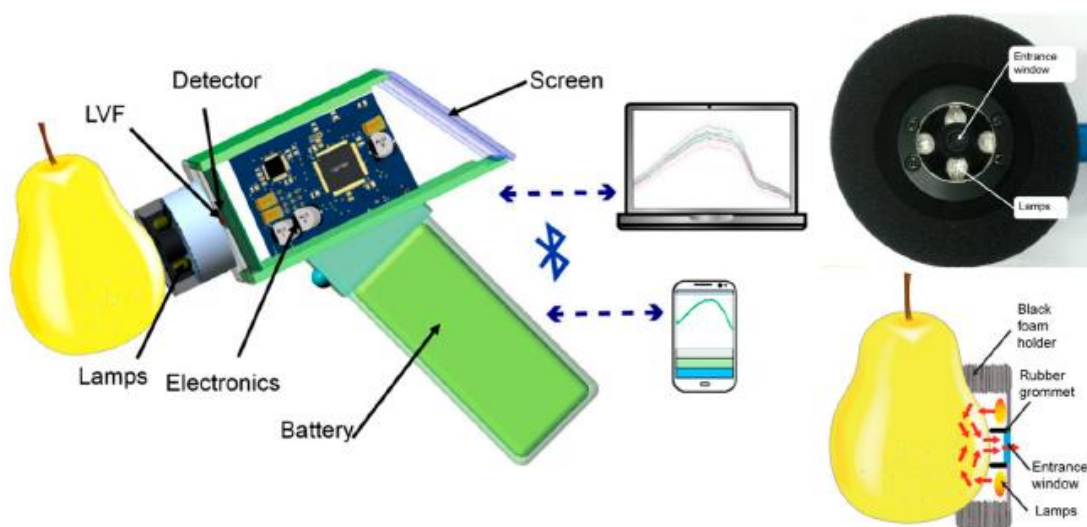


Εικόνα 29: (a) Αξεσουάρ εξοπλισμού Micro NIR: ① φασματόμετρο micro NIR, ② δοχείο χαλαζία και ③ δείγματα τσαγιού, (b) εικόνα ενός οργάνου micro NIR συνδεδεμένου σε smartphone - Πηγή: Luqing Li et al., 2021.

3.6.4 Φορητό φασματομετρο χειρός που βασίζεται σε smartphone για την μέτρηση της εσωτερικής ποιότητας των φρούτων

Η ορατή υπέρυθρη φασματοσκοπία ήδη χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της εσωτερικής ποιότητας των φρούτων, με φορητά όργανα για επιτόπια ανάλυση. Οι Yu et al. (2016) κατασκεύασαν ένα φορητό φασματόμετρο NIR ειδικά σχεδιασμένο για την αξιολόγηση της εσωτερικής ποιότητας των φρούτων. Συγκεκριμένα, μια βασική πτυχή ανάπτυξης ήταν η μονάδα Linear Variable Filter ως στοιχείο το οποίο θα βοηθούσε στην διασπορά του φωτός. Το προτεινόμενο σύστημα φασματόμετρου ήταν μια συσκευή σε σχήμα όπλου, που λειτουργούσε στην περιοχή vis-NIR (620–1080 nm). Η πηγή του φωτός αποτελούνταν από

τέσσερις λάμπες βολφραμίου τοποθετημένες συμμετρικά περιφερειακά από την είσοδο του παραθύρου. Μια σχάρα από λάστιχο διαμέτρου περίπου 6 mm περιβάλλει την είσοδο του παραθύρου και λειτουργεί ως ελαφριά σφράγιση, εμποδίζοντας έτσι το φως που διασκορπίζεται στην επιφάνεια να φτάσει απευθείας στο παράθυρο. Ένας μαλακός μαύρος δακτύλιος αφρού γύρω από την κεφαλή του ανιχνευτή παρέχεται για να στηρίζει τα φρούτα κατά την ανάλυση και να τα προστατεύσει από το εξωτερικό φως. Η πλατφόρμα που αναπτύχθηκε δοκιμάστηκε για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε ζάχαρη στην ποικιλία αχλαδιού Crown Pear.



Εικόνα 30: Σχηματική απεικόνιση του φασματόμετρου χειρός, εικόνα και σχήματα της κεφαλής- Πηγή: Yu et al., 2016.

Αρχικά, το φως από την πηγή εισήλθε στον καρπό και διείσδυσε μέρος του ιστού, και αυτό που προέκυψε από τον καρπό εισήλθε στο παράθυρο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τη μέθοδο αναφοράς των μετρήσεων Brix, που καταγράφηκαν με ένα διαθλασίμετρο χειρός. Τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας παλινδρόμηση PLS με την πλήρη ζώνη των φασμάτων απορρόφησης, βελτιστοποιήθηκαν με την εφαρμογή MSC, SNV. Το όργανο ήταν σε θέση να αναλύσει φασματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας ένα ενσωματωμένο μοντέλο πρόβλεψης και να λειτουργήσει ασύρματα με smartphone και tablet. Βάσει των αποτελεσμάτων αποδείχθηκε ότι είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για την πρόβλεψη της εσωτερικής ποιότητας των φρούτων. Ωστόσο, απαιτείται τροποποιημένο λογισμικό και απαιτούνται περαιτέρω μελέτες για τον έλεγχο της απόδοσης του φασματόμετρου για την πρόβλεψη άλλων χαρακτηριστικών ή την ανίχνευση ζάχαρης

σε άλλα φρούτα (Εικόνα 30).

3.6.5 Πρόσφατα πειράματα που χρησιμοποιούν φασματοσκοπία σε συνδυασμό με smartphone για την μελλοντική συμβολή τους στην ποιότητα των τροφίμων.

Οι τρέχουσες τεχνικές δυσκολίες που υπάρχουν, με την υλοποίηση της έννοιας smartphone-ως-φασματόμετρο στην ανάλυση τροφίμων έχει οδηγήσει ορισμένους στο συμπέρασμα να πιστεύουν ότι η μελλοντική τάση θα είναι ο συνδυασμός smartphone με φθηνά οπτικά εξαρτήματα (Scheeline, 2016). Ωστόσο, διάφοροι ερευνητές εργάζονται για την αύξηση της προσβασιμότητας της αναλυτικής χημείας τροφίμων μέσω της ενσωμάτωσης των ήδη υπάρχουσών μεθοδολογιών με συστήματα ανιχνευτών που βασίζονται σε smartphone ώστε μελλοντικά να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο στην ανάλυση των τροφίμων. Τα μολυσμένα τρόφιμα που προέρχονται από ζωικά προϊόντα αποτελούν μια από τις πιο σημαντικές πηγές ανθρώπινης μόλυνσης και ασθένειας. Τα περιττώματα των ζώων θεωρούνται ως η πιο πιθανή πηγή παθογόνου μόλυνσης από E. coli που σχετίζεται με τροφιμογενείς ασθένειες, οπότε θα πρέπει να επιθεωρείται το κρέας για τυχόν επιμόλυνση από κόπρανα κατά την διάρκεια της επεξεργασία του. Ο έλεγχος του κρέατος στα εργοστάσια σφαγής για τα χαρακτηριστικά της ασφάλειας και της ποιότητας των τροφίμων, συμπεριλαμβανομένης της πιθανής μόλυνσης των κοπράνων, πραγματοποιείται με οπτική εξέταση από επιθεωρητές. Οι Oh et al., το 2016 ανέπτυξαν μια φορητή συσκευή απεικόνισης βασισμένη σε φθορισμό για να είναι ένα βοηθητικό εργαλείο για τους ανθρώπινους επιθεωρητές με στόχο την ενίσχυση της οπτικής ανίχνευσης της μόλυνσης με κόπρανα σε επιφάνειες κόκκινου κρέατος, λίπους και οστών βοείου κρέατος υπό ποικίλες φωτεινές εντάσεις. Η συσκευή αποτελούταν από τέσσερα LED 405-nm 10 W για διέγερση φθορισμού, μια κάμερα συσκευής (CCD), ένα οπτικό φίλτρο στα 670 nm και έναν πομπό Wi-Fi για την αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε smartphone ή tablet. Ο εντοπισμός των περισσότερων κηλίδων μόλυνσης κοπράνων σε επιφάνειες βοείου κρέατος αναγνωρίστηκε επιτυχώς λόγω της παρουσίας μεταβολιτών χλωροφύλλης που εκλύουν φθορισμό κοντά στα 670 nm. Η εικόνα που αποκτήθηκε από τη συσκευή μεταδόθηκε μέσω Wi-Fi και υποβλήθηκε σε επεξεργασία με ανάλυση MATLAB. Τα αποτελέσματα έδειξαν το προτεινόμενο σύστημα ως έναν αποτελεσματικό τρόπο για να βοηθήσει την οπτική επιθεώρηση για την ανίχνευση μόλυνσης κοπράνων. Οι Hosono et al. ανέπτυξαν έναν συμπαγή φασματοσκοπικό απεικονιστή αλκαλικού μεγέθους μπαταρίας FTIR για την ταυτόχρονη μέτρηση γλυκόζης και αιθανόλης σε αλκοολούχα ποτά μέσω ανεξάρτητης ανάλυσης

συστατικών, χρησιμοποιώντας μια φασματοσκοπική μονάδα μεγέθους φασολιού το οποίο θα τοποθετηθεί σε smartphone. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στις περιοχές NIR και MIR, έτσι ώστε να βρεθεί μια περιοχή κατάλληλη για ανεξάρτητη ανάλυση συστατικών για να γίνει η διάκριση της γλυκόζης και της αιθανόλης. (Hosono et al., 2015). Οι Rissanen et al., το 2016 ανέπτυξαν ένα ενεργό υπερφασματικός αισθητήρας (AHS) για εφαρμογές ανίχνευσης και ταξινόμησης στόχων συμβατή με κινητά τηλέφωνα βασισμένη σε ένα συντονιζόμενο μετρητή παρεμβολής που ονομάζεται MEMS Fabry-Perot για έλεγχο ταυτότητας των τροφίμων, και ανίχνευση τυχόν νοθείας και πιθανές εφαρμογές της μεθόδου σε πραγματικό έλεγχο τροφίμων. Η υπερφασματική απεικόνιση έχει εφαρμοστεί ευρέως σε εφαρμογές όπως η ιατρική απεικόνιση και διαγνωστική, η επιθεώρηση ασφάλειας τροφίμων (Feng YZ et al., 2012). Οι συγγραφείς περιέγραψαν την ανάπτυξη ενός οπτικού φίλτρου MEMS Fabry-Perot (FPI) ενσωματωμένο με μια κάμερα iPhone 5s για την εκτέλεση υπερφασματικής απεικόνισης στο εύρος vis-NIR 450-550 nm. Η επικοινωνία μεταξύ της μονάδας MEMS FPI και του iPhone 5 πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας Bluetooth. Μια διαμόρφωση δύο FPI με μήκη κύματος ($\lambda = 500$ nm και $\lambda = 650$ nm) σε συνδυασμό με μια έγχρωμη κάμερα RGB έδειξαν ότι μπορεί να επιτευχθεί η δυνατότητα επέκτασης του εύρους συντονισμού μήκους κύματος στα 400-700 nm.

3.6.6 Φασματοσκοπία σε συνδυασμό με το σύστημα οράσεως υπολογιστή (CVS) για τον έλεγχο ταυτότητας τροφίμων (νοθεία ελαιολάδου)

Το εξαιρετικό παρθένο ελαιόλαδο (EVOO), αποτελεί ένα προϊόν με μεγάλη θρεπτική αξία και με πολλές ευεργετικές ιδιότητες για τον οργανισμό μας. Θεωρείται ως μια καλή πηγή μονοακόρεστων λιπαρών οξέων, βιταμινών, αντιοξειδωτικών και φαινολικών, που συχνά συνδέεται με την πρόληψη προβλημάτων υγείας, όπως είναι η παχυσαρκία, ο διαβήτης, η αθηροσκλήρωση, οι καρδιακές παθήσεις, η υψηλή αρτηριακή πίεση και ο καρκίνος (Harwood et al., 2002). Εξαιτίας της υψηλής τιμής και της αυξανόμενης ζήτησης του ελαιολάδου (Espadas-Aldana et al., 2019), η νοθεία του ελαιολάδου όπου αναμιγνύεται με φθηνότερα βρώσιμα φυτικά έλαια (VO) αποτελεί ένα σοβαρό ζήτημα απάτης στα τρόφιμα που μειώνει την εμπιστοσύνη των καταναλωτών, καταστρέφει τη φήμη της μάρκας της εταιρίας που τα διαθέτει. Τα καλά συντηρημένα εξαιρετικά παρθένα ελαιόλαδα (EVOO)

και τα φυτικά έλαια (VO) μπορούν εύκολα να διαχωριστούν αν τα ελέγξει κάποιος με εκπαιδευμένα μάτια, καθώς το ελαιόλαδο EVOO είναι πιο πλούσιο σε χρωστικές ουσίες όπως χλωροφύλλες και καροτενοειδή συγκριτικά με το VO (Romaniello et al., 2018, Jiulin Shi et al., 2019). Ωστόσο, είναι αρκετά δύσκολο έως και ανέφικτο για τους καταναλωτές που δεν διαθέτουν την εμπειρία, να εκτιμήσουν το επίπεδο νοθείας του ελαιολάδου με τα φυτικά έλαια με βάση την αισθητηριακή ανάλυση. Επομένως, αντιλαμβανόμαστε ότι η βιομηχανία τροφίμων και οι καταναλωτές επιθυμούν νέες τεχνικές που να μπορούν να ποσοτικοποιήσουν τη νοθεία του ελαιολάδου με ταχύ, οικονομικά αποδοτικό, και μη καταστροφικό τρόπο.

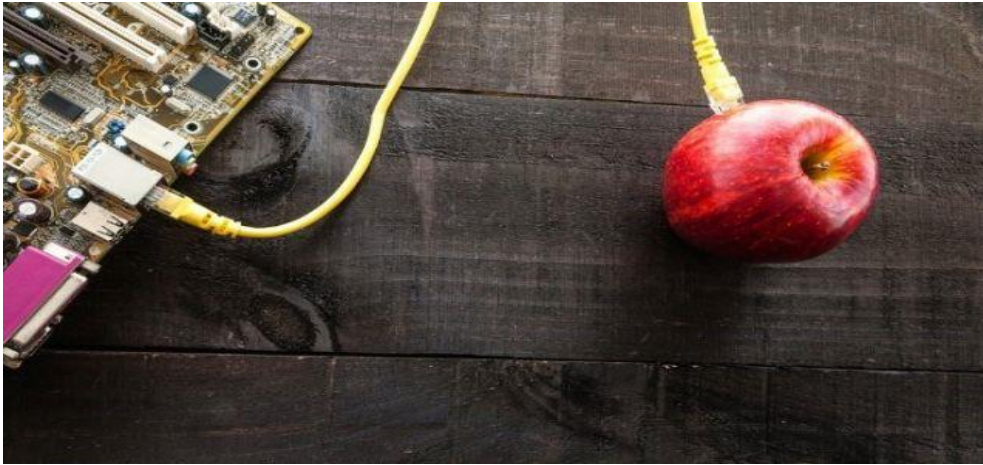
Μια τεχνική που ήδη εφαρμόζεται με επιτυχία στον έλεγχο ταυτότητας των τροφίμων και την αξιολόγηση της ποιότητας είναι η φασματοσκοπία. Μετρά την αλληλεπίδραση μεταξύ χημικών ενώσεων και μηκών κύματος ακτινοβολούμενου φωτός χρησιμοποιώντας φασματόμετρα κοντινού υπέρυθρου (NIR), υπεριώδους-ορατού (UV-Vis), Raman, φθορισμού και υπέρυθρου μετασχηματισμού Fourier (FT-IR) (Cayuela-Sánchez et al., 2019; Ferreiro-González et al., 2017). Τα παραπάνω φάσματα περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες δακτυλικών αποτυπωμάτων και αντιπροσωπεύονται ως σύνολα τιμών έντασης φωτός σε διάφορα μήκη κύματος.

Σύμφωνα με τους Ali et al., (2018) και Sayago et al., (2018), η φασματοσκοπία σε συνδυασμό με τη χημειομετρία παρέχει έναν εξαιρετικά αποτελεσματικό τρόπο για την ποιοτική και ποσοτική ανάλυση των ιδιοτήτων του ελαιολάδου, συμπεριλαμβανομένης της προέλευσης, της σύνθεσης των ορυκτών και του επιπέδου νοθείας. Συγκεκριμένα, η χρήση φορητού φασματόμετρου παρουσιάζει ακόμη και συγκρίσιμα αποτελέσματα με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις στην ανίχνευση νοθείας ελαιολάδου. Για παράδειγμα, η φασματοσκοπία Raman σε συνδυασμό με μηχανή διανύσματος υποστήριξης ελαχίστων τετραγώνων (LS-SVM) λαμβάνει 0,9976 της τιμής R2 στην πρόβλεψη του επιπέδου νοθείας που κυμαίνεται από 0% έως 100% (v/v) σε προσαυξήσεις 10% (Dong et al., 2012). Ένα τέτοιο αποτέλεσμα είναι συγκρίσιμο με αυτό της χρήσης αερίου χρωματογραφίας για τη μέτρηση παρόμοιου επιπέδου νόθευσης (Ruiz-Samblás et al., 2012).

Μια άλλη τεχνική που χρησιμοποιήθηκε το 2013 (Wu et al., 2013) σχετικά πρόσφατα για τον έλεγχο ταυτότητας τροφίμων είναι το σύστημα όρασης υπολογιστή (CVS). Στόχος του είναι να αντικαταστήσει το ανθρώπινο μάτι που έχει μεγαλύτερη πιθανότητα

σφάλματος, από μαλακό αισθητήρα και να αποκτήσει αυτόματα υψηλού επιπέδου κατανόηση της ποιότητας των τροφίμων μέσω λήψης, επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνας. Η διάκριση μεταξύ νοθευμένων και μη νοθευμένων δειγμάτων από την άποψη CVS βασίζεται στην διαφορά επιπέδου χρώματος. Το CVS έχει αναφερθεί ότι έχει καλή απόδοση στην ανίχνευση νοθείας ελαιολάδου επειδή μπορεί να συλλάβει αποτελεσματικά τη διαφορά επιπέδου χρώματος μεταξύ του ελαιολάδου και του νοθευμένου λαδιού (Milanez, 2014). Αν και η φασματοσκοπία θεωρείται ως ένα ισχυρό εργαλείο για τον έλεγχο ταυτότητας του ελαιολάδου, το υψηλό κόστος του εξακολουθεί να υπερβαίνει τις προσδοκίες των καταναλωτών. Αναφορικά, η τιμή ενός φορητού φασματόμετρου NIR (NIRQuest512, Ocean Optics) είναι περίπου 15.600 USD (13.784,86 Ευρώ). Η πρόσφατη τεχνολογία κάνει προσπάθειες έτσι ώστε να καταφέρει να ελαχιστοποιήσει το μέγεθος και την τιμή του φασματόμετρου, παράγοντας φασματόμετρα μεγέθους τσέπης όπως τα SCiO και TellSpec (SCiO, TellSpec). Τα εν λόγω φασματόμετρα μπορούν να εξυπηρετήσουν τους καταναλωτές στο να αξιολογήσουν την ποιότητα των τροφίμων με γρήγορο και βολικό τρόπο όταν συνδέονται με ένα smartphone. Το CVS με τις έως τώρα έρευνες δεν είναι η κατάλληλη μέθοδος για χρήση από τους καταναλωτές για την ανίχνευση νοθείας ελαιολάδου, καθώς απαιτεί προσεκτική ρύθμιση της κάμερας και σταθερό φωτισμό (Wu et al., 2013). Επιπλέον, το συμβατικό CVS χρειάζεται εξωτερική κάμερα και λογισμικό υπολογιστή για την απόκτηση και επεξεργασία εικόνας αντίστοιχα. Αυτός ο περιορισμός οργάνων εμποδίζει τη λήψη και την ανάλυση δεδομένων στιγμιαία. Μελέτες που έχουν διεξαχθεί πρόσφατα, επιχειρούν να χρησιμοποιήσουν φορητές συσκευές, όπως είναι το smartphone για να αντικαταστήσουν την εξωτερική κάμερα για τον έλεγχο ταυτότητας των τροφίμων και την αξιολόγηση της ποιότητας (Karagiorgos et al., 2017). Οι καταναλωτές θα μπορούν να ανεβάσουν φωτογραφίες στην εφαρμογή smartphone ή στους διακομιστές cloud και στη συνέχεια να λάβουν αναλυτικά αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο των προϊόντων διατροφής. Αξίζει να αναφερθεί, ότι πρόσφατα το εργαστήριο Μικροβιολογίας & Βιοτεχνολογίας Τροφίμων του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών κατάφερε να δημιουργήσει σε εργαστηριακή κλίμακα και όχι μόνο, μία εφαρμογή ελέγχου ποιότητας, ασφάλειας και νοθείας των τροφίμων. Η συγκεκριμένη εφαρμογή βρίσκεται ακόμη σε εξέλιξη και ήδη έχει χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία σε εργοστάσιο προϊόντων που έχουν ως βάση το κοτόπουλο. Ο μελλοντικός στόχος είναι να καταφέρουν να «βλέπουν» τα αποτελέσματα στα κινητά ή στα tablets των managers και στο κοντινό μέλλον στα κινητά των καταναλωτών (Πηγή:

Reporter.gr).



Εικόνα 311: Η τεχνολογία θα μας επιτρέπει να “διαβάζουμε” τα τρόφιμα – Πηγή Reporter.gr

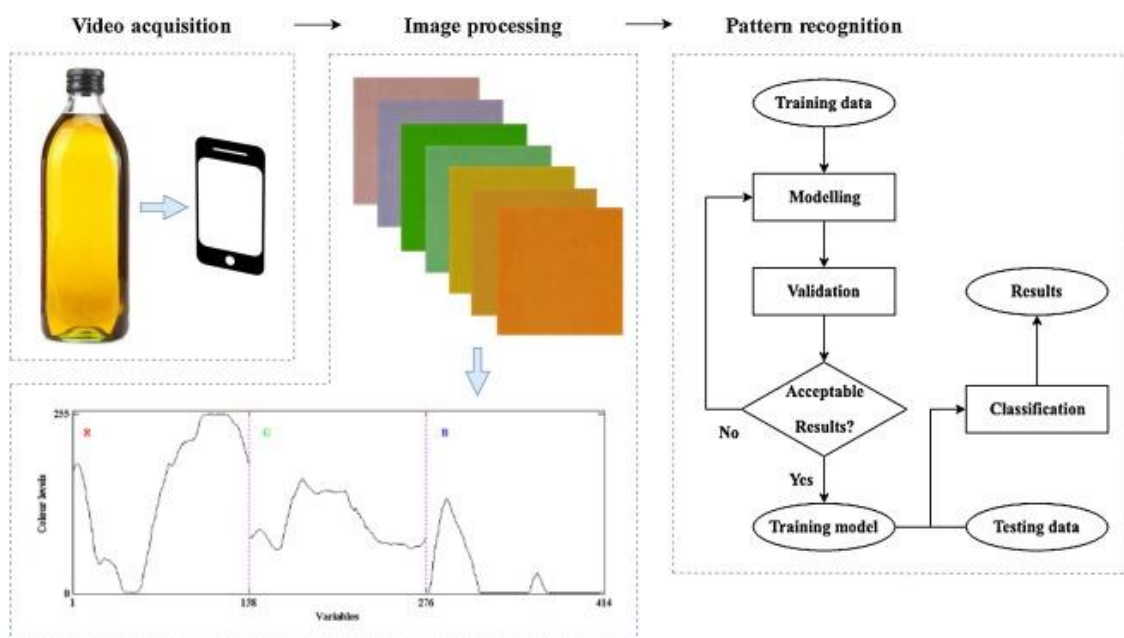
Οι WeiranSong et al. (2020) χρησιμοποίησαν ένα smartphone (Samsung Galaxy S6), για να μπορέσουν να δημιουργήσουν μια σειρά χρωμάτων στην οθόνη του κινητού τηλεφώνου με χρωματικό εύρος από το μωβ έως το κόκκινο, έτσι ώστε να μπορεί φωτίζει τα ελεγχόμενα δείγματα του λαδιού. Για να καταφέρουν να εξασφαλίσουν ομοιόμορφο φωτισμό στην επιφάνεια του δείγματος, το smartphone τοποθετήθηκε παράλληλα περίπου 5 cm από την επιφάνεια του δείγματος, με το κέντρο της οθόνης στραμμένο προς την επιφάνεια του. Στην συνέχεια ένα βίντεο 5 δευτερολέπτων εγγράφηκε από την μπροστινή κάμερα και αποθηκεύτηκε σε μορφή MP4. Όλα τα βίντεο που ελήφθησαν μεταφορτώθηκαν σε φορητό υπολογιστή εγκατεστημένο με λογισμικό MATLAB 7.12 R2011a (The MathWorks Inc., ΗΠΑ) για επεξεργασία των εικόνων και εν συνεχεία ανάλυση των δεδομένων. Το 50ο καρέ σε ένα βίντεο όπως φαίνεται στην (Εικόνα 32), ένα από τα δείγματα του λαδιού φωτίστηκε χρησιμοποιώντας οθόνη smartphone με κυανό χρώμα και φασματοσκοπία NIR.



Εικόνα 32: Το 50ο καρέ ενός βίντεο smartphone. Το δείγμα λαδιού φωτίστηκε χρησιμοποιώντας οθόνη smartphone (κυανό χρώμα) και το επιλεγμένο ROI με 70×70 pixel σημειώθηκε σε λευκό τετράγωνο, (β) ένα υποσύνολο εικόνων απόδοσης επένδυσης (ROI) και μια ακολουθία χρωμάτων που ποικίλλει από μωβ έως κόκκινο – Πηγή: WeiranSong et al., 2020.

Για το συγκεκριμένο πείραμα, χρησιμοποίησαν ένα φορητό φασματόμετρο NIR (NIRQuest512, Ocean Optics, Inc., ΗΠΑ) εξοπλισμένο με ανιχνευτή InGaAs για την λήψη των φασμάτων. Το πείραμα διεξήχθη υπό συνθήκες φωτισμού περιβάλλοντος και σε θερμοκρασία δωματίου. Τα φασματικά δεδομένα NIR, 512 μεταβλητών αποκτήθηκαν με το λογισμικό OceanView. Κάθε δείγμα σαρώθηκε για 5 φορές σε διάρκεια 5 δευτερόλεπτων και το μέσο φάσμα χρησιμοποιήθηκε ως δείγμα δεδομένων. Στην συνέχεια, για την ψηφιακή απεικόνιση των δειγμάτων, χρησιμοποίησαν ένα smartphone (Huawei P30 Pro) με μπροστινή κάμερα υψηλής απόδοσης. Η κάμερα στερεώθηκε 5 cm μακριά από το δείγμα και έλαβε εικόνες δύο φορές μέσω πλαστικών γυαλιών υπό συνθήκες φωτισμού περιβάλλοντος και φωτισμού LED. Παρατήρησαν ότι, η διαφορά χρώματος μεταξύ παρθένου ελαιολάδου (EVOO) και φυτικών ελαίων (VO) είναι σημαντική, διευκρινίζοντας ότι το επίπεδο φυτικών ελαίων στο ανάμεικτο λάδι δεν μπορεί να αναγνωριστεί αποτελεσματικά με γυμνά μάτια. Για να ποσοτικοποιηθεί με ακρίβεια το επίπεδο νοθείας, κάθε εικόνα ROI αποσυντέθηκε σε τρεις εικόνες με βάση κανάλια RGB με επίπεδα χρώματος που κυμαίνονται από 0 έως 255. Για την ανάλυση των δεδομένων που ελήφθησαν, χωρίστηκαν σε ένα σύνολο βαθμονόμησης και ένα ανεξάρτητο σύνολο δοκιμής σύμφωνα με την αναλογία 5:2. Το μοντέλο παλινδρόμησης PLS που βασίζεται σε δεδομένα βίντεο με πλήρεις μεταβλητές, έχει αποδείξει ότι έχει την δυνατότητα χρήσης βίντεο smartphone για την πρόβλεψη νοθείας VO στο EVOO. Ωστόσο, μπορεί να είναι δύσκολο για το σύστημα αισθητήρων να καταστεί αποτελεσματικό σύστημα σε πραγματικό χρόνο, διότι η χρήση smartphone για τη διαχείριση δεδομένων με περισσότερες από εκατοντάδες μεταβλητές απαιτεί πολύ χρόνο και υψηλό υπολογιστικό φορτίο. Γενικότερα, η επιλογή σημαντικών μεταβλητών μπορεί να μην έχει μεγάλη επιρροή στα αποτελέσματα, αλλά έχει πρακτική σημασία κατά

την ανάπτυξη συστημάτων σε πραγματικό χρόνο (Kamruzzaman et al., 2016). Συμπερασματικά, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν βίντεο smartphone σε συνδυασμό με επεξεργασία εικόνας και χημειομετρία για να καταφέρουν να ποσοτικοποιήσουν το επίπεδο νοθείας φυτικών ελαίων στο εξαιρετικά παρθένο ελαιόλαδο. Βάση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν οι πραγματικές και οι προβλεπόμενες τιμές είναι εξαιρετικά συνεπείς. Ωστόσο το σύστημα μπορεί να αναπτυχθεί περαιτέρω έτσι ώστε να γίνει ένα σύστημα που θα λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο, για να μπορεί να βοηθήσει τους καταναλωτές μελλοντικά να καταπολεμήσουν την απάτη που υπάρχει στα τρόφιμα. Μελλοντικός στόχος των ερευνητών είναι να μπορέσουν να βελτιστοποιήσουν το σύστημα αισθητήρων για δειγματοληψία, ώστε να μπορέσουν να δημιουργήσουν μεγάλα σύνολα δεδομένων, για τον έλεγχο ταυτότητας και αξιολόγηση ποιότητας του ελαιολάδου.



Εικόνα 33: Σχηματική περιγραφή του συστήματος αισθητήρων για τον έλεγχο ταυτότητας τροφίμων – Πηγή: Weiran Song et al., 2020.

3.7 Ηλεκτρο-αναλυτικές πλατφόρμες που βασίζονται σε Smartphone

Οι ηλεκτροαναλυτικές μέθοδοι αποτελούν έναν σημαντικό τρόπο παρακολούθησης της διατροφικής διαδικασίας και του ποιοτικού ελέγχου των προϊόντων διατροφής. Οι συγκεκριμένες μέθοδοι χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια για να δημιουργήσουν την ηλεκτρική επαφή με το διάλυμα της αναλυόμενης ουσίας, σε συνδυασμό με ηλεκτρικές ή ηλεκτρονικές συσκευές στις οποίες είναι προσαρτημένες, για τη μέτρηση μιας ηλεκτρικής παραμέτρου του

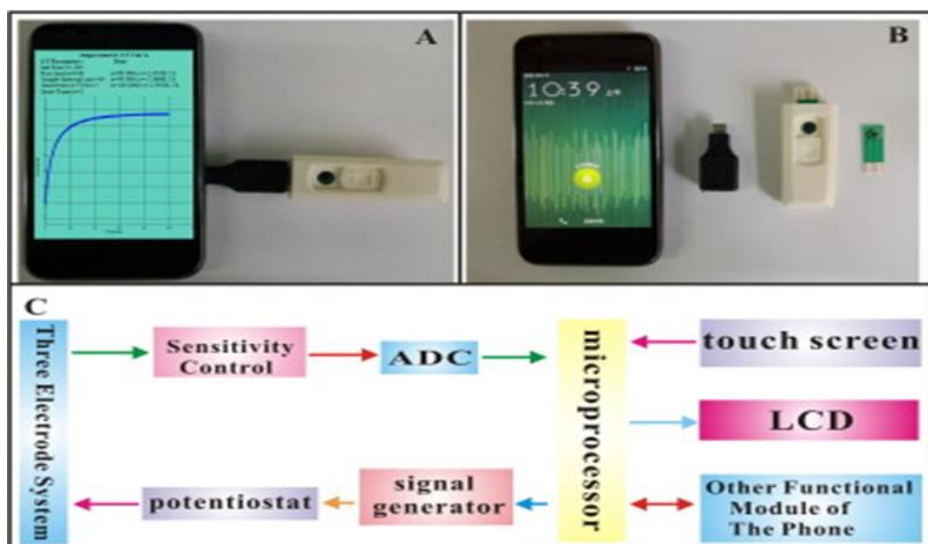
διαλύματος. Ανάλογα με τις ηλεκτρικές παραμέτρους που μετρώνται, οι ηλεκτροαναλυτικές μέθοδοι περιλαμβάνουν την ποτενσιομετρία, αμπερομετρα, αγωγιμόμετρα, ηλεκτροβαρύμετρα και την κουλομετρία (*coulometry*). Τα εν λόγω ονόματα των μεθόδων αντικατοπτρίζουν την μετρημένη ηλεκτρική ιδιότητα ή τις μονάδες της. Οι ηλεκτροαναλυτικές μέθοδοι είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες για την ανάπτυξη πλατφορμών smartphone έτσι ώστε να πραγματοποιείται επιτόπια ανάλυση των τροφίμων, καθώς πλεονεκτούν στον συνδυασμό ανίχνευσης υψηλής απόδοσης με μεγάλη απλότητα, χαμηλό κόστος, φορητότητα, αυτονομία, λειτουργία χωρίς καλώδια, και ικανότητα διεξαγωγής αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο ολόκληρης της αναλυτικής μέτρησης σε απομακρυσμένα μέρη. Οι περισσότεροι ηλεκτροχημικοί αισθητήρες χρησιμοποιούν τη διάταξη τριών ηλεκτροδίων που αποτελείται από: ένα ηλεκτρόδιο εργασίας (WE), ένα αντίθετο ηλεκτρόδιο (CE) και ένα ηλεκτρόδιο αναφοράς (RE). Με το δυναμικό που εφαρμόζεται μεταξύ του ηλεκτροδίου εργασίας και του αντίθετου ηλεκτροδίου, οι ηλεκτροχημικοί βιοαισθητήρες μετατρέπουν τη βιολογική απόκριση που εμφανίζεται στα ηλεκτρόδια του μορφοτροπέα σε ένα μετρήσιμο ηλεκτρικό σήμα (Grieshaber et al., 2008). Η σμίκρυνση των ηλεκτροχημικών μετατροπέων και οργάνων ανάγνωσης είναι τα κύρια θέματα στην ανάπτυξη ηλεκτροχημικών συσκευών. Τα τελευταία χρόνια, ηλεκτροχημικοί βιοαισθητήρες που υποστηρίζονται από smartphone έχουν αναπτυχθεί από ερευνητές (Zhang et al., 2015, Shen et al., 2020). Ως μονάδα ανίχνευσης και μεταγωγής, τα ηλεκτρόδια (SPE) έχουν εμπλακεί για να εκμεταλλευτούν πλήρως το μικρό μέγεθος, το μικρό βάρος και την ευκολία τροποποίησης (Jiang et al., 2020).

3.7.1. Ανίχνευση κλενβουτερόλης με τη χρήση ηλεκτροχημικού βιοαισθητήρα που βασίζεται σε smartphone

Η ηλεκτροχημική ανάλυση έχει την ικανότητα να παρέχει ένα ευρύ φάσμα ποσοτικών μεθόδων για την ανίχνευση των αναλυτέων ιόντων μιας ουσίας και έχει αποδειχθεί ευρέως σε πολλούς ζωτικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της κλινικής διάγνωσης, της περιβαλλοντικής παρακολούθησης, της εσωτερικής ασφάλειας και της ανάλυσης των τροφίμων (Liu et al., 2015). Σε σχετικά πρόσφατη μελέτη, προτάθηκε η έννοια της χρήσης έξυπνου κινητού τηλεφώνου smartphone σε συνδυασμό με την ηλεκτροχημεία, εξαιτίας της διαθεσιμότητάς του σε οποιοδήποτε μέρος είναι αναγκαίο, καθώς και της βολικής σύνδεσής

του με δίκτυα πληροφοριών (Wei et al., 2014) . Ορισμένες συσκευές διερευνώνται για διαγνωστικά σημεία φροντίδας (POC) και περιβαλλοντική παρακολούθηση, με σκοπό την ανάπτυξη χρήσιμου κινητού εξοπλισμού ανίχνευσης. Ακόμη και αυτές οι συσκευές προσπαθούν να χρησιμοποιήσουν τα κινητά τηλέφωνα για πολλούς διαφορετικούς τομείς (Wong et al., 2014, Ryu et al., 2014). Πολλές από αυτές τις συσκευές παρέχουν μόνο ποιοτική ("ναι" ή "όχι") ή οπτική ανάγνωση, η οποία μπορεί να είναι είτε διφορούμενη, είτε δύσκολο να ερμηνευτεί. Ωστόσο, μόνο οι ποσοτικές μετρήσεις προσφέρουν ένα ακριβές μέσο για την παρακολούθηση της επισιτιστικής ασφάλειας.

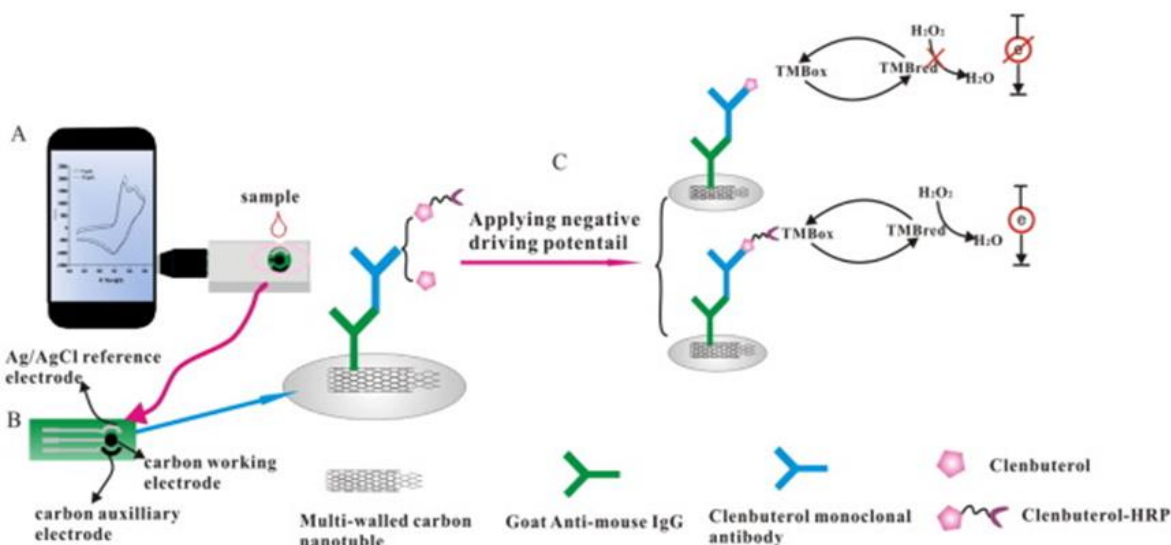
Οι Dou et al., (2016) προκειμένου να συνδυάσουν το smartphone με τους βιοαισθητήρες για να αναπτύξουν ένα κινητό σύστημα ανίχνευσης, σχεδίασαν μια φορητή ηλεκτροχημική συσκευή, η οποία έχει τόσο την ταχεία ηλεκτροχημική ικανότητα βιοαισθητικής όσο και την επεξεργασία πληροφοριών και την ιδιότητα επικοινωνίας. Στην **Εικόνα 34**, απεικονίζεται η κινητή ηλεκτροχημική συσκευή που βασίζεται σε smartphone συνδεδεμένη με τσιπ βιοαισθητήρα, ηλεκτροχημικό στοιχείο ανίχνευσης και διάγραμμα πλαισίου ηλεκτρικού κυκλώματος της ηλεκτροχημικής συσκευής στο smartphone. Η εν λόγω συσκευή ηλεκτροχημικής βιοαισθητικής που βασίζεται σε smartphone έχει πολλά πλεονεκτήματα. Αρχικά, ένας ηλεκτροχημικός ανιχνευτής ενσωματώθηκε σε ένα smartphone και παρέχεται μια εφαρμογή για τον αισθητήρα. Επίσης, διατίθενται οι πιο κοινές ηλεκτροχημικές μέθοδοι, όπως είναι η ετερομετρία και η βολτομετρική. Ακόμη, ο ηλεκτροχημικός βιοαισθητήρας που βασίζεται σε smartphone έχει την ικανότητα να λειτουργήσει ως μόντεμ για να μεταφέρει τα αποτελέσματα των δοκιμών σε μια απομακρυσμένη εγκατάσταση, μέσω οποιουδήποτε διαθέσιμου δικτύου επικοινωνιών (2G, 3G, WiFi, bluetooth) και υποστηρίζει εκτεταμένη μνήμη (για παράδειγμα MicroSD 32G / 64G) για την αποθήκευση δεδομένων. Επίσης, είναι έτοιμο για χρήση ανά πάσα στιγμή στην καθημερινή μας ζωή, ειδικά αν η συσκευή που βασίζεται σε smartphone μπορεί επίσης να υποστηρίξει την επιτάχυνση με γνώμονα το ηλεκτρικό πεδίο για ταχεία ανάλυση.



Εικόνα 34: (α) Φωτογραφία του ηλεκτροχημικού βιοαισθητήρα που βασίζεται σε smartphone, (β) φωτογραφία του smartphone, της θύρας USB, του chipbox και του τυπωμένου στην οθόνη ηλεκτροδίου άνθρακα, (γ) Ένα διάγραμμα πλαισίου ηλεκτρικού κυκλώματος της κινητής ηλεκτροχημικής συσκευής, επιτρέπει την εισαγωγή παραμέτρων από το χρήστη στο κινητό τηλέφωνο και τη συλλογή δεδομένων από τρία ηλεκτρόδια που συνδέονται με το τηλέφωνο. (ADC: αναλογικός προς ψηφιακό μετατροπέα. LCD: υγρή επίδειξη κρυστάλλου, Dou et al., 2016)

Για να καταφέρουν να αποδείξουν την διαθεσιμότητα αυτού του συστήματος για δοκιμές POC, σχεδίασαν μια μέθοδο επιτάχυνσης με γνώμονα το ηλεκτρικό πεδίο για την ανίχνευση κλενβουτερόλης (4-αμινο-[t-βουτυλομιμεθύλιο]-3,5-διχλωροβενζυλική υδροχλωρικό αλκοόλη, CLB) στην κτηνοτροφία. Διαπίστωσαν ότι, η CLB βελτίωσε το ρυθμό ανάπτυξης, μείωσε την εναπόθεση λίπους και αύξησε την πρόσληψη πρωτεϊνών, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράνομα στην κτηνοτροφία για οικονομικά οφέλη. Ωστόσο, το CLB μπορεί εύκολα να παραμείνει στους ζωικούς ιστούς και να οδηγήσει σε συμπτώματα, όπως η προσωρινή ζάλη και αίσθημα αυξημένων παλμών (Mbuna et al., 2011). Η συνεχής παρακολούθηση της χρήσης/ κατάχρησης CLB καθίσταται απολύτως αναγκαία τόσο για τη δημόσια υγεία, όσο και για την ανάπτυξη της βιομηχανίας τροφίμων. Στο εν λόγω πείραμα, οι συγγραφείς ακολούθησαν την εξής διαδικασία. Το μόριο της κλενβουτερόλης συζευγμένο με CLB (CLB-HRP), ανταγωνίστηκε με το ελεύθερο μόριο CLB στα δείγματα για να συνδεθεί με το μονοκλωνικό αντίσωμα, που τροποποιήθηκε στην επιφάνεια ηλεκτροδίου άνθρακα, με την μέθοδο της επιτάχυνσης με ηλεκτρικό πεδίο (**Εικόνα 35**). Η βελτιωμένη ευαισθησία και ο μικρότερος χρόνος ανίχνευσης που επιτεύχθηκαν με την ενίσχυση ενζύμων και τις ηλεκτρικές δυνάμεις, απέδειξαν ότι, η εύχρηστη αυτή συσκευή

είναι ικανή για ταχεία και ευαίσθητη ανίχνευση σε άλλες εφαρμογές δοκιμών POC. Η μέθοδος που βασίστηκε στο ηλεκτρικό πεδίο επιλέχθηκε για να επιταχύνει την ανοσοαντίδραση στη διεπαφή στερεού-υγρού των ηλεκτροδίων, επιταχύνοντας έτσι την μεταφορά χαμηλής αφθονίας μορίων του φαρμάκου. Στη συνέχεια, ένα βιοτσιπ εργαλείου smartphone αναπτύχθηκε για να πραγματοποιήσει την ηλεκτροχημική ανίχνευση και να στείλει δεδομένα στο κινητό τηλέφωνο μέσω μιας θύρας USB. Ο ανοσοαισθητήρας που βασίζεται σε smartphone ήταν σε θέση να ανιχνεύσει τουλάχιστον 0,076 ng/ mL CLB σε διάστημα 6 λεπτών. Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι συνδυάζοντας διαφορετικά λειτουργικά ηλεκτρόδια, η συσκευή μπορεί να ικανοποιήσει όλων των ειδών τις απαιτήσεις για ανίχνευση σε απομακρυσμένες περιοχές που σχετίζονται με την ασφάλεια των τροφίμων. Τέλος, ο ανοσοαισθητήρας είναι πολύ πιο αποτελεσματικός για την ανίχνευση της κλενβουτερόλης CLB από οποιαδήποτε άλλη εργαστηριακή μέθοδο όπως ELISA, HPLC και φορητές μεθόδους που βασίζονται σε χαρτί (Li et al., 2013, Dou et al., 2016).



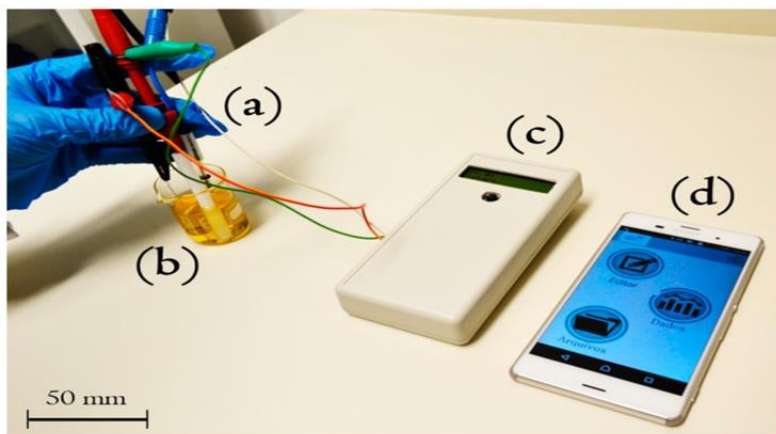
Εικόνα 35: Σχηματική αναπαράσταση ηλεκτροχημικού ανοσολογικού συστήματος για ανίχνευση CLE μέσω επώασης σε ηλεκτρικό πεδίο: (A) αυτοσχέδια η-λεκτροχημική συσκευή που βασίζεται σε smartphone, (B) τυπωμένο τσιπ ηλεκτροδίων, (C) ελεύθερη κλενβουτερόλη σε ανταγωνισμό με CLB-HRP για να συνδεθεί με το περιορισμένο αντίσωμα αντι-κλενβουτερόλη στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Το CLB-HRP σε συνδυασμό με το αντίσωμα κατά της κλενβουτερόλης κατέλυσε την ηλεκτροχημική αντίδραση του διαλύματος υποστρώματος TMB για να ληφθεί ένα σήμα ανίχνευσης ρεύματος. - Πηγή: Dou et al., 2016

3.7.2. Συνδυασμός ενός ποτενσιοστάτη με ένα κινητό τηλέφωνο για την αναγνώριση προτύπων δειγμάτων μελιού της Βραζιλίας σύμφωνα με τη βοτανική και γεωγραφική προέλευσή τους

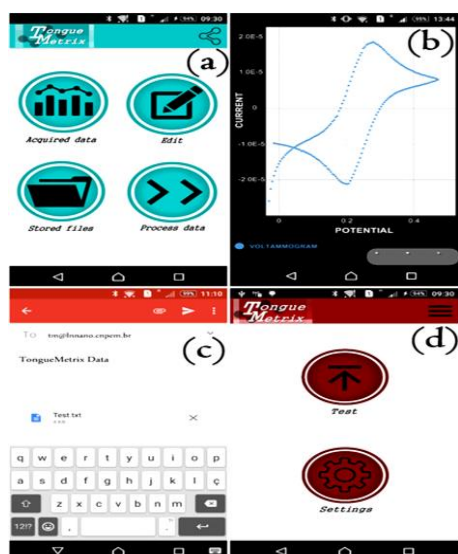
Οι Giordano et al., το 2016 ανέπτυξαν μια πλατφόρμα για αναλύσεις, χρησιμοποιώντας

έναν ποτενσιοστάτη με ένα κινητό τηλέφωνο και εφαρμόστηκαν με επιτυχία για την αναγνώριση προτύπων δειγμάτων μελιού της Βραζιλίας σύμφωνα με τη βοτανική και γεωγραφική τους προέλευσή. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι η πρώτη απόπειρα, σχετικά με την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος σημείου χρήσης με χημειομετρική επεξεργασία δεδομένων στο smartphone. Ο ποτενσιοστάτης βασίστηκε στο εργαλείο CheapStat, ένα πρόσφατα κατασκευασμένο εργαλείο ανάλυσης ανοιχτού κώδικα "do-it-yourself" (Rowe et al., 2011). Ενώ τα πιο εμπορικά ισχυρά στατιστικά κοστίζουν μερικές χιλιάδες δολάρια, το CheapStat απαιτεί λιγότερα από ογδόντα δολάρια για την κατασκευή του. Αρχικά η συγκεκριμένη πλατφόρμα χρησιμοποίησε έναν υπολογιστή τόσο ως παροχή ρεύματος όσο και ως συλλογή δεδομένων. Η εν λόγω μέθοδος εξετάστηκε κατά βάση για να υπάρξουν μελλοντικές βελτιώσεις όσον αφορά την αυτονομία της συσκευής και τη μετάδοση δεδομένων. Η εφαρμογή αυτή πραγματοποιήθηκε με κυκλική βολταμετρική χρησιμοποιώντας ένα ενιαίο και μη τροποποιημένο ηλεκτρόδιο χρυσού (Au). Οι αναλύσεις PCA πραγματοποιήθηκαν από το smartphone για να συγκεντρώσουν τις πιο χρήσιμες πληροφορίες από το σύνθετο σύνολο δεδομένων που προκύπτουν. Η ανθοκομική και γεωγραφική προέλευση των δειγμάτων μελιού εξακριβώθηκε με κυκλική βολταμετρική όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Αρχικά, παρασκευάστηκαν τρία διαλύματα κάθε δείγματος σε 100 g L^{-1} σε 100 mmol L^{-1} φωσφορικό ρυθμιστικό διάλυμα (PBS, pH 7.0). Οι βολταμετρικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε δυναμικό εύρος σάρωσης $-0,8$ έως $1,2 \text{ V}$ έναντι Ag/AgCl με ρυθμό σάρωσης 50 mV s^{-1} . Η αυτονομία επιτεύχθηκε με τη χρήση μιας μπαταρίας (9 V) ως τροφοδοτικό. Επιπλέον, η προτεινόμενη πλατφόρμα δεν επέτρεπε μόνο καλωδιακή σύνδεση USB, αλλά και ασύρματη επικοινωνία μέσω μιας μονάδας Bluetooth που ήταν ενσωματωμένη και επέτρεψε την απομακρυσμένη σύνδεση σε smartphones ή tablet, εξαλείφοντας έτσι τη χρήση πρόσθετων συστημάτων δικτύου. Σε σχέση με τις προόδους στο λογισμικό του smartphone, ανέπτυξαν παράλληλα ένα εσωτερικό λειτουργικό σύστημα App for Android (που ονομάζεται TongueMetrix) για τη συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία πολυμεταβλητών δεδομένων. Τέτοια μεγάλα και σύνθετα δεδομένα απαιτούν τη χρήση χημειομετρικών τεχνικών για την εξαγωγή χρήσιμων πληροφοριών από τις ληφθείσες μετρήσεις. Η πλατφόρμα εφαρμόστηκε με επιτυχία στη δημιουργία βολταμετρικών δακτυλικών αποτυπωμάτων πολλών δειγμάτων μελιού. Συμπερασματικά, η πλατφόρμα που προτείνουν, είναι μια ισχυρή εναλλακτική λύση για την ανίχνευση μοναδικών μοτίβων σε δείγματα μελιού που

σχετίζονται με τη βοτανική και γεωγραφική προέλευσή τους, καθώς είναι δυνητικά ελκυστική για επιτόπια πειράματα συνδυάζοντας την ανίχνευση υψηλής απόδοσης με εύκολο και απλό τρόπο, χαμηλό κόστος, φορητότητα, αυτονομία, σύστημα χωρίς καλώδια και ικανότητα διεξαγωγής σε πραγματικό χρόνο ολόκληρης της αναλυτικής μέτρησης σε απομακρυσμένα μέρη (Εικόνα 36).



Εικόνα 36: Φορητή πλατφόρμα που αναπτύσσεται για αναλύσεις σημείου χρήσης. Ηλεκτροχημικό σύστημα α), δείγμα μελιού β), ισχυριστάτη χειρός γ) και smartphone δ). με άδεια του Elsevier. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468616320>



Εικόνα 37: Στιγμιότυπα οθόνης smartphone που δείχνουν την εφαρμογή TongueMetrix Android. α) Αρχική οθόνη, β) τυπικό κυκλικό βολταμόγραμμα για το $\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}/3^-$ οξειδωμένος καθετήρας, γ) προαιρετική διαβίβαση δεδομένων μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και δ) οθόνη διεπαφής για το PCA.

3.7.3 Ηλεκτροχημικός βιοαισθητήρας για ανίχνευση της αιθανόλης στις μύρες

Ο ποιοτικός έλεγχος των προϊόντων διατροφής αποτελούν τεράστια ζητήματα στον αγροδιατροφικό τομέα, όπως τονίζει και η εφημερίδα Αμβούργο στο άρθρο της: «η διασφάλιση της ασφάλειας και της ποιότητας των τροφίμων και των ιατρικών προϊόντων δεν ήταν ποτέ

πιο περίπλοκη» (MA.Hamburg, 2011) . Επομένως, απαιτούνται μέθοδοι αξιόλογες που να έχουν την ικανότητα να παρέχουν γρήγορες, οικονομικές, αξιόπιστες και εύκολες απαντήσεις. Εκτός από τις παραδοσιακές μεθόδους όπως η χρωματογραφία, η φασματομετρία μάζας, η NMR και οι εξαρτώμενες από το φως προσεγγίσεις (UV), αρκετές ερευνητικές δραστηριότητες έχουν στραφεί στην αναλυτική χημεία και έχουν επικεντρωθεί στην ανάλυση των προϊόντων με την μεγαλύτερη κατανάλωση, όπως τα τρόφιμα και τα ποτά. Αναφορικά, σε μια έκθεση που πραγματοποιήθηκε το 2013, υπολογίστηκε ότι η παγκόσμια κατανάλωση μπίρας έφτασε τα 188,81 δισεκατομμύρια λίτρα το 2013, αυξημένη κατά 0,5% από το 2012, αντιπροσωπεύοντας την 28η συνεχή χρονιά ανάπτυξης (Kirin Beer University Report Global Beer Consumption by Country in 2013). Η περιεκτικότητα της μπίρας σε αιθανόλη αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία της και χρησιμοποιείται για τη διασφάλιση της αυθεντικότητας της. Μια αξιόπιστη ανίχνευση μπορεί να βελτιώσει όχι μόνο την εμπιστοσύνη των καταναλωτών, αλλά μπορεί επίσης να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για τον έλεγχο της διαδικασίας. Στην διαδικασία της παραγωγής μπίρας, οι εταιρείες χρειάζονται μεθοδολογίες για να μπορούν να ταξινομήσουν τις μπίρες στις κατηγορίες τους (Pilsner, Lager, Weiss κ.λπ.), ανάλογα με τις διάφορες ιδιότητες, π.χ. αλκοολικό τίτλο, χρώμα, γεύση, περιεκτικότητα σε σάκχαρα, πικράδα, προέλευση κ.λπ. Επιπλέον, οι αρχές τροφίμων ζητούν βιώσιμες αναλυτικές μεθόδους ικανές να επιβεβαιώσουν την ποιότητα των τροφίμων και ποτών που φέρουν ετικέτα (Mignani et al., 2012, O'Neill et al., 2014). Ανάμεσα από τα συστατικά και τις ιδιότητες που χαρακτηρίζουν μια μπίρα, η αιθανόλη είναι μια στρατηγική ένωση ώστε να αντιληφθούμε την κατάσταση αποθήκευσης της μπίρας καθώς και την ανάπτυξη νέων προϊόντων, όπως είναι οι μπίρες με χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκοόλ. Η ηλεκτροανάλυση είναι καλά καθιερωμένη ως τεχνική για την εύκολη ανίχνευση της αιθανόλης.

Οι Cinti et al., το 2017 ανέπτυξαν ένα βιοαισθητήρα με βάση το χαρτί για την ανίχνευση αιθανόλης σε εμπορικές μπίρες. Στην μελέτη που πραγματοποίησαν ανέλυσαν τέσσερα διαφορετικά είδη μπίρας, μια «Lager» (Best Bräu, Πολωνία), μια «Pilsner» (Ceres Top Pilsner, Δανία), μια «Weiss» (Franziskaner, Γερμανία) και μια «χωρίς αλκοόλ» (Tourtel, Ιταλία), των οποίων η περιεκτικότητα σε αιθανόλη που αναφερόταν στις ετικέτες ήταν αντίστοιχα, 4,7 % vol (0,805 M), 4,6 % vol (0,787 M), 5 % vol (0,856 M) και <0,5 % vol(0,086 M). Οι μπίρες Lager, Pilsner και Weiss αραιώθηκαν περίπου σε τελική συγκέντρωση 0,2 M

σε νερό, ενώ η χωρίς αλκοόλη δεν αραιώθηκε. Για να πραγματοποιηθεί ο ποσοτικός προσδιορισμός της αιθανόλης στα πραγματικά δείγματα, μια σταγόνα 100 μL δείγματος, που περιείχε περίπου 4 mM (0,023 % vol) αιθανόλης, αναλύθηκε με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε για τα πρότυπα διαλύματα. Η αιθανόλη που ανιχνεύθηκε στις τρεις «αλκοολούχες» μπίρες έδειξε πολύ καλή συμφωνία με την περιεκτικότητα σε αιθανόλη που δήλωσε ο παραγωγός. Η «μη αλκοολική» μπίρα, το σήμα που καταγράφηκε είχε ως αποτέλεσμα συγκέντρωση 0,059 M (0,34 % vol), σχετική τυπική απόκλιση (RSD) = 6,8%. Για να επιτευχθεί αυτό, ένα νανοσύνθετο που σχηματίστηκε από νανοσωματίδια αιθάλης, χρησιμοποιήθηκε ως ηλεκτροκαταλύτης στη συσκευή για την ανίχνευση του υπεροξειδίου του υδρογόνου (H_2O_2) που παράγεται από την ενζυματική αντίδραση μεταξύ αιθανόλης και οξειδάσης αλκοόλης (AOx). Η συσκευή που αναπτύχθηκε μπόρεσε να ανιχνεύσει αιθανόλη έως και 10 mM (0,058% vol) με όριο ανίχνευσης περίπου 0,52 nM (0,003% vol) σε διαφορετικούς τύπους μπίρας. Συμπερασματικά ακολουθώντας απλές και προσίτες προσεγγίσεις, κατέστη δυνατή η κατασκευή μιας συσκευής μιας χρήσης ικανής να ανιχνεύει με ακρίβεια την αιθανόλη σε διαφορετικές μπίρες. Μελλοντικές μελέτες έχουν ως στόχο να επιτύχουν συνδυαστικά και την χρήση smartphone σε παρόμοιους ελέγχους έτσι ώστε να επιτυγχάνουν πιο γρήγορα αποτελέσματα οπουδήποτε το απαιτούν οι συνθήκες.

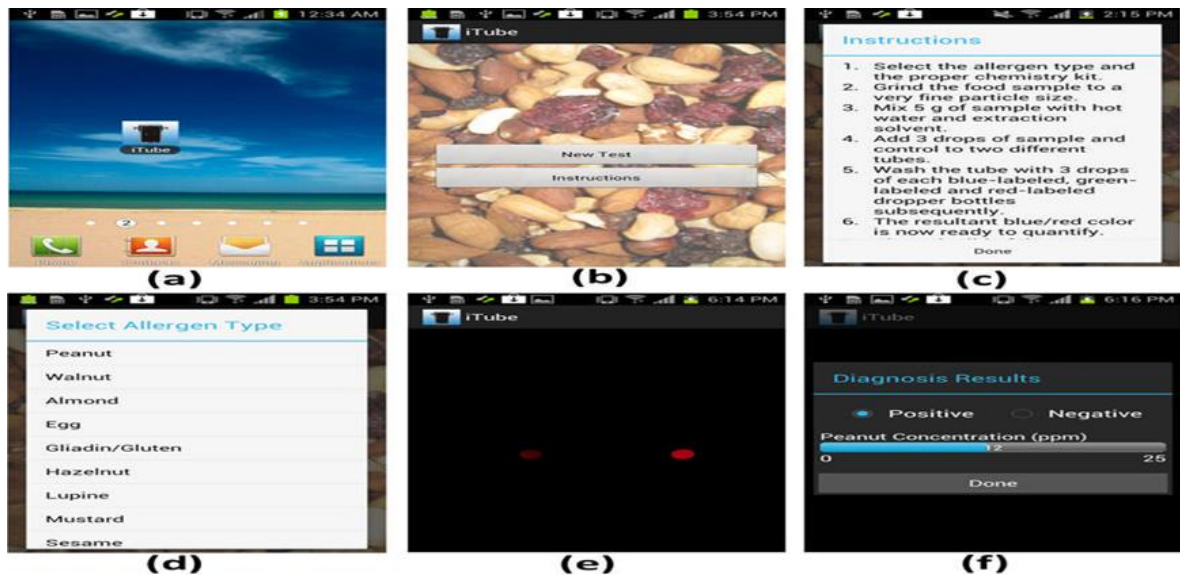
3.8 Πλατφόρμες διάγνωσης τροφίμων που βασίζονται σε smartphone

Πρόσφατα, διάφορες νεοσύστατες εταιρείες προτείνουν τη χρήση κινητών συσκευών ικανών να ελέγξουν την ποιότητα των τροφίμων και να καθορίσουν τα συστατικά τους, χάρη στην αυξανόμενη χρήση των πλατφορμών όπως η Indiegogo και Kickstarter. Τα συγκεκριμένα "έξυπνα" συστήματα αντιπροσωπεύουν κινητά και μικροσκοπικά εργαστήρια, βελτιστοποιημένα για τον εντοπισμό ενός συγκεκριμένου στόχου, τα οποία προσφέρονται σε συνδυασμό με ειδικές εφαρμογές smartphone και παρέχουν έναν εύκολο και εύχρηστο χειρισμό για τον χρήστη και την εμφάνιση των αποτελεσμάτων των δοκιμών, που λαμβάνονται μέσω σύνδεσης BLE (Bluetooth χαμηλής ενέργειας). Επίσης, καθώς η συνδεσιμότητα των smartphone πραγματοποιείται οπουδήποτε και αν θέλουμε, γίνονται μοντέλα IoT (Internet of Things) που μπορούν να αξιοποιήσουν την εκτεταμένη υπολογιστική ισχύ και να εκμεταλλευτούν τον χώρο αποθήκευσης που προσφέρει το cloud computing. Πα-

ρακάτω αναφέρονται εφαρμογές και προϊόντα τα οποία κατέχουν κατοχυρωμένο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας.

Η Cellmic LLC (πρώην Holomic LLC), που ιδρύθηκε από τον καθηγητή Aydogan Ozcan, προσφέρει μια σειρά αναγνωστικών δοκιμών ταχείας διάγνωσης για προηγμένα διαγνωστικά για κινητά(<http://www.cellmic.com>). Μια από τις πλατφόρμες είναι η πλατφόρμα ελέγχου αλλεργιογόνων που έχει ήδη έχει περιγραφεί σε παραπάνω κεφάλαιο και καλύπτεται από δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (Ozcan et al., 2013) . Αυτή η συσκευή αναπτύχθηκε από τους ερευνητές του UCLA για την ανίχνευση αλλεργιογόνων, με βάση ένα kit ELISA και έναν δοκιμαστικό σωλήνα που περιέχει προσαρτημένη μονάδα στην κάμερα του smartphone. Η εν λόγω εφαρμογή Android, λειτουργεί ως εξής:

- Ο χρήστης κάνει κλικ στο εικονίδιο του iTube και ξεκινά να εκτελεί την έξυπνη εφαρμογή στο κινητό τηλέφωνο.
- Το νέο παράθυρο παρέχει δύο επιλογές: Είτε Νέα δοκιμή ή Οδηγίες. Μόλις επιλεγεί η καρτέλα Οδηγίες, εμφανίζεται το πρωτόκολλο χρήστη για τη δοκιμή αλλεργιογόνων. Διαφορετικά, εάν επιλεγεί Νέα δοκιμή, ο χρήστης καλείται να προσδιορίσει τον τύπο αλλεργιογόνου που πρόκειται να δοκιμαστεί.
- Όταν ο χρήστης αποφασίσει για τον τύπο του αλλεργιογόνου που θα δοκιμαστεί (π.χ. φιστίκι), η εφαρμογή κινητού τηλεφώνου ενεργοποιείται στην ψηφιακή κάμερα του τηλεφώνου. Στη συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να αγγίξει την οθόνη του κινητού τηλεφώνου για να τραβήξει ταυτόχρονα τις εικόνες μετάδοσης των σωλήνων (δηλ. τόσο του δείγματος όσο και του σωλήνες ελέγχου).
- Αυτές οι ληφθείσες εικόνες υποβάλλονται σε επεξεργασία μέσα σε ένα δευτερόλεπτο για να προσδιοριστεί η συγκέντρωση του επιλεγμένου αλλεργιογόνου εντός ενός εύρους από 1 έως 25 μέρη ανά εκατομμύριο (ppm). Το αποτέλεσμα της δοκιμής εμφανίζονται ως "θετικό" για ≥ 1 ppm ή "αρνητικό" για < 1 ppm (Ozcan et al., 2013).



Εικόνα 38: Εμφανίζονται στιγμιότυπα οθόνης της εφαρμογής μας iTube που εκτελείται σε κινητό τηλέφωνο Android. Μόλις εκτελεστεί η εφαρμογή, μπορεί να επιλεγεί είτε η καρτέλα Νέα δοκιμή είτε η καρτέλα Οδηγίες. Ο χρήστης μπορεί να διαβάσει το πρωτόκολλο δοκιμών που εξηγείται στις Οδηγίες. Με την επιλογή του New Test, μπορεί να οριστεί ένας τύπος αλλεργιογόνου ενδιαφέροντος στο αναδυόμενο μενού. Μετά την ενεργοποίηση της κάμερας κινητού τηλεφώνου, ο χρήστης μπορεί απλώς να αγγίξει την οθόνη για να τραβήξει τις εικόνες μετάδοσης των δοκιμαστικών σωλήνων και των σωλήνων ελέγχου. Οι ληφθείσες εικόνες υποβάλλονται σε ταχεία επεξεργασία στο κινητό τηλέφωνο για να ποσοτικοποιηθεί η ποσότητα αλλεργιογόνου εντός του δείγματος τροφής στόχου (Ozcan et al., 2013)

Η MyDx Inc. είναι μια εταιρεία επιστήμης και τεχνολογίας που δημιούργησε το MyDx, έναν φορητό ηλεκτρονικό στόχο για να μετρήσει με ακρίβεια τις χημικές ουσίες που υπάρχουν στα τρόφιμα και το νερό, να ανιχνεύσει ίχνη φυτοφαρμάκων ή μετάλλων και να αποστείλει αποτελέσματα σε smartphone που χειρίζονται από την εφαρμογή MyDx. Η εταιρεία κατέχει πολλά σχετικά διπλώματα ευρεσιτεχνίας. Στο ηλεκτρονικό site παρουσιάζουν τους αισθητήρες μιας χρήσης OrganaDx™ οι οποίοι δεν απαιτούν ψηφιακό στόχο και είναι πιο προσιτοί για τους καταναλωτές, ώστε να μπορούν να ξεκινήσουν τις δοκιμές σήμερα (<https://www.mydxlife.com/organa-sensor-v2>). Τα χαρακτηριστικά τους είναι τα εξής:

1. Είναι κατάλληλοι για δοκιμές για φυτοφάρμακα, βαρέα μέταλλα και άλλες νευροτοξικές χημικές ουσίες σύμφωνα με την Κατευθυντήρια Γραμμή για την Ασφάλεια της Στρατιωτικής Έκθεσης των ΗΠΑ
2. Εύκολο στη χρήση, Pass/Fail αποτελέσματα μέσα σε 6 λεπτά
3. Δοκιμασμένο ανεξάρτητα από το Κέντρο Έρευνας για την Περιβαλλοντική Υγεία του Στρατού των ΗΠΑ



Εικόνα 39: Αισθητήρας μια χρήσης της OrganaDx™ - Πηγή: (<https://www.mydxlife.com/organa-sensor-v2>)

Επιστήμονες και ερευνητές του Πανεπιστημίου Τεχνολογίας του Κάουνας, σε συνεργασία με την εταιρεία ARS Lab, ανέπτυξαν την πατενταρισμένη έξυπνη ηλεκτρονική μύτη FOODsniffer (πρώην PERES) (Gailius, 2014). Βασίζεται σε αισθητήρες αερίου και προορίζεται για την αλλοίωση του κρέατος και των ψαριών ανιχνεύοντας αέρια που αντανάκλουν τέτοια αλλοίωση.



Εικόνα 40: Το OrganaDx™ θα λειτουργεί ως προκαταρκτικός ελεγκτής όπου θα ανιχνεύσετε επιβλαβείς χημικές ουσίες στα τρόφιμα μέσα σε λίγα λεπτά (<https://www.mydxlife.com/organa-sensor-v2>)

Είναι η πρώτη φορητή συσκευή χειρός στον κόσμο που καθορίζει τη φρεσκάδα του ωμού κρέατος, των πουλερικών και των ψαριών. Μόλις συνδεθεί ασύρματα στο smartphone σας μέσω εφαρμογής, μετρά τα επίπεδα αερίων ωμού κρέατος, αναλύει τα αποτελέσματα και σας ενημερώνει αμέσως για το επίπεδο φρεσκάδας και ασφάλειας για κατανάλωση. <http://www.myfoodsniiffer.com>

Η **Nimasensor**, αναπτύχθηκε από τη Nima Labs Inc. και επιτρέπει τον εντοπισμό της παρουσίας γλουτένης στα τρόφιμα. Βασίζεται στην τεχνική του ανοσοαισθητήρα, κατά την οποία ένα συγκεκριμένο αντίσωμα δεσμεύει τη γλουτένη, πυροδοτώντας τη διαδικασία μεταγωγής. (Sundvor et al., 2016). Σύμφωνα με έρευνα που δημοσιεύτηκε στο American Journal of Gastroenterology, 1 στα 3 πιάτα εστιατορίου με ετικέτα χωρίς γλουτένη περιέχει γλουτένη. Τα τρόφιμα δοκιμάζονται μέσα σε ένα φυσίγγιο μιας χρήσης που στη συνέχεια εισάγεται στο κύριο σώμα της συσκευής. Τα αποτελέσματα παρέχονται μέσω μιας ειδικής εφαρμογής. Η συσκευή Nima ενσωματώνει μια οθόνη OLED που δείχνει την γλουτένη για συγκεντρώσεις από 20 ppm και άνω (<https://nimasensor.com>).



Εικόνα 41: FOODsniffer και εφαρμογή FOODsniffer που εκτελεί μια βιο-οργανική δοκιμή που μπορεί να "μυρίσει" και να ελέγξει εάν το κρέας είναι καλό για κατανάλωση.(<http://www.myfoodsniiffer.com>)



Εικόνα 42: Η Συσκευή NIMA. (<https://nimasensor.com>)

Πολλές νέες εταιρείες προσφέρουν αισθητήρες βασισμένους στην αναδυόμενη και πολλά υποσχόμενη τεχνική της φασματοσκοπίας NIR. Το **Spectral Engine Oy** παρουσίασε προϊόντα υψηλής τεχνολογίας βασισμένα σε ένα ρυθμιζόμενο οπτικό φίλτρο ως ένα ιδιότυπο συστατικό, που προήλθε από χρόνια έρευνας που πραγματοποιήθηκε στο Κέντρο Τεχνικών Ερευνών VTT της Φινλανδίας, η οποία κατέληξε σε πολλά κατοχυρωμένα διπλώματα ευρεσιτεχνίας (Antila et al., 2016). Η πλατφόρμα της συσκευής αισθητήρων ασύρματου NIR, η οποία έχει σχεδιαστεί για ανάπτυξη φορητών εφαρμογών, έχει την ικανότητα να λειτουργεί συνδυαστικά με υπολογιστή, tablet και smartphone. Η ιδέα του Food Scanner χρησιμοποιεί τον ασύρματο αισθητήρα NIR σε συνδυασμό με προηγμένους αλγόριθμους, συνδεσιμότητα στο cloud και μια τεράστια βιβλιοθήκη υλικών ώστε να αποκαλύψει το λίπος, την πρωτεΐνη, τη ζάχαρη και το συνολικό ενεργειακό περιεχόμενο των τροφίμων με καλό επίπεδο ακρίβειας.

(<https://www.spectralengines.com/products/food-scanner>)

Η **TellSpec Inc.** πρότεινε ένα φασματόμετρο NIR σε μέγεθος τσέπης και μια εφαρμογή για κινητά που συνεργάζονται για τη σάρωση τροφίμων, τον προσδιορισμό θερμίδων, μακροθρεπτικών συστατικών, αλλεργιογόνων και μολυσματικών ουσιών όπου θα παρέχουν σχετικές πληροφορίες όπως είναι η διατροφική απάτη, νοθεία τροφίμων και ποιότητα τροφίμων (Watson et al., 2015). Το φασματόμετρο βασίζεται στην τεχνολογία

Texas Instruments DLP[®] NIRscan. (<http://tellspec.com>)

4. Συζήτηση – Συμπεράσματα

4.1 Προοπτική της χρωματομετρίας ψηφιακής εικόνας σε smartphone

Η ευρεία χρήση των smartphone στην σημερινή εποχή, η ισχυρή τους ικανότητα στην επεξεργασία και η φορητότητα τους κατάφερε να δημιουργήσει την χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας DIC στα κινητά τηλέφωνα. Τα smartphone χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με μικρορευστοποιημένα τσιπ και διαγνωστικά με βάση το χαρτί, συμπεριλαμβανομένων των δοκιμών πλευρικής ροής και αναλυτικών συσκευών με βάση την μικρορευστότητα χαρτιού για δοκιμές επιτόπου στο σημείο ενδιαφέροντος. Έτσι, το DIC στο smartphone καταλήγει στο να μια τάση για διάφορες αναλυτικές λειτουργίες, μετρήσεις, επεξεργασίες και κοινοποίηση των αποτελεσμάτων που μοιράζονται διαδικτυακά μεταξύ παραγωγών, καταναλωτών και ελεγκτών. Ωστόσο, οι περισσότερες από τις δημοσιευμένες μελέτες στις μέρες μας έχουν αποδείξει ότι η χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας DIC στο smartphone θα πρέπει να εξελιχθεί και να βελτιωθεί περαιτέρω, με ελεγχόμενη γεωμετρία και τυπικές πηγές φωτός (συνήθως σύμφωνα με τα πρότυπα CIE) έτσι ώστε να καταφέρουν να γίνουν μελλοντικά ακόμη πιο ισχυρές και αξιόπιστες αναλυτικές διαδικασίες. Θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ακόλουθα ζητήματα.

- Η σταθερότητα των συνθηκών λήψης εικόνας. Τα σύγχρονα smartphone έχουν σαφώς καλύτερη ποιότητα οπτικών εξαρτημάτων τα οποία είναι ενσωματωμένα στα κινητά ωστόσο όμως στην πραγματικότητα δεν έχουν παραχθεί για να χρησιμοποιούνται για λήψη εικόνων με σκοπό την χρωματομετρία ψηφιακής εικόνας. Επιπλέον, οπτικά εξαρτήματα όπως φακοί macro, φίλτρα, οπτικές ίνες ή παραμετροποιητές δεν είναι συνήθως διαθέσιμα για τα περισσότερα smartphone και, εάν χρειάζονται, πρέπει να κατασκευάζονται για κάθε ειδικό σκοπό.
- Ο φωτισμός πρέπει να ελέγχεται για ομοιογένεια χρώματος. Είναι ένα από τα βασικά σημεία για μια αξιόπιστη αναλυτική διαδικασία. Προς το παρόν έχουν δημοσιευτεί πολλά έρευνες που αναφέρουν ότι ο ελεγχόμενος φωτισμός μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας έναν ελεγχόμενο θάλαμο ή χρησιμοποιώντας τη ρύθμιση «ΕΚΘΕΣΗ» στα νέα τηλέφωνα. Η διασφάλιση της ομοιογένειας χρώματος κάτω από τον ίδιο φωτισμό είναι ένα από τα κλειδιά για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας ανάλυσης. Ο ίδιος φωτισμός με ελεγχόμενη γεωμετρία και κατάλληλες πηγές φωτός θα μπορούσαν να κάνουν DIC στο smartphone να γίνει μια αξιόπιστη και αναλυτική διαδικασία.

- Έλεγχος του κατάλληλου χρωμογόνου αντιδραστήριου για την αναλυόμενη ουσία για την επίτευξη υψηλότερης ευαισθησίας και επιλεκτικότητας μέτρησης. Στοχεύοντας σε αξιόπιστο αποτέλεσμα οι αναλυτικές τεχνικές DIC δεν απαιτούν μόνο ισχυρές συσκευές για την εικόνα αλλά και επαναλαμβανόμενα, σταθερά, ευαίσθητα και χαμηλού κόστους χρωμογόνα αντιδραστήρια. Μόλις η αναλυόμενη ουσία αντιδράσει με το επιλεγμένο χρωμογόνο αντιδραστήριο, τα προϊόντα της αντίδρασης είναι επιθυμητό να κατανεμηθούν ομοιογενώς στην περιοχή ανίχνευσης για αύξηση της επιλεκτικότητας και βελτίωση της ευαισθησίας.

4.2 Προοπτική του φθορισμού στην ανάλυση τροφίμων με τη χρήση Smartphone

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια ανάπτυξη των ευαίσθητων στρατηγικών, οι προσπάθειες που έχουν γίνει για την ανάπτυξη ταχείας ποσοτικοποίησης των παθογόνων στόχων με βάση τον φθορισμό απευθείας από ακατέργαστα ή ελάχιστα επεξεργασμένα σύνθετα δείγματα έχουν αυξηθεί (Zhu et al., 2012). Η χρήση το smartphone για τον έλεγχο των τροφίμων σε συνδυασμό με πρόσθετα εργαλεία, έχουν προσφέρει επιτόπια ανίχνευση βακτηρίων ως πιθανή εναλλακτική λύση στη συμβατική μικροσκοπία και μια ταχύτερη και ευκολότερη εναλλακτική λύση στις εργαστηριακές μεθόδους ανίχνευσης (Gopinath 2014, Koydemir and Ozcan, 2017). Οι εικόνες που λαμβάνονται χρησιμοποιώντας το μικροσκόπιο που βασίζεται σε smartphone μπορούν να χρησιμοποιηθούν έτσι ώστε να ποσοτικοποιηθεί ο στόχος με βάση τα διάφορα χαρακτηριστικά όπως η διάσταση, το χρώμα και η συνολική ένταση φθορισμού που μπορεί να είναι χρήσιμα στη διάγνωση της υγειονομικής περιθάλψης και στον έλεγχο υψηλής απόδοσης. Οι περισσότερες αναλυτικές μέθοδοι που βασίζονται σε smartphone μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο από εξειδικευμένο προσωπικό όσο και από μη εκπαιδευμένους καταναλωτές, οπότε θα μπορούσαν να εφαρμοστούν τακτικά για την παρακολούθηση της ποιότητας των τροφίμων, σε όλα τα στάδια παραγωγής και διανομής και τέλος στο σπίτι από τον καταναλωτή (Lu, Shi, & Liu, 2019). Ωστόσο, ενώ παρατηρούμε ότι έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στον τομέα των φορητών και εύχρηστων προς τον χρήστη αναλυτικών μεθοδολογιών, πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος του φθορισμού για την ποσοτικοποίηση του στόχου, θα πρέπει να γίνει περαιτέρω αριθμός δοκιμών προτού ακόμη εξεταστεί η χρήση των λύσεων που προτείνονται από τους ερευνητές. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όσον αφορά την αξιολόγηση της ποιότητας των τροφίμων όπου η εκτενής επικύρωση των πιθανών μεθοδολογιών είναι ζωτικής σημασίας.

Υπάρχουν σημαντικά ερωτήματα που εγείρονται από τη σκοπιά τόσο των ερευνητών όσο και των εκπροσώπων του κλάδου που μπορεί να ενδιαφέρονται για τη μελλοντική εφαρμογή αυτών των μεθόδων όπως (de Oliveira Krambeck Franco et al., 2017; Silva & Rocha, 2020, Zeinhom et al., 2018, Zhu et al., 2012):

- Είναι η προτεινόμενη προσέγγιση συγκεκριμένη μόνο για έναν τύπο βακτηρίων και η παρουσία άλλων ειδών αλλοιώνει τα ληφθέντα αποτελέσματα;
- Είναι επαρκής η ανάκτηση σε διαφορετικές παρτίδες του προϊόντος;
- Η προμήθεια τροφίμων από διάφορους διανομείς επηρεάζει τα αποτελέσματα;
- Πώς συγκρίνεται το όριο ανίχνευσης της μεθόδου με τις μεθόδους αναφοράς;

Συμπερασματικά, θα πρέπει να γίνουν περαιτέρω έρευνες, πειράματα και δοκιμές για την συγκεκριμένες μεθοδολογίες, όπως συμβαίνει και στους άλλους κλάδους της ανάλυσης των τροφίμων, έτσι ώστε να ωριμάσουν οι τεχνικές που βασίζονται σε smartphone.

4.3. Προοπτική της φασματοσκοπίας για τον έλεγχο των τροφίμων

Τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει μεγάλη ανάπτυξη των μεθόδων ανάλυσης που χρησιμοποιούν φορητές συσκευές φασματοσκοπίας, σε συνδυασμό πάντα με χημειομετρική ανάλυση, για την επαλήθευση της γνησιότητας των τροφίμων, της ιχνηλασιμότητας, του ελέγχου αλλοιώσεων των τροφίμων, της ωριμότητας των φρούτων κλπ. Η συνδεσιμότητα των τροφικών αλυσίδων μεταξύ καλλιεργητών, μεταποιητών και εμπόρων λιανικής, επικυρωμένη με ταχεία και συχνή ανάλυση, έχει τη δυνατότητα να διασφαλίσει ότι τα τρόφιμα που φτάνουν στον καταναλωτή είναι ασφαλή προς κατανάλωση. Ο συνδυασμός της φασματοσκοπίας και η χρήση smartphone στην αξιολόγηση και παρακολούθηση της ποιότητας των τροφίμων θα ήταν η χρήση τους ως κινητά φασματόμετρα, καθώς μπορούσε κάλλιστα να λειτουργήσει ως ανιχνευτής, σε συνδυασμό με μια ενσωματωμένη διεπαφή χρήστη και επεξεργαστή εικόνας. Ωστόσο, χρειάζεται περισσότερη εστίαση σε αυτόν τον τομέα για να ξεπεραστούν οι τρέχουσες προκλήσεις. Αναμένουμε μελλοντικές έρευνες και πειράματα έτσι ώστε να υπάρξουν καλύτερα αποτελέσματα στον συγκεκριμένο τομέα.

5. Βιβλιογραφία

- Abbasi A. , S. Hanif, M. Shakir Gum acacia-based silver nanoparticles as a highly selective and sensitive dual nanosensor for Hg(ii) and fluorescence turn-off sensor for S²⁻ and malachite green detection RSC Advances, 10 (6) (2020), pp. 3137-3144
- Ali H. , M. Saleem, M.R. Anser, S. Khan, R. Ullah, M. Bilal Validation of fluorescence spectroscopy to detect adulteration of edible oil in extra virgin olive oil (EVOO) by applying chemometrics Appl. Spectrosc., 72 (2018), pp. 1371-1379, [10.1177/0003702818768485](https://doi.org/10.1177/0003702818768485)
- Ang, L.-M., Seng, K. P., Oczkowski, A., Deloire, A., & Schmidtke, L. M. (2018). Development of a smartphone app for berry quality assessment. In P.-L. Teissedre, & L. Martinez (Eds.), 7th International Symposium “Opportunities and challenges for vine and wine production by preserving resources and environment” (pp. 81–87). Retrieved from <https://www.waze.com/>.
- Antila, J.; Kantojärvi, U.; Mäkynen, J. Optical Measurement System. WO2016071572A1, 2016.
- Aquino, A., Barrio, I., Diago, M. P., Millan, B., & Tardaguila, J. (2018). vitisBerry: An Android-smartphone application to early evaluate the number of grapevine berries by means of image analysis. Computers and Electronics in Agriculture, 148, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.021>. February.
- A.W. Martinez, S.T. Phillips, E. Carrilho, S.W. Thomas, H. Sindi, G.M. Whitesides, Anal. Chem. 80 (2008) 3699–3707.
- Barbin, D. F., Mastelini, S. M., Barbon, S., Campos, G. F. C., Barbon, A. P. A. C., & Shimokomaki, M. (2016). Digital image analyses as an alternative tool for chicken quality assessment. Biosystems Engineering, 144, 85–93. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.01.015>
- Bouyé, C.; Kolb, H.; D’Humières, B. Mini and micro spectrometers pave the way to on-field advanced analytics. In Proceedings of the SPIE-Photonics Instrumentation Engineering III, San Francisco, CA, USA, 13 February 2016; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2016; Volume 9754.
- Burns D. , E. Ciurczak Handbook of near-infrared analysis (third ed.), CRC Press (2007)
- Calvert G.M., D.K.Platt, R.Das, R.Rosales, O. Shafey, C.Thomsen, D. Male, J. Beckman, E. Arvizu, M. Lackovic Am. J. Ind. Med., 45 (1) (2004), pp. 14-23
- Cayuela-Sánchez J.A. , J. Palarea-Albaladejo, J.F. García-Martín, M. del C. Pérez-Camino Olive oil nutritional labeling by using Vis/NIR spectroscopy and compositional statistical methods Innovat. Food Sci. Emerg. Technol., 51 (2019), pp. 139-147, [10.1016/j.ifset.2018.05.018](https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.018)
- Chen, A.; Wang, R.; Bever, C.R.S.; Xing, S.; Hammock, B.D.; Pan, T. Smartphone-interfaced lab-on-a-chip devices for field-deployable enzyme-linked immunosorbent assay. Biomicrofluidics 2014, 8, 064101. [CrossRef] [PubMed] Sensors 2017, 17, 1453 21 of 22
- Chen G., W. Chen, Y. Yen, C. Wang, H. Chang, C. Chen, Anal. Chem. 86 (2014) 6843–6849.
- Chen, Y., Fu, G., Zilberman, Y., Ruan, W., Ameri, S. K., Zhang, Y. S., et al. (2017). Low cost smart phone diagnostics for food using paper-based colorimetric sensor arrays. Food Control, 82, 227–232. <https://doi.org/10.5307/JBE.2017.42.4.330> Cisco Visual Networking Index. (2019). Global mobile data traffic Forecast update, 2017- 2022

- Choi, J.R.; Hu, J.; Tang, R.; Gong, Y.; Feng, S.; Ren, H.; Wen, T.; Li, X.; Abas, W.A.B.W.; Píngguan-Murphy, B. An integrated paper-based sample-to-answer biosensor for nucleic acid testing at the point of care. *Lab Chip* 2016, 16, 611–621.
- Cinti Stefano, Mattia Basso, Danila Moscone, Fabiana Arduini, “A paper-based nanomodified electrochemical biosensor for ethanol detection in beers”, *Analytica Chimica Acta*, Volume 960, 2017, Pages 123-130, ISSN 0003-2670, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2017.01.010>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267017300892>)
- Clydesdale F.M., *Colorimetry—methodology and applications*, CRC Crit. Rev. Food Sci. Nutr. 10 (3) (1978) 243–301.
- Coskun, A. F., Wong, J., Khodadadi, D., Nagi, R., Tey, A., & Ozcan, A. (2013). A personalized food allergen testing platform on a cellphone. *Lab on a Chip*, 13(4), 636–640. <https://doi.org/10.1039/c2lc41152k>
- Costa G.B., D.D.S. Fernandes, V.E. Almeida, T.S.P. Araújo, J.P. Melo, P.H.G. D. Diniz, G. V´eras, Digital image-based classification of biodiesel, *Talanta* 139 (2015) 50–55
- Das, A.J.; Wahi, A.; Kothari, I.; Raskar, R. Ultra-portable, wireless smartphone spectrometer for rapid, non-destructive testing of fruit ripeness. *Sci. Rep.* 2016, 6, 32504. [Cross-Ref] [PubMed]
- Dixit, C. K., & Twyman, R. M. (2019). Immunoassays, clinical applications. In *Encyclopedia of analytical science* (pp. 8–14). Elsevier
- Dong W., Y. Zhang, B. Zhang, X. Wang Quantitative analysis of adulteration of extra virgin olive oil using Raman spectroscopy improved by Bayesian framework least squares support vector machines *Anal. Methods.*, 4 (2012), pp. 2772-2777, [10.1039/c2ay25431j](https://doi.org/10.1039/c2ay25431j)
- Dou, Y.; Jiang, Z.; Deng, W.; Su, J.; Chen, S.; Song, H.; Aldalbahi, A.; Zuo, X.; Song, S.; Shi, J.; Fan, C. Portable detection of clenbuterol using a smartphone-based electrochemical biosensor with electric field-driven acceleration. *J. Electroanal. Chem.* 2016, 781, 339–344. [CrossRef]
- DuVall, J.A.; Borba, J.C.; Shafagati, N.; Luzader, D.; Shukla, N.; Li, J.; Kehn-Hall, K.; Kendall, M.M.; Feldman, S.H.; Landers, J.P. Optical Imaging of Paramagnetic Bead-DNA Aggregation Inhibition Allows for Low Copy Number Detection of Infectious Pathogens. *PLoS ONE* 2015, 10, e0129830. [CrossRef] [PubMed]
- Espadas-aldana G. , C. Vialle, J. Belaud, C. Vaca-garcia, C. Sablayrolles Analysis and trends for Life Cycle Assessment of olive oil production *Sustain. Prod. Consum.*, 19 (2019), pp. 216-230, [10.1016/j.spc.2019.04.003](https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.04.003)
- Fang, J.; Qiu, X.; Wan, Z.; Zou, Q.; Su, K.; Hu, N.; Wang, P. A sensing smartphone and its portable accessory for on-site rapid biochemical detection of marine toxins. *Anal. Methods* 2016, 8, 6895–6902. [CrossRef]
- Feng Y.Z., Sun D.W. Application of hyperspectral imaging in food safety inspection and control: A review. *Crit. Rev. Food. Sci.* 2012;52:1039–1058. doi: 10.1080/10408398.2011.651542.
- Ferreiro-González M. , G.F. Barbero, J.A. Álvarez, A. Ruiz, M. Palma, J. Ayuso Authentication of virgin olive oil by a novel curve resolution approach combined with visible spectroscopy *Food Chem.*, 220 (2017), pp. 331-336, [10.1016/j.foodchem.2016.10.015](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.015)

- Firdaus M.L., A. Aprian, N. Meileza, M. Hitsmi, R. Elvia, L. Rahmidar, R. Khaydarov, Smartphone coupled with a paper-based colorimetric device for sensitive and portable mercury ion sensing, *Chemosensors* 7 (2) (2019) Article Number: 25.
- Gailius, D. Electronic Nose for Determination of Meat Freshness. U.S. Patent Application 14/376,939, 8 June 2014.
- Giordano, G.F.; Vicentini, M.B.R.; Murer, R.C.; Augusto, F.; Ferrão, M.F.; Helfer, G.A.; da Costa, A.B.; Gobbi, A.L.; Hantao, L.W.; Lima, R.S. Point-of-use electroanalytical platform based on homemade potentiostat and smartphone for multivariate data processing. *Electrochim. Acta* 2016, 219, 170–177. [CrossRef]
- Gopinath S.C., T.H. Tang, Y. Chen, M. Citartan, T. Lakshmi Priya, *Biosens. Bioelectron.* 60 (2014) 332–342.
- Grieshaber D., R. MacKenzie, J. Vörös, E. Reimhult Electrochemical biosensors - sensor principles and architectures *Sensors*, 8 (3) (2008), p. 1400
- Guo, R., Wang, S., Huang, F., Chen, Q., Li, Y., Liao, M., et al. (2019). Rapid detection of *Salmonella Typhimurium* using magnetic nanoparticle immunoseparation, nanocluster signal amplification and smartphone image analysis. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 284, 134–139. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2018.12.110>. December 2018.
- Hamburg M.A. Advancing regulatory science *Science*, 331 (2011), p. 987 Kirin Beer University Report Global Beer Consumption by Country in 2013 http://www.kirinholdings.co.jp/english/news/2014/1224_01.html. [Google Scholar](#)
- Han L., Y.Z. Fan, M. Qing, S.G. Liu, Y.Z. Yang, N.B. Li, H.Q. Luo, Smartphones and test paper-assisted ratiometric fluorescent sensors for semi-quantitative and visual assay of tetracycline based on the target-induced synergistic effect of antenna effect and inner filter effect, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 12 (2020) 47099–47107.
- Han S., L. Yang, Z. Wen, S. Chu, M. Wang, Z. Wang A dual-response ratiometric fluorescent sensor by europium-doped CdTe quantum dots for visual and colorimetric detection of tetracycline *J. Hazard. Mater.*, 398 (2020), Article 122894
- Harwood J.L., P. Yaqoob U. Kingdom, H. Nutrition, U. Kingdom, Nutritional and health aspects of olive oil *Eur. J. Lipid Sci. Technol.*, 104 (2002), pp. 685-697
- Horizon. (2016). Retrieved from The Horizon Prize for a food scanner: <http://ec.europa.eu/research/horizonprize/index.cfm?prize=food-scanner>.
- Hosono, S.; Qi, W.; Sato, S.; Suzuki, Y.; Fujiwara, M.; Hiramatsu, H.; Suzuki, S.; Abeygunawardhana, P.K.W.; Wada, K.; Nishiyama, A.; et al. Proposal of AAA-battery-size one-shot ATR Fourier spectroscopic imager for on-site analysis-Simultaneous measurement of multi-components with high accuracy. In *Proceedings of the SPIE 9314, Optics and Biophotonics in Low-Resource Settings*, San Francisco, CA, USA, 7 February 2015; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2015; Volume 9314.
- Hou J., H. Li, L. Wang, P. Zhang, T. Zhou, H. Ding, L. Ding Rapid microwave-assisted synthesis of molecularly imprinted polymers on carbon quantum dots for fluorescent sensing of tetracycline in milk *Talanta*, 146 (2016), pp. 34-40
- Hu J., X. Yang, Q. Peng, F. Wang, Y. Zhu, X. Hu, B. Zheng, J. Du, D. Xiao A highly sensitive visual sensor for tetracycline in food samples by a double-signal response fluorescent nanohybrid *Food Control*, 108 (2020), pp. 106832-106838
- Hu X, Shi J, Shi Y, Zou X, Arslan M, Zhang W, Huang X, Li Z, Xu Y: Use of a smartphone for visual detection of melamine in milk based on Au@ carbon quantum dots nanocomposites. *Food Chem* 2019, 272:58-65.

- Hu Y., Z. Gao, J. Luo Fluorescence detection of malachite green in fish tissue using red emissive Se, N, Cl-doped carbon dots Food Chemistry, 335 (2021), p. 127677
- Huang J., J. Sun, A.R. Warden, X. Ding, Colorimetric and photographic detection of bacteria in drinking water by using 4-mercaptophenylboronic acid functionalized AuNPs, Food Control 108 (2020) UNSP 106885
- Jiulin H.W. Shi, Dapeng Yuan, Shiguo Hao, Y.Z. Ningning Luo, Z.C. JuanLiu, Weiwei Zhang, Xingdao He, J. Shi, D. Yuan, S. Hao, H. Wang, N. Luo J, Liu, Y. Zhang, W. Zhang, X. He, Z. Chen Stimulated Brillouin scattering in combination with visible absorption spectroscopy for authentication of vegetable oils and detection of olive oil adulteration Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc., 206 (2019), pp. 8043-8050, [10.1016/j.saa.2018.08.031](https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.08.031)
- Jiang H., J. Yang, K. Wan, D. Jiang, C. Jin Miniaturized paper-supported 3D cell-based electrochemical sensor for bacterial lipopolysaccharide detection ACS Sens., 5 (5) (2020), pp. 1325-1335
- Ju Y.J., N.a. Li, S.G. Liu, L. Han, N.a. Xiao, H.Q. Luo, N.B. Li Ratiometric fluorescence method for malachite green detection based on dual-emission BSA-protected gold nanoclusters Sensors and Actuators B: Chemical, 275 (2018), pp. 244-250
- Kamruzzaman M., Y. Makino, S. Oshita Rapid and non-destructive detection of chicken adulteration in minced beef using visible near-infrared hyperspectral imaging and machine learning J. Food Eng., 170 (2016), pp. 8-15, [10.1016/j.jfoodeng.2015.08.023](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.08.023)
- Kanchi S., M.I. Sabela, P.S. Mdluli, Inamuddin, K. Bisetty, Smartphone based bioanalytical and diagnosis applications: A review, Biosens. Bioelectron. 102 (2018) 136–149.
- Kaoutit H. El, P. Estevez, F.C. Garcia, F. Serna, J.M. Garcia, Sub-ppm quantification of Hg(II) in aqueous media using both the naked eye and digital information from pictures of a colorimetric sensory polymer membrane taken with the digital camera of a conventional mobile phone, Anal. Methods 5 (1) (2013) 54–58.
- Kaja Kalinowska, Wojciech Wojnowski, Marek Tobiszewski Smartphones as tools for equitable food quality assessment Trends in Food Science & Technology 111 (2021) 271–279
- Karagiorgos N., N. Nenadis, D. Trypidis, K. Siozios, S. Siskos, S. Nikolaidis, M.Z. Tsimidou An approach for estimating adulteration of virgin olive oil with soybean oil using image analysis, 2017 6th Int. Conf. Mod. Circuits Syst. Technol. MO-CAST (2017), [10.1109/MOCAST.2017.7937672](https://doi.org/10.1109/MOCAST.2017.7937672)
- Karp, D.S.; Gennet, S.; Kilonzo, C.; Partyka, M.; Chaumont, N.; Atwill, E.R.; Kremen, C. Co-managing fresh produce for nature conservation and food safety. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2015, 112, 11126–11131. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
- Khairy G.M., A. Duerkop, Dipsticks and sensor microtiterplate for determination of copper (II) in drinking water using reflectometric RGB readout of digital images, fluorescence or eye-vision, Sens. Actuators B-Chem. 281 (2019)
- Law, J.W.-F.; Ab Mutalib, N.-S.; Chan, K.-G.; Lee, L.-H. Rapid methods for the detection of foodborne bacterial pathogens: Principles, applications, advantages and limitations. Front. Microbiol. 2015, 5, 770.
- Lee D.,W.P. Chou, S.H. Yeh, P.J. Chen, P.H. Chen, Biosens. Bioelectron. 26 (2011) 4349–4354.

- Lee, K., Baek, S., Kim, D., & Seo, J. (2019). A freshness indicator for monitoring chicken-breast spoilage using a Tyvek® sheet and RGB color analysis. *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.11.016>. July 2018.
- Lee, S.; Kim, G.; Moon, J. Performance improvement of the one-dot lateral flow immunoassay for aflatoxin B1 by using a smartphone-based reading system. *Sensors* 2013, 13, 5109–5116. [CrossRef] [PubMed]
- Lee S., V. Oncescu, M. Mancuso, S. Mehta, D. Erickson, *Lab Chip* 14 (2014) 1437–1442
- Levin, S.; Krishnan, S.; Rajkumar, S.; Halery, N.; Balkunde, P. Monitoring of fluoride in water samples using a smartphone. *Sci. Total Environ.* 2016, 551–552, 101–107. [Cross-Ref] [PubMed]
- Li C., X. Zhang, S. Wen, R. Xiang, Y. Han, W. Tang, T. Yue, Z. Li, Interface engineering of zeolite imidazolate framework-8 on two-dimensional Al–metal–organic framework nanoplates enhancing performance for simultaneous capture and sensing tetracyclines, *J. Hazard. Mater.*, 395 (2020), Article 122615
- Li S, Liu H, Deng Y, Lin L, He N: Development of a magnetic nanoparticles microarray for simultaneous and simple detection of foodborne pathogens. *J Biomed Nanotechnol* 2013, 9:1254-1260.
- Liang, P.-S.; Park, T.S.; Yoon, J.-Y. Rapid and reagentless detection of microbial contamination within meat utilizing a smartphone-based biosensor. *Sci. Rep.* 2014, 4, 5953. [CrossRef] [PubMed]
- Lima, M. V., De Queiroz, J. P. A. F., Pascoal, L. A. F., Saraiva, E. P., Soares, K. O., & Evangelista-Rodrigues, A. (2019). Smartphone-based sound level meter application for monitoring thermal comfort of honeybees *Apis mellifera* L. *Biological Rhythm Research*, 1–14. <https://doi.org/10.1080/09291016.2019.1616144>
- Lin B., Y. Yu, Y. Cao, M. Guo, D. Zhu, J. Dai, M. Zheng, Point-of-care testing for streptomycin based on aptamer recognizing and digital image colorimetry by smartphone, *Biosens. Bioelectron.* 100 (2018) 482
- Lin, H. Y., Huang, C. H., Park, J., Pathania, D., Castro, C. M., Fasano, A., et al. (2017). Integrated magneto-chemical sensor for on-site food allergen detection. *ACS Nano*, 11(10), 10062–10069. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b04318>
- Liu B. , B. Xiao, L. Cui, M. Wang Molecularly imprinted electrochemical sensor for the highly selective and sensitive determination of melamine *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.*, 55 (2015), pp. 457-461
- Liu J, Geng Z, Fan Z, Liu J, Chen H: Point-of-care testing based on smartphone: the current state-of-the-art (2017–2018). *Biosens Bioelectron* 2019, 132:17-37.
- Lorenzo J.M. , P.E.S. Munekata Phenolic compounds of green tea: Health benefits and technological application in food *Asian Pac. J. Trop. Bio.*, 6 (2016), pp. 709-719
- Lu, Y., Shi, Z., & Liu, Q. (2019). Smartphone-based biosensors for portable food evaluation. *Current Opinion in Food Science*. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2019.09.003>
- Ludwig, S.K.J.; Zhu, H.; Phillips, S.; Shiledar, A.; Feng, S.; Tseng, D.; van Ginkel, L.A.; Nielen, M.W.F.; Ozcan, A. Cellphone-based detection platform for rbST biomarker analysis in milk extracts using a microsphere fluorescence immunoassay. *Anal. Bioanal. Chem.* 2014, 406, 6857–6866. [CrossRef] [PubMed]
- Luo S. , G. Yan, X. Sun Molecular imprinting based on phosphorescent resonance energy transfer for malachite green detection in fishes and water *New Journal of Chemistry*, 42 (12) (2018), pp. 9510-9516

- Luqing Li ^a ¹Shanshan Jin ^a Yujie Wang ^a Ying Liu ^a Shanshan Shen ^a Menghui Li ^a Zhiyu Ma ^b Jiningming Ning ^a Zhengzhu Zhang ^a “Potential of smartphone-coupled micro NIR spectroscopy for quality control of green tea”, Volume 247, 15 February 2021, 119096 (2021)
- Masawat, P.; Harfield, A.; Namwong, A. An iPhone-based digital image colorimeter for detecting tetracycline in milk. *Food Chem.* 2015, 184, 23–29. [CrossRef] [PubMed]
- Mbuna J., T. Kaneta, T. Imasaka Rapid determination of multidrug resistance-associated protein in cancer cells by capillary electrophoresis immunoassay *J. Chromatogr. A*, 1218 (2011), pp. 3923-3927
- Mignani, A.G.; Mencaglia, A.A.; Baldi, M.; Ciaccheri, L. SpiderSpec: A low-cost compact colorimeter with IoT functionality. In *Proceedings of the SPIE Fifth Asia-Pacific Optical Sensors Conference*, Jeju, Korea, 20 May 2015; Lee, B., Lee, S.B., Rao, Y., Eds.; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2015; Volume 9655.
- Milanez K.D.T.M. , M.J.C. Pontes Classification of edible vegetable oil using digital image and pattern recognition techniques *Microchem. J.*, 113 (2014), pp. 10-16, [10.1016/j.microc.2013.10.011](https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.10.011)
- Morozova S. , M. Alikina, A. Vinogradov, M. Pagliaro Silicon quantum dots: synthesis, encapsulation, and application in light-emitting diodes *Front. Chem.*, 8 (2020), p. 191
- Neill C. O, D. Houtman, S. Aupers Advertising real beer: authenticity claims beyond truth and falsity *Eur. J. Cult. Stud.*, 17 (2014), pp. 585-601
- de Oliveira Krambeck Franco, M., Suarez, W. T., & Santos, V. B. dos (2017). Digital image method smartphone-based for furfural determination in sugarcane spirits. *Food Analytical Methods*, 10(2), 508–515. <https://doi.org/10.1007/s12161-016-0605-4>
- Oliveira M.M., J.P. Cruz-Tirado, J.V. Roque, R.F. Teófilo, D.F. Barbin “Portable near-infrared spectroscopy for rapid authentication of adulterated paprika powder” *J. Food Compos. Anal.*, 87 (2020), Article 103403
- Ohno Y., CIE fundamentals for color measurements, NIP & Digital Fabrication Conference, in: 2000 International Conference on Digital Printing Technologies, 2000, pp. 425–873.
- Ozcan, A.; Coskun, A.; Wong, J. Allergen Testing Platform for Use with Mobile Electronic Devices. *US Pat. App.* 14/053,475, 14 October 2013.
- Ozcan A. Mobile phones democratize and cultivate next-generation imaging, diagnostics and measurement tools. *Lab Chip.* 2014 Sep 7;14(17):3187-94. doi: 10.1039/c4lc00010b. PMID: 24647550; PMCID: PMC4117730.
- Pérez-Bernal, J. L., Villar-Navarro, M., Morales, M. L., Ubeda, C., & Callejón, R. M. (2017). The smartphone as an economical and reliable tool for monitoring the browning process in sparkling wine. *Computers and Electronics in Agriculture*, 141, 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.07.029>
- Phuphanin, A., Sampanporn, L., & Sutapun, B. (2019). Smartphone-based device for non-invasive heart-rate measurement of chicken embryos. *Sensors*, 19(22), 1–14. <https://doi.org/10.3390/s19224843>
- Pingali, P.L., Roger, P.A., 2012. Springer Science & Business Media.
- Rateni G, Dario P, Cavallo F: Smartphone-based food diagnostic technologies: a review. *Sensors (Basel)* 2017, 17:1453.
- Rissanen, A.; Saari, H.; Rainio, K.; Stuns, I.; Viherkanto, K.; Holmlund, C.; Nakki, I.; Ojanen, H. MEMS FPI-based smartphone hyperspectral imager. In *Proceedings of the SPIE*

- Next-Generation Spectroscopic Technologies IX, Baltimore, MD, USA, 17 April 2016; Druy, M.A., Crocombe, R.A., Eds.; SPIE: Bellingham, WA, USA, 2016; Volume 9855.
- Romaniello R. , A. Baiano Discrimination of flavoured olive oil based on hyperspectral imaging J. Food Sci. Technol., 55 (2018), pp. 2429-2435, [10.1007/s13197-018-3160-8](https://doi.org/10.1007/s13197-018-3160-8)
- Rowe A.A., A.J. Bonham, R.J. White, M.P. Zimmer, R.J. Yadgar, T.M. Hobza, K.W. Plaxco-Cheapstat An open-source, do-it-yourself potentiostat for analytical and educational applications PLoS One, 6 (2011), p. e23783
- Ruiz-Samblás C., F. Marini, L. Cuadros-Rodríguez, A. González - Casado Quantification of blending of olive oils and edible vegetable oils by triacylglycerol fingerprint gas chromatography and chemometric tools J. Chromatogr. B Anal. Technol. Biomed. Life Sci., 910 (2012), pp. 71-77, [10.1016/j.jchromb.2012.01.026](https://doi.org/10.1016/j.jchromb.2012.01.026)
- Rukchon, C., Nopwinyuwong, A., Trevanich, S., Jinkarn, T., & Suppakul, P. (2014). Development of a food spoilage indicator for monitoring freshness of skinless chicken breast. *Talanta*, 130, 547–554. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.07.048>
- Ryu J. , Y. Kim, B.H. Hong, S. Cho Fast synthesis of high-performance graphene films by hydrogen-free rapid thermal chemical vapor deposition ACS Nano, 8 (2014), pp. 950-956
- SajalShrivastava Culture-free, highly sensitive, quantitative detection of bacteria from minimally processed samples using fluorescence imaging by smartphone. 2018
- Sayago, R. González-Domínguez, R. Beltrán, Á. Fernández-Recamales Combination of complementary data mining methods for geographical characterization of extra virgin olive oils based on mineral composition Food Chem., 261 (2018), pp. 42-50, [10.1016/j.foodchem.2018.04.019](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.019)
- Scheeline, A. (2016, December 1). Cell phone spectrometry: Science in your pocket? TRAC Trends in Analytical Chemistry, 85, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.02.023>
- Shen X. , F. Ju, G. Li, L.J.S. Ma Smartphone-based electrochemical potentiostat detection system using PEDOT: PSS/chitosan/graphene modified screen-printed electrodes for dopamine detection Sensors, 20 (10) (2020), p. 2781
- Sicard C., C. Glen, B. Aubie, D. Wallace, S. Jahanshahi-Anbuhi, K. Pennings, G. T. Daigger, R. Pelton, J.D. Brennan, C.D.M. Filipe, Tools for water quality monitoring and mapping using paper-based sensors and cell phones Water Res. 70 (2015) 360-369
- Silva, A. F. S., & Rocha, F. R. P. (2020). A novel approach to detect milk adulteration based on the determination of protein content by smartphone-based digital image colorimetry. *Food Control*, 115, 107299. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2020.107299>. March.
- Sundvor, S.; Portela, S.; Ward, J.; Walton, J. System and Method for Detection of Target Substances. U.S. Patent Application 15/265,171, 26 September 2016.
- Wang P, Liu Q, Wu C, Hsia KJ: Bioinspired smell and taste sensors. Springer; 2015.
- Wang S, Zheng L, Cai G, Liu N, Liao M, Li Y, Zhang X, Lin J: A microfluidic biosensor for online and sensitive detection of Salmonella typhimurium using fluorescence labeling and smartphone video processing. *Biosens Bioelectron* 2019, 140:111333.
- Wang, Y.; Li, Y.; Bao, X.; Han, J.; Xia, J.; Tian, X.; Ni, L. A smartphone-based colorimetric reader coupled with a remote server for rapid on-site catechols analysis. *Talanta* 2016, 160, 194–204. [CrossRef] [PubMed]

- Wang, Z., Hou, Y., Jiang, K., Dou, W., Zhang, C., Huang, Z., et al. (2019). Hand gesture recognition based on active ultrasonic sensing of smartphone: A survey. *IEEE Access*, 7, 111897–111922. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2933987>
- Watson, W.; Correa, I. Analyzing and Correlating Spectra, Identifying Samples and Their Ingredients, and Displaying Related Personalized Information. US Patent 9,212,996, 5 August 2015.
- Wei Q., R. Nagi, K. Sadeghi, S. , E. Yan, S.J. Ki, et al., *ACS Nano*. 8 (2014) 1121–1129
- Weiran Song et al., 2020 Quantification of extra virgin olive oil adulteration using smartphone videos Author links open overlay panel *Talanta* Volume 216, 15 August 2020, 120920
- Wenhui Chen, Yao Yao, Tianyu Chen, Wei Shena, Sheng Tanga, Hian, Kee Lee, Application of smartphone-based spectroscopy to biosample analysis: A review *Biosensors and Bioelectronics*, Volume 172, 15 January 2021, 112788
- Wong J.X.H. , F.S.F. Liu, H.-Z. Yu Mobile app-based quantitative scanometric analysis *Anal. Chem.*, 86 (2014), pp. 11966-11971
- Wu, D., & Sun, D. W. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control - a review. *Trends in Food Science & Technology*, 29(1), 5–20. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.08.004>
- Wu, M.Y.-C.; Hsu, M.-Y.; Chen, S.-J.; Hwang, D.-K.; Yen, T.-H.; Cheng, C.-M. Point-of-Care Detection Devices for Food Safety Monitoring: Proactive Disease Prevention. *Trends Biotechnol.* 2017, 35, 288–300. [CrossRef] [PubMed]
- Xiang Y., J. Huang, Y. Sun, N. Gan, Z. Zhang Effects on the storage quality of roasted green tea blended with sucrose *J. Tea Bus.*, 41 (2019), pp. 73-79
- Xiaoyue Yue , Yan Li , Sheng Xu , Jinguang Li , Min Li , Liying Jiang , Mingsha Jie, Yanhong Bai, A portable smartphone-assisted ratiometric fluorescence sensor for intelligent and visual detection of malachite green *Food Chemistry* 371 (2022) 131164
- Ye, Y., Wu, T., Jiang, X., Cao, J., Ling, X., Mei, Q., et al. (2020). Portable smartphone-based QDs for the visual onsite monitoring of fluoroquinolone antibiotics in actual food and environmental samples. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 12(12), 14552–14562. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b23167>
- You, M., Liu, J., Zhang, J., Xv, M., & He, D. (2020). A novel chicken meat quality evaluation method based on color card localization and color correction. *IEEE Access*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/access.2020.2989439>
- Yu, L.; Shi, Z.; Fang, C.; Zhang, Y.; Liu, Y.; Li, C. Disposable lateral flow-through strip for smartphone-camera to quantitatively detect alkaline phosphatase activity in milk. *Biosens. Bioelectron.* 2015, 69, 307–315. [CrossRef] [PubMed]
- Yu, X.; Lu, Q.; Gao, H.; Ding, H. Development of a handheld spectrometer based on a linear variable filter and a complementary metal-oxide-semiconductor detector for measuring the internal quality of fruit. *J. Near Infrared Spectrosc.* 2016, 24, 69–76. [Cross-Ref] *Sensors* 2017, 17, 1453 22 of 22
- Zeinhom, M. M. A., Wang, Y., Sheng, L., Du, D., Li, L., Zhu, M. J., et al. (2018). Smart phone based immunosensor coupled with nanoflower signal amplification for rapid detection of *Salmonella Enteritidis* in milk, cheese and water. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 261, 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.11.093>
- Zeinhom MMA, Wang Y, Song Y, Zhu MJ, Lin Y, Du D: A portable smart-phone device for rapid and sensitive detection of *E. coli* O157:H7 in yoghurt and egg. *Biosens Bioelectron* 2018, 99:479-485

- Zhang L., Q.-Q. Cao, D. Granato, Y.-Q. Xu, C.-T. Ho Association between chemistry and taste of tea: A review Trends Food Sci. Tech. (2020)
- Zhang L., W. Yang, Y. Yang, H. Liu, Z. Gu Smartphone-based point-of-care testing of salivary α -amylase for personal psychological measurement Analyst, 140 (21) (2015), pp. 7399-7406
- Zheng, C., Sun, D. W., & Zheng, L. (2006, December 1). Recent developments and applications of image features for food quality evaluation and inspection - a review. Trends in Food Science & Technology, 17, 642–655. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2006.06.005>
- Zheng L, Cai G, Wang S, Liao M, Li Y, Lin J: Bioelectronics: a microfluidic colorimetric biosensor for rapid detection of Escherichia coli O157: H7 using gold nanoparticle aggregation and smart phone imaging. Biosens Bioelectron 2019, 124:143-149.
- Zheng, X. et al. Accumulation and biotransformation of BDE-47 by zebrafish larvae and teratogenicity and expression of genes along the hypothalamus-pituitary-thyroid axis. Environ Sci Technol 46, 12943–12951 (2012).
- Zhu, H., Sikora, U., & Ozcan, A. (2012). Quantum dot enabled detection of Escherichia coli using a cell-phone. Analyst, 137(11), 2541–2544. <https://doi.org/10.1039/c2an35071h>