

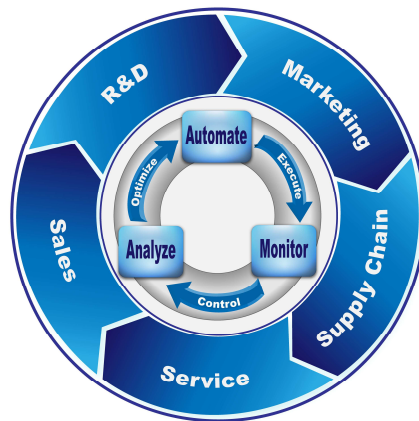
**Συσκευή Ανίχνευσης Εκρηκτικής Ύλης σε Ταχυδρομικά Αντικείμενα  
στα Υπαίθρια Γραμματοκιβώτια για την Προστασία των Πολιτών**

**A Device for Explosive Materials Detection on Postal Objects in Outdoor  
Mailboxes for Citizen Protection**

**ΜΑΡΙΑ ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΥ**

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών:

**Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών**



**ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Πειραιάς, Απρίλιος 2018**



**Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών του Μεταπτυχιακού Προγράμματος «Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών» του Τμήματος Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.**

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη .....ΣΠΥΡΟΠΟΥΛΟΥ ΜΑΡΙΑ....., του .....ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ....., με αριθμό μητρώου .....54..... φοιτήτρια του Τμήματος **Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής** του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Πτυχιακής Εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

«Η Πτυχιακή Εργασία (Π.Ε.) αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο του συγγραφέα, όσο και του Ιδρύματος και θα πρέπει να έχει μοναδικό χαρακτήρα και πρωτότυπο περιεχόμενο.

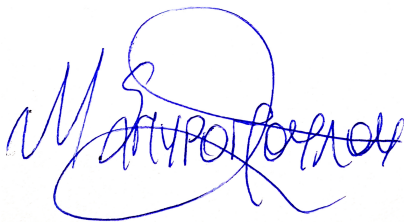
Απαγορεύεται αυστηρά οποιοδήποτε κομμάτι κειμένου της να εμφανίζεται αυτούσιο ή μεταφρασμένο από κάποια άλλη δημοσιευμένη πηγή. Κάθε τέτοια πράξη αποτελεί προϊόν λογοκλοπής και εγείρει θέμα Ηθικής Τάξης για τα πνευματικά δικαιώματα του άλλου συγγραφέα. Αποκλειστικός υπεύθυνος είναι ο συγγραφέας της Π.Ε., ο οποίος φέρει και την ευθύνη των συνεπειών, ποινικών και άλλων, αυτής της πράξης.

Πέραν των όποιων ποινικών ευθυνών του συγγραφέα σε περίπτωση που το Ίδρυμα του έχει απονείμει Πτυχίο, αυτό ανακαλείται με απόφαση της Συνέλευσης του Τμήματος. Η Συνέλευση του Τμήματος με νέα απόφαση της, μετά από αίτηση του ενδιαφερόμενου, του αναθέτει εκ νέου την εκπόνηση της Π.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Π.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού δμήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στο άρθρο 18, παρ. 5 του ισχύοντος Εσωτερικού Κανονισμού.»

Η Δηλούσα

Ημερομηνία

18/04/2018





# ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

«Στην Μελίνα και στο Γιώργο, στα παιδιά μου,  
για την υποστήριξη και την υπομονή τους.  
Δεν θα μπορούσα να αφιερώσω  
πουθενά αλλού την παρούσα διατριβή!»

## Περίληψη

Η αύξηση των τρομοκρατικών επιθέσεων σε παγκόσμιο επίπεδο έχει αλλάξει δραματικά τον τρόπο ζωής του ανθρώπου. Καινούριες μορφές τρομοκρατίας έχουν εμφανιστεί, αλλάζοντας την καθημερινότητα απλών πολιτών, οι οποίοι πολλές φορές αποτελούν τις «παράπλευρες απώλειες» αυτών των πράξεων. Ιδιαίτερα, η αποστολή «τρομο-δεμάτων» σε πρόσωπα-στόχους έχει αναδείξει το κενό ασφαλείας που υπάρχει στη διαδικασία παροχής ταχυδρομικών υπηρεσιών και πιο συγκεκριμένα τον κίνδυνο που διατρέχουν τόσο στο σύνολό τους οι υπάλληλοι του φορέα παροχής καθολικής υπηρεσίας όσο και απλοί, διερχόμενοι πολίτες, δεδομένου ότι η συμπεριφορά ενός εκρηκτικού μηχανισμού είναι απρόβλεπτη ακόμα και κατά την απλή μετακίνηση ή τοποθέτησή του. Επιπλέον, η αδυναμία ταυτοποίησης του αποστολέα και ιχνηλάτησης των απλών ταχυδρομικών αντικειμένων που ρίπτονται σε υπαίθρια γραμματοκιβώτια αποτελούν ένα ακόμα όπλο στα χέρια των τρομοκρατών.

Στην παρούσα διατριβή θα παρουσιαστεί η μελέτη σχεδιασμού ενός συστήματος ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης που περιέχεται σε ταχυδρομικό αντικείμενο που ρίπτεται σε υπαίθριο γραμματοκιβώτιο. Επιπλέον, περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας της διάταξης και της έγκαιρης ειδοποίησης των αρμόδιων αρχών και υπηρεσιών για την άμεση επέμβασή τους, ώστε να αποφεύγεται η επέκταση των ζημιών. Η μόνιμη εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος στα υπαίθρια γραμματοκιβώτια θα μπορέσει να εστιάσει πρωτίστως στην προστασία της ανθρώπινης ζωής και δευτερευόντως στην έγκαιρη και άμεση κινητοποίηση των αρμόδιων αρχών και υπηρεσιών, σε περίπτωση ανίχνευσης ύποπτου ταχυδρομικού αντικειμένου, γεγονός που θα συμβεί για πρώτη φορά στη Ελλάδα. Τα δύο αυτά σημεία αποτελούν και τον σκοπό αυτής της διατριβής, σε μια προσπάθεια η χρήση τεχνολογικά εξελιγμένων εφαρμογών να συμβάλει στην ασφάλεια και την αποφυγή ανθρώπινων απωλειών και υλικών ζημιών. Στο κυρίως μέρος της διατριβής αναλύονται τα κριτήρια σχεδιασμού του προτεινόμενου συστήματος, οι διατάξεις αισθητηρίων, ο μικροεπεξεργαστής, οι διατάξεις τροφοδοσίας και αυτονομίας και η διάταξη επικοινωνίας. Ο τρόπος λειτουργίας και το περιβάλλον επικοινωνίας με τις αρμόδιες αρχές και υπηρεσίες, παρουσιάζονται λεπτομερώς μέσα από την περιγραφή του

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR

σεναρίου λειτουργίας. Επιπλέον, η διατριβή θα περιλαμβάνει οικονομοτεχνικά στοιχεία που αφορούν στο κόστος λειτουργίας και τοποθέτησης του προτεινόμενου συστήματος στα υπαίθρια γραμματοκιβώτια. Η μελέτη ολοκληρώνεται με την καταγραφή των συμπερασμάτων που αναμένεται να έχει η χρήση του συγκεκριμένου συστήματος.

*Λέξεις κλειδιά: εκρηκτική ύλη, φασματογραφία κινητικότητας ιόντων, υπαίθρια γραμματοκιβώτια, συσκευή ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης*

## Abstract

The increase in terrorist attacks at a global level has dramatically changed the way people live. New forms of terrorism have emerged, changing the everyday lives of ordinary citizens, who are often the "collateral losses" of these acts.

In particular, the sending of "terror-packs" to target persons has highlighted the security gap in the provision of postal services and, in particular, the risk faced by both the universal service provider employees and the ordinary citizens, since the behavior of an explosive device is unpredictable even when it is simply moved or placed somewhere. Moreover, the inability of the postal provider to identify the sender and track simple postal items (PRIORITY B letter mail) that are dropped in outdoor mailboxes is another weapon in the hands of terrorists. This dissertation will present the design study of an explosive detection system contained in a postal item dropped in an open mailbox. In addition, it describes the way in which the provision and timely notification of the competent authorities and services are provided for their immediate intervention in order to avoid the extension of the damage. The permanent installation of such a system in outdoor mailboxes can focus primarily on the protection of human life and, secondarily, on the timely and immediate mobilization of competent authorities and services in case of detection of suspicious postal items, something that will be a pioneering initiative for Greece. These two points are also the purpose of this dissertation, in an attempt to use technologically advanced applications to contribute to safety and avoid human losses and material damage. In the main part of the dissertation the design criteria of the proposed system, sensor devices, the microprocessor, the supply and autonomy devices and the communication device are analyzed. The way of operation and the communication environment with the competent authorities and services are presented in detail through the description of the operating scenario. In addition, the dissertation will include financial and technical data concerning the operation and installation costs of the proposed system in outdoor mailboxes. The study is completed by recording the conclusions that the system is expected to use.



**Key Words:** *explosives, ion mobility spectrometry, outdoor mailboxes, sensing detection device*



## Ευχαριστίες

Για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής χρωστάω ένα τεράστιο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχάλη Παπουτσιδάκη. Από την πρώτη στιγμή πίστεψε στο θέμα της διατριβής μου και ασχολήθηκε ενεργά και ουσιαστικά με την ανάπτυξή του, παρέχοντάς μου όλες τις απαραίτητες, κατευθυντήριες πληροφορίες.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την φίλη και συνάδελφο Ειρήνη Γαβαλά, η οποία με βοήθησε πολύ με τις πληροφορίες που μου έδωσε σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας των παρόχων ταχυδρομικών υπηρεσιών.

Τέλος, χρωστάω ένα τεράστιο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και κυρίως στα παιδιά μου, για την αμέριστη υποστήριξη και συμπαράσταση που μου έδειξαν και την κατανόηση που είχαν τόσο κατά το χρονικό διάστημα των υποχρεωτικών παρακολουθήσεων στο πλαίσιο του κύκλου μεταπτυχιακών σπουδών μου όσο και κατά το χρονικό διάστημα της συγγραφής της παρούσας διατριβής.

Μελίνα και Γιώργο, σας οφείλω αμέτρητες ώρες παιχνιδιού.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>Περίληψη</b> .....	<b>4</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>6</b>
<b>Ευχαριστίες</b> .....	<b>8</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ</b> .....	<b>10</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ/ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ</b> .....	<b>10</b>
<b>1.Εισαγωγή</b> .....	<b>12</b>
1.1 Ιστορική Αναδρομή.....	12
1.2 Εργαστηριακές Εξετάσεις .....	13
1.3 Τεχνικές Ανίχνευσης Αυτοσχέδιων Εκρηκτικών Μηχανισμών .....	14
1.3.1 Συστήματα Μαζικής Ανίχνευσης.....	18
1.3.2 Μέθοδοι Ανίχνευσης Ιχνών Εκρηκτικής Ύλης.....	19
1.4 Εφαρμογές Φασματομετρίας Κινητικότητας Ιόντων.....	21
1.4.1 Αρχή Λειτουργίας του Φασματογράφου Κινητικότητας Ιόντων.....	23
1.4.2 Είδη Φασματογράφων Κινητικότητας Ιόντων .....	33
<b>2. Διάταξη Ανίχνευσης Εκρηκτικής Ύλης</b> .....	<b>52</b>
2.1.Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες Εκρηκτικών Υλών.....	52
2.2 Δειγματοληψία και προ-συγκέντρωση (pre-concentration).....	54
2.3 Γενική Περιγραφή Προτεινόμενης Διάταξης.....	55
2.4 Διάταξη IMS αισθητήρα .....	57
2.4.1 Διαδικασία Βαθμονόμησης της IMS συσκευής.....	58
2.5 Μικροεπεξεργαστής (microprocessor).....	61
2.5.1 Λίγα λόγια για τον μικροεπεξεργαστή .....	61
2.5.2 Ο μικροεπεξεργαστής Raspberry PI 3 model B+.....	66
2.6 Απαιτήσεις τροφοδοσίας της προτεινόμενης διάταξης.....	81
2.7 Σύστημα Τηλεπικοινωνιακής Επικοινωνίας της διάταξης.....	81
2.7.1 Το Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing) .....	82
2.7.2 Σενάριο Λειτουργίας .....	84
2.7.3 Το Σύστημα Προσδιορισμού Γεωγραφικής Θέσης (Global Positioning System, GPS) .....	85
2.8 Κόστος Προτεινόμενης Διάταξης .....	86
<b>3. Αναμενόμενα Αποτελέσματα - Βελτιώσεις</b> .....	<b>88</b>
3.1 Αναμενόμενα αποτελέσματα χρήσης της διάταξης .....	88
3.2 Μελλοντικές Βελτιώσεις.....	90
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>93</b>

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

**Παράρτημα Α: Paper.....96**  
**Παράρτημα Β: Πρόταση Μεταπτυχιακής Διατριβής.....105**

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

**Πίνακας 1:** Χαρακτηριστικά Λειτουργίας των έξι πιο κοινών τύπων IMS.....50  
**Πίνακας 2:** Πιέσεις ατμών και βάρη μορίων εκρηκτικών υλών.....53  
**Πίνακας 3:** Ενδεικτικές τιμές για τα τρία τμήματα της προτεινόμενης διάταξης.....88

**ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ/ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ**

**Σχήμα 1:** Ταξινόμηση εκρηκτικών υλών με βάση τη συγκέντρωση των ατμών.....17  
**Σχήμα 2:** Μέθοδοι Μαζικής Ανίχνευσης Εκρηκτικών Μηχανισμών.....19  
**Σχήμα 3 :** Μέθοδοι Ανίχνευσης Ιχνών Εκρηκτικών Υλών.....21  
**Σχήμα 4:** Περιοχές λειτουργίας Φασματογράφου Κινητικότητας Ιόντων.....24  
**Σχήμα 5:** Απεικόνιση RIP - μονομερές και διμερές σε έναν IMS.....28  
**Σχήμα 6:** Σχηματική απεικόνιση συμβατικού drift time IMS (DTIMS).....32  
**Σχήμα 7:** Αρχή λειτουργίας μιας TWIMS συσκευής.....35  
**Σχήμα 8:** Επίπεδη επισκόπηση FAIMS συσκευής.....37  
**Σχήμα 9:** Σχηματική απεικόνιση συσκευής και λειτουργίας του TIMS.....40  
**Σχήμα 10:** Λειτουργία του διαχωρισμού ιόντων στον IMS Ανοιχτού Βρόχου.....42  
**Σχήμα 11:** Διάταξη ενός επίπεδου Ανιχνευτή Διαφορικής Κινητικότητας.....44  
**Σχήμα 12:** Σχηματική απεικόνιση του TMIMS φασματογράφου και γραφική απεικόνιση διαφορετικών τροχιών ιόντων μέσα σε αυτόν.....46  
**Σχήμα 13:** Δομή του μικροεπεξεργαστή.....62  
**Σχήμα 14:** Η αριθμητική και λογική μονάδα του μικροεπεξεργαστή.....63

**Εικόνα 1:** Ο μικροεπεξεργαστής Raspberry PI 3 model B+.....67  
**Εικόνα 2:** Τα εξαρτήματα του μικροεπεξεργαστή Raspberry PI 3 model B+.....69  
**Εικόνα 3:** PoE HAT για Raspberry PI 3 model B+.....70  
**Εικόνα 4:** Το microUSB τροφοδοτικό για τον επεξεργαστή Raspberry PI.....70  
**Εικόνα 5:** Η μεταλλική θωράκιση με το σήμα της εταιρείας, κάτω από την οποία βρίσκεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας.....77  
**Εικόνα 6:** Η PCB κεραία, αδειοδοτημένη από την εταιρεία ProantAB.....79  
**Εικόνα 7:** Το ολοκληρωμένο LAN7515 της εταιρείας Microchip, υπεύθυνο για την GigabitEthernet επικοινωνία του μικροεπεξεργαστή.....81

**Διάγραμμα 1:** Σχηματικό διάγραμμα περιοχών εκτροπής μιας OMS συσκευής.....48  
**Διάγραμμα 2:** Γενικό διάγραμμα προτεινόμενης διάταξης.....56  
**Διάγραμμα 3:** Λειτουργικό Διάγραμμα Μονάδας ελέγχου μικροεπεξεργαστή.....64  
**Διάγραμμα 4:** Διάγραμμα GPIO του Raspberry PI 3 model B+.....73  
**Διάγραμμα 5:** Διάγραμμα GPIO του Raspberry PI 3 model B+.....74



**Διάγραμμα 6:** Το λειτουργικό διάγραμμα βαθμίδων του ολοκληρωμένου CYW43455 ασύρματης επικοινωνίας.....77

## 1.Εισαγωγή

### 1.1 Ιστορική Αναδρομή

Τα τελευταία χρόνια, η ανθρωπότητα έχει γίνει μάρτυρας πολλών, αιματηρών και θανατηφόρων τρομοκρατικών επιθέσεων, όπου τις περισσότερες φορές θύματα είναι αθώοι, ανυποψίαστοι πολίτες. Πολυσύχναστα μέρη όπου λαμβάνουν χώρα εορταστικά και επετειακά δρώμενα, σιδηροδρομικοί σταθμοί και αεροδρόμια αποτελούν τις πρώτες επιλογές των τρομοκρατών, με σκοπό να χτυπήσουν και να προκαλέσουν όσο το δυνατό αριθμητικά περισσότερες απώλειες. Τελευταία, μία άλλη μέθοδος τρομοκρατίας στην οποία δείχνουν ιδιαίτερη προτίμηση οι τρομοκράτες είναι η αποστολή «τρόμο-δεμάτων». Πρόκειται για αποστολή ταχυδρομικών αντικειμένων που περιέχουν εκρηκτικό μηχανισμό ή και εκρηκτική ύλη. Σε αυτή την περίπτωση, στόχος μπορεί να είναι μόνο το πρόσωπο – παραλήπτης του φακέλου. Ωστόσο, κανένας δεν μπορεί να αποκλείσει την πιθανότητα να προκληθεί σοβαρός τραυματισμός ή και μόλυνση όσων εμπλέκονται στη διαδικασία περισυλλογής και διανομής των ταχυδρομικών αντικειμένων. Οι τρομοκράτες, εκμεταλλευόμενοι την ανωνυμία που τους προσφέρει η διαδικασία της αποστολής απλών ταχυδρομικών αντικειμένων, ρίπτουν τα «τρόμο-δέματα» στα υπαίθρια γραμματοκιβώτια, από όπου στη συνέχεια συλλέγονται σύμφωνα με τις διαδικασίες περισυλλογής του παρόχου καθολικής υπηρεσίας και προωθούνται προς τον τελικό προορισμό τους.

Στο παρελθόν οι ενέργειες αυτές των τρομοκρατικών οργανώσεων έχουν επαναληφθεί πολλές φορές, άλλοτε με επιτυχία και άλλοτε όχι. Το 1989 πακέτα με εκρηκτικό μηχανισμό έλαβαν οι δημοσιογράφοι Δημήτρης Ρίζος της εφημερίδας «Ελεύθερος Τύπος» και Κυριάκος Διακογιάννης της εφημερίδας «Αυριανή», τον Ιούνιο του 2010 ο «τρόμο-φάκελος» που στάλθηκε στο Υπουργείο Δημοσίας Τάξης προκάλεσε το θάνατο ενός αστυνομικού, ενώ τον Νοέμβριο του ίδιου έτους εντοπίστηκαν φάκελοι με παραλήπτες πολιτικά πρόσωπα της Ευρώπης (κ. Αγκ. Μέρκελ, κ.κ. Σ. Μπερλουσκόνι και Θ. Πάγκαλο) και άλλες δεκατέσσερις πρεσβείες. Ακολούθως, τον Φεβρουάριο του 2011, αντίστοιχο περιστατικό σημειώθηκε στο γραφείο του τότε υπουργού Δικαιοσύνης Χάρη Καστανίδη, τον Ιούλιο του 2013 στο

Πρωτοδικείο Αθηνών, στην πρώην Σχολή Ευελπίδων και στα ΕΛΤΑ Κρυονερίου, όπου αναφλέγει φάκελος με παραλήπτη τον πρώην Διευθυντή της Αντιτρομοκρατικής Υπηρεσίας. Ένα μήνα αργότερα της ίδιας χρονιάς φτάνει στο γραμματοκιβώτιο του αρμόδιου για θέματα τρομοκρατίας εισαγγελέα αντίστοιχος «τρόμο-φάκελος». Τον Ιανουάριο του 2015 φάκελος με βόμβα έφτασε στα γραφεία του Χρηματιστηρίου Αθηνών και τον Ιούνιο του 2016 στην οικία Εισαγγελέα [1]. Πρόσφατα, τον Μάρτιο του 2017, εντοπίστηκε φάκελος με εκρηκτικό μηχανισμό στο Υπουργείο Οικονομικών της Γερμανίας, με παραλήπτη τον τότε Υπουργό Οικονομικών της Γερμανίας κ. Σόιμπλε καθώς και στα γραφεία του Διεθνούς Νομισματικού Ταμείου (ΔΝΤ) στο Παρίσι με παραλήπτη τον κ. Π. Τόμσεν [2]. Τέλος, φάκελο με περιεχόμενο εκρηκτικό μηχανισμό έλαβε ο τέως Πρωθυπουργό της Ελλάδας κ. Παπαδήμο, που είχε ως αποτέλεσμα τον τραυματισμό του ίδιου και ενός συνοδού του μέσα στο όχημά τους.

## 1.2 Εργαστηριακές Εξετάσεις

Τα αρμόδια τμήματα της Ελληνικής Αστυνομίας διεξάγουν έρευνα και ελέγχουν διεξοδικά οποιοδήποτε ίχνος εκρηκτικής ύλης κατάσχεται ή βρίσκεται σε υπολείμματα εκρηκτικού μηχανισμού, προκειμένου να ταυτοποιηθεί η φύση της, να προσδιορισθεί το είδος και η χημική σύστασή της, να χαρακτηριστεί (αν δηλαδή πρόκειται για εκρηκτική ύλη στρατιωτικής ή μη κατηγορίας, εξειδικευμένη, χαμηλής ή υψηλής ισχύος) και να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της επικινδυνότητάς της.

Ο τομέας της αναλυτικής Χημείας διαθέτει μια μεγάλη γκάμα εξειδικευμένων και αξιόπιστων μεθόδων και συσκευών που βοηθούν στον προσδιορισμό των κύριων συστατικών των εκρηκτικών υλών, ακόμα και στις περιπτώσεις που η εκρηκτική ύλη αποτελεί μείγμα διαφόρων διαφορετικών συστατικών και το δείγμα είναι σε πολύ περιορισμένες ποσότητες. Επίσης, ελέγχονται και τα κατάλοιπα των προϊόντων της έκρηξης, τα οποία παραμένουν αναλλοίωτα μετά την έκρηξη και βρίσκονται προσκολλημένα σε θραύσματα του εκρηκτικού μηχανισμού ή των υλικών γύρω από το σημείο της έκρηξης.

Σε γενικές γραμμές και στην περίπτωση ελέγχου δείγματος εκρηκτικής ύλης που δεν έχει εκραγεί, η συνήθης αναλυτική διαδικασία περιλαμβάνει ένα αρχικό στάδιο

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR

διαχωρισμού των συστατικών του σε οργανικά και ανόργανα προϊόντα. Ακολουθώντας, πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των συστατικών του μείγματος και η ταυτοποίηση αυτών σε κατηγορίες. Σε αυτό το στάδιο, οι εξειδικευμένες μέθοδοι και οι ειδικές συσκευές που χρησιμοποιούνται βασίζονται στο γεγονός ότι κάθε κατηγορία συστατικού μιας εκρηκτικής ύλης παρουσιάζει διαφορετικό βαθμό διαλυτότητας στο νερό και σε άλλους οργανικούς διαλύτες.

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται από τα αρμόδια αστυνομικά τμήματα και στην περίπτωση που το προς έλεγχο δείγμα προέρχεται από υπολείμματα εκρηκτικής ύλης που βρίσκονται προσκολλημένα σε θραύσματα των υλικών του εκρηκτικού μηχανισμού ή των υλικών που βρίσκονταν στο σημείο της έκρηξης. Ωστόσο, προηγείται η διαδικασία της έκπλυσης του δείγματος με οργανικούς διαλύτες και νερό, ώστε να επιτευχθεί η παραλαβή των οργανικών και ανόργανων συστατικών. Στη συνέχεια, ακολουθεί παρεμβαλλόμενη μέθοδος καθαρισμού των δειγμάτων από ξένες προσμίξεις. Πλέον, το δείγμα μπορεί να εισαχθεί για διαχωρισμό και ταυτοποίηση των συστατικών του, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση.

Για την επίτευξη όλων των παραπάνω χρησιμοποιούνται κλασσικές συσκευές αέριας και υγρής χρωματογραφίας με φασματομετρία μάζας, καθώς και άλλοι, εξειδικευμένοι ανιχνευτές πολύ μεγάλης ευαισθησίας. Από τα αποτελέσματα αυτών των ελέγχων, υπάρχει η δυνατότητα να μελετηθεί ακριβώς η ποιοτική και ποσοτική σύσταση της εκρηκτικής ύλης, ακόμα και όταν η διαθέσιμη ποσότητα του δείγματος είναι πολύ μικρή[3].

### 1.3 Τεχνικές Ανίχνευσης Αυτοσχέδιων Εκρηκτικών Μηχανισμών

Σήμερα οι νέες μορφές τρομοκρατικών επιθέσεων έχουν αποδειχθεί πιο επικίνδυνες και πιο εξελιγμένες, αφού χρησιμοποιούνται ακόμα και μέθοδοι απομακρυσμένου ελέγχου του αυτοσχέδιου εκρηκτικού μηχανισμού, που επιτυγχάνεται εύκολα μέσω μίας κοινής συσκευής κινητού τηλεφώνου. Επομένως, γίνεται εύκολα αντιληπτό πόσο σημαντική και σπουδαία είναι η ανάπτυξη και η χρήση αξιόπιστων και αποτελεσματικών συστημάτων για την ανίχνευση εκρηκτικών μηχανισμών.

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR

Η έγκαιρη ανίχνευση ενός εκρηκτικού μηχανισμού θα οδηγήσει στην άμεση απενεργοποίηση και στην ασφαλή εξουδετέρωσή του από εξειδικευμένο και ειδικά προς τούτο εκπαιδευμένο προσωπικό. Με τον τρόπο αυτό, τα αρμόδια τμήματα θα έχουν στη διάθεσή τους όλα εκείνα τα στοιχεία που χρειάζονται, ώστε να προχωρήσουν στον έλεγχο και στην ανάλυση των εκρηκτικών υλών, ενώ υπάρχει και η δυνατότητα έγκαιρης και αποτελεσματικής παρέμβασης των αρμόδιων υπηρεσιών προς αποφυγή σωματικών και υλικών ζημιών. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται μέθοδοι βασισμένες σε ειδικά αισθητήρια.

Τι είναι όμως η αυτοσχέδια βόμβα; Από τι αποτελείται; Πώς κατασκευάζεται; Ένας αυτοσχέδιος εκρηκτικός μηχανισμός είναι ουσιαστικά ένα αυτοσχέδιο εκρηκτικό φορτίο. Το κυρίως τμήμα του αποτελεί ο πυροκροτητής, ο οποίος μπορεί να είναι είτε επαγγελματικής είτε μη-τυποποιημένης κατασκευής (home-made). Η ενεργοποίηση του πυροκροτητή απαιτεί την παρουσία εκρηκτικής ύλης. Μία αυτοσχέδια εκρηκτική ύλη μπορεί να είναι οποιοδήποτε χημική ένωση ή μείγμα χημικών ενώσεων, που υπό ορισμένες συνθήκες μπορεί να προκαλέσει αντίδραση που οδηγεί σε έκρηξη. Τα κύρια συστατικά μιας αυτοσχέδιας εκρηκτικής ύλης είναι τα ανόργανα άλατα που περιέχουν ενωμένα μόρια οξυγόνου, όπως το νιτρικό άλας, χλωρικό άλας, υπερχλωρικό οξύ ή οργανικές χημικές ενώσεις της νιτρικής ομάδας ή υπεροξειδία [4].

Σήμερα, συναντώνται περισσότερα από εκατό είδη στρατιωτικών και εμπορικών εκρηκτικών υλών. Για την ανίχνευσή τους χρησιμοποιούνται κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά τους, τα οποία είναι:

- Γεωμετρία - η μεταλλική υπόσταση του πυροκροτητή μπορεί να ανιχνευθεί με την ανάλυση εικόνας ή και σχήματος,
- Πυκνότητα υλικού - η πυκνότητα των εκρηκτικών υλικών είναι πιο μεγάλη σε σχέση με τα περισσότερα οργανικά υλικά,
- Στοιχειακή σύνθεση – αφορά στις μεθόδους ανάλυσης των εκπεμπόμενων ατμών,
- Εκπομπή ατμών - π.χ. συγκεκριμένα χημικά στοιχεία και οι ενώσεις αυτών, όπως το άζωτο, μπορούν να ανιχνευθούν σε ένα δείγμα ατμού.



Οι μέθοδοι ανίχνευσης αυτοσχέδιων εκρηκτικών μηχανισμών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: την Μαζική Ανίχνευση Εκρηκτικών και την Ανίχνευση Ιχνών Εκρηκτικών.

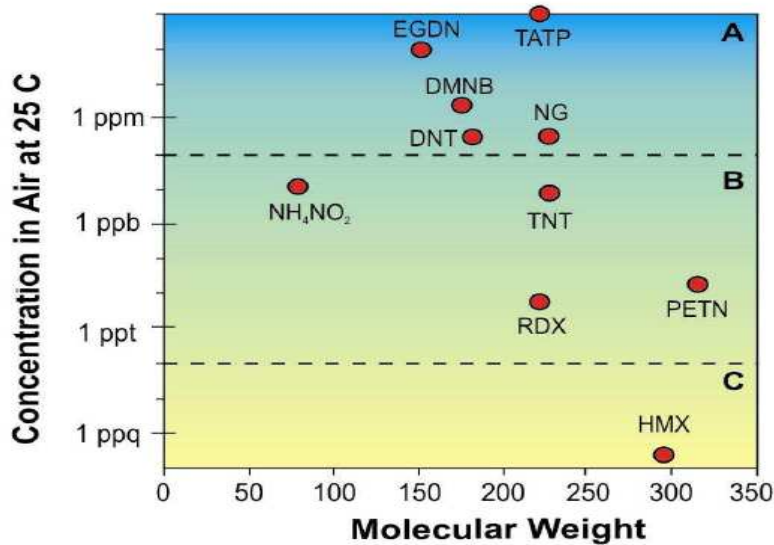
Στην περίπτωση της Μαζικής Ανίχνευσης πραγματοποιείται απευθείας ανίχνευση της μάζας του εκρηκτικού υλικού μακροσκοπικά, συνήθως με την προβολή εικόνων από σαρωτές X-Ray ή άλλο παρόμοιο εξοπλισμό. Στην περίπτωση της Ανίχνευσης Ιχνών Εκρηκτικών Υλών, η εκρηκτική ύλη ανιχνεύεται μέσω της χημικής ταυτοποίησης μικροσκοπικών υπολειμμάτων της. Τα υπολείμματα αυτά μπορεί να είναι είτε σε μορφή σωματιδίων είτε σε μορφή αέριων μορίων είτε και στις δύο αυτές μορφές.

Στην περίπτωση που τα υπολείμματα είναι σε μορφή αέριων μορίων, αυτά αφορούν σε μόρια που εκπέμπονται από ένα στερεό ή υγρό εκρηκτικό. Η τάση των ατμών του εκρηκτικού υλικού σχετίζεται με τη συγκέντρωση των μορίων του υλικού στον αέρα, καθώς και με άλλους παράγοντες, όπως το χρονικό διάστημα που βρίσκεται στο συγκεκριμένο σημείο το εκρηκτικό υλικό, ο τρόπος συσκευασίας του, η θερμοκρασία που βρίσκεται, η πιθανή ανανέωση του αέρα στην συγκεκριμένη τοποθεσία, κλπ.

Στην περίπτωση ανίχνευσης σωματιδίων, προκαλείται επικόλληση μικροσκοπικών σωματιδίων του στερεού, εκρηκτικού υλικού σε επιφάνεια είτε από απευθείας επαφή με το εκρηκτικό είτε από την επαφή του εκρηκτικού με τα χέρια κάποιου που χειρίζεται τα εκρηκτικά.

Σκοπός της μεθόδου μαζικής ανίχνευσης είναι να ανιχνευθούν μεγάλες ποσότητες εκρηκτικών. Από την άλλη, οι ανιχνευτές αερίων έχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης ποσοτήτων μικρότερες του ενός μικρο-γραμμαρίου. Υδρογόνο, άζωτο, άνθρακας και οξυγόνο αποτελούν τα κύρια συστατικά μιας εκρηκτικής ύλης.

Οι συγκεντρώσεις εκρηκτικών υλών κατατάσσονται σε τρεις βασικές ομάδες, σύμφωνα με την πίεση ατμού που παρουσιάζουν: Υψηλής, Μεσαίας και Χαμηλής πίεσης ατμού. Στο Σχήμα 1 που ακολουθεί απεικονίζεται η μέγιστη συγκέντρωση ατμών στον αέρα που αφορούν σε διάφορες εκρηκτικές ύλες σε θερμοκρασία δωματίου (Α, Β και C: Υψηλή, Μεσαία και Χαμηλή, αντίστοιχα).



Σχήμα 1: Ταξινόμηση εκρηκτικών υλών με βάση τη συγκέντρωση των ατμών [4]

Στην κατηγορία υψηλής πίεσης ατμών περιλαμβάνονται η δινιτρική αιθυλενογλυκόλη ή νιτρογλυκόλη (Ethylene Glycol Dinitrate, EGDN,  $C_2H_4N_2O_6$ ), η 1,2,3-τρινιτρικήπροπανοτριόληήνιτρογλυκερίνη (Nitroglycerin, NG,  $C_3H_5N_3O_9$ ) και 2,4-δινιτροτολουόλιο (2,4-dinitrotoluene, DNT,  $C_7H_6N_2O_4$ ). Αυτές οι εκρηκτικές ύλες έχουν συγκεντρώσεις ατμού ισορροπίας στον αέρα της τάξης του ενός μέρους ανά εκατομμύριο (1ppm: 1 part per million). Στην κατηγορία μεσαίας πίεσης ατμών περιλαμβάνονται το 2,4,6- τρινιτροτολουόλιο (2,4,6-trinitrotoluene, TNT,  $C_7H_5N_3O_6$ ) και το νιτρικό αμμώνιο (Ammonium Nitrate,  $NH_4NO_3$ ). Οι εκρηκτικές ύλες αυτής της κατηγορίας έχουν συγκεντρώσεις ατμού ισορροπίας στον αέρα της τάξης του ενός μέρους ανά δισεκατομμύριο (1ppb: 1 part per billion). Τέλος, στην κατηγορία χαμηλής πίεσης ατμών περιλαμβάνονται το HMX (Octogen,  $C_4H_8N_8O_8$ ), ο κυκλωνίτης ή εξογόνο (Hexogen ή Cyclonite, RDX,  $C_3H_6N_6O_6$ ) και ο πεντρίτης ή τετρανιτρικός πενταερυθρίτης (Penta-erythri-toltetranitrate, PETN,  $C_5H_8N_4O_{12}$ ). Οι εκρηκτικές αυτές ύλες παρουσιάζουν ακόμα χαμηλότερη πίεση ατμών.

Για τις περιπτώσεις ανίχνευσης ιχνών των εκρηκτικών υλών, σημαντικό ρόλο επιτελούν οι σχετικές τιμές των πιέσεων ατμών ισορροπίας. Αισθητήρες ανίχνευσης που περιλαμβάνονται σε έναν Φασματογράφο Κινητικότητας Ιόντων (Ion Mobility Spectrometer, IMS) ή σε Ανιχνευτές Δέσμησης Ηλεκτρονίων μπορούν σχετικά

εύκολα να ανιχνεύσουν τις εκρηκτικές ύλες με υψηλή πίεση ατμών. Για παράδειγμα, ο δυναμίτης, εκρηκτική ύλη που περιέχει EGDN και NG, μπορεί να ανιχνευθεί από τους ατμούς που εκπέμπει. Στην περίπτωση ανίχνευσης εκρηκτικών υλών μεσαίας πίεσης ατμών αυτή μπορεί να επιτευχθεί κυρίως με τη διαδικασία της επιφανειακής σάρωσης (Surface Swiping). Τέλος, μέθοδοι ιχνηλάτισης, όπως η μέθοδος σάρωσης σωματιδιακών υλικών, έχουν αποδειχθεί αρκετά αποτελεσματικές στην ανίχνευση εκρηκτικών υλών με χαμηλή πίεση ατμών. Το γεγονός αυτό συμβαίνει καθώς αυτές οι εκρηκτικές ύλες δεν παράγουν αρκετά πτητικά συστατικά ώστε να μπορούν να ανιχνευθούν με τη μέθοδο επιφανειακής σάρωσης, παρά μόνο σε πολύ εξαιρετικές περιπτώσεις.

Ωστόσο, προκειμένου να υπάρξει μια πολύ καλή πιθανότητα ανίχνευσης των εκρηκτικών υλών, αυτές θα πρέπει να υποστούν αύξηση της θερμοκρασίας τους, δηλαδή να θερμανθούν. Αυτή η διαδικασία απαιτείται, καθώς η πίεση ατμού μιας ουσίας αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας της και μόνο με αυτό τον τρόπο θα υπάρξει επαρκές δείγμα προς ανίχνευση [4].

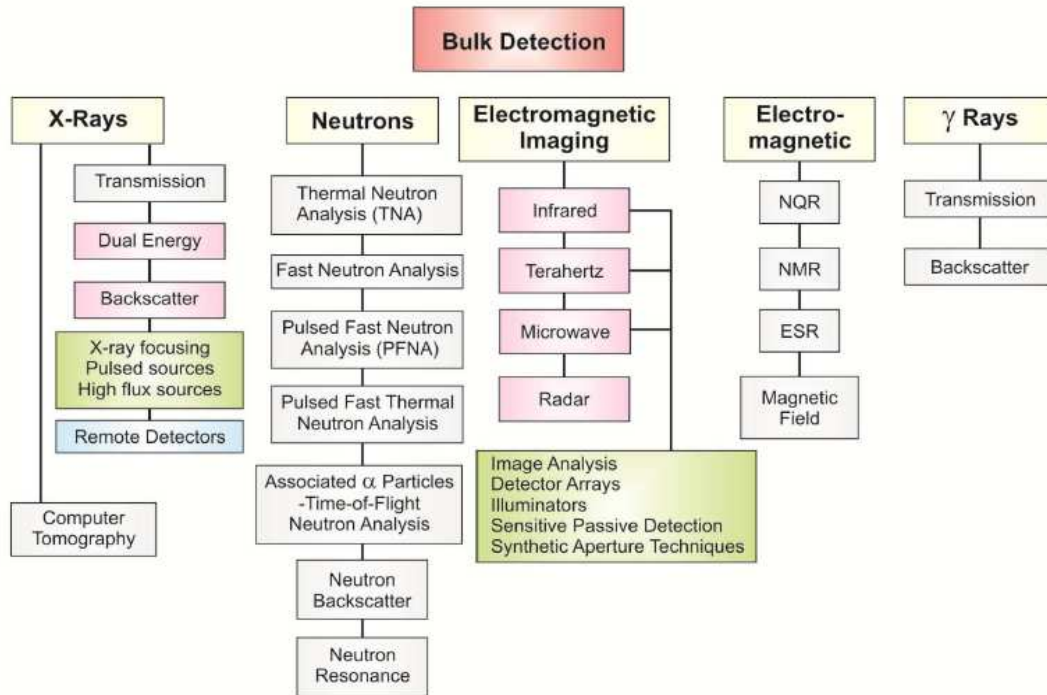
### 1.3.1 Συστήματα Μαζικής Ανίχνευσης

Η ανάπτυξη τεχνικών, βασισμένων στις ακτίνες X (X-rays machines), ακτίνες γ, υπέρυθρες κλπ., έχουν συμβάλει στην αποτελεσματική ανίχνευση όπλων και εκρηκτικών μηχανισμών. Επιγραμματικά, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την μαζική ανίχνευση περιλαμβάνουν:

- Συστήματα X-ray και γ – ray.
- Μεθόδους νετρονίων.
- Ηλεκτρομαγνητικά Συστήματα.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονισθεί ότι η μέθοδος της μαζικής ανίχνευσης δεν είναι εφαρμόσιμη για απευθείας σάρωση σε ανθρώπους, καθώς είναι πιθανό να προκαλέσει προβλήματα υγείας.

Στο Σχήμα 2 που ακολουθεί απεικονίζονται οι μέθοδοι για την μαζική ανίχνευση εκρηκτικών μηχανισμών:



Σχήμα 2: Μέθοδοι Μαζικής Ανίχνευσης Εκρηκτικών Μηχανισμών [4]

Η ανάλυση και η πλήρης περιγραφή αυτών των μεθόδων δεν αποτελεί μέρος της παρούσας διατριβής.

### 1.3.2 Μέθοδοι Ανίχνευσης Ιχνών Εκρηκτικής Ύλης

Οι μέθοδοι με τις οποίες ανιχνεύονται ατμοί είναι μη επεμβατικές και στηρίζονται στη μέτρηση ιχνών κάποιων συγκεκριμένων χαρακτηριστικών, πτητικών χημικών ενώσεων που εξατμίζονται από τις εκρηκτικές ύλες. Ο βαθμός πτητικότητας διαφέρει από εκρηκτικό σε εκρηκτικό. Η πτητικότητα αποτελεί ένα μέγεθος το οποίο χαρακτηρίζεται από τη συγκέντρωση των κορεσμένων ατμών που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του εκρηκτικού. Ενδεικτικές τιμές των συγκεντρώσεων των ατμών ορισμένων εκρηκτικών στη θερμοκρασία των  $25^{\circ}\text{C}$  είναι: για τη νιτρογλυκερίνη  $-4,1 * 10^2 \text{ppb}$ , για το TNT  $-7,7 \text{ppb}$ , για το PETN  $-18 \text{ppb}$  και για το RDX  $-6 \text{ppb}$ . Ωστόσο, στο εσωτερικό του αισθητήρα η τιμή της συγκέντρωσης των ατμών της εκρηκτικής ύλης είναι χαμηλότερη κατά πολλές τάξεις μεγέθους σε σχέση με την πίεση των κορεσμένων ατμών στην επιφάνεια του εκρηκτικού. Οι μέθοδοι ανίχνευσης ατμών

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

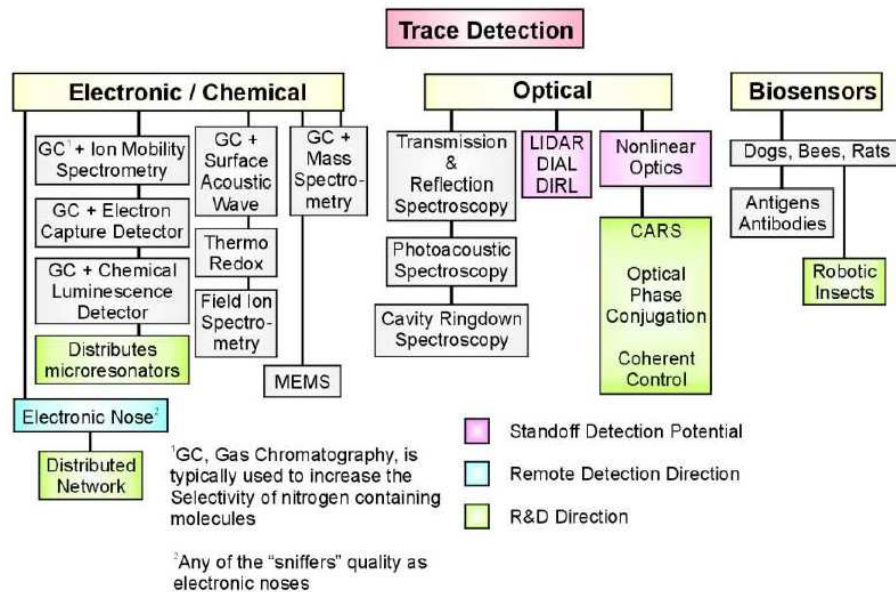
ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR

παρουσιάζουν βαθμό ευαισθησίας, ο οποίος εξαρτάται από την πίεση των ατμών. Αυτός ο βαθμός ευαισθησίας επηρεάζεται και περιορίζεται από κάποιους επιπρόσθετους παράγοντες, όπως είναι η αποτελεσματικότητα της συλλογής ατμών, η βελτίωση – ενίσχυση αυτών και η μεταφορά τους. Πιο συγκεκριμένα, η πίεση των ατμών μειώνεται όταν ο εκρηκτικός μηχανισμός βρίσκεται σφραγισμένος και συσκευασμένος σε μια τσάντα. Επίσης, μείωση του βαθμού ευαισθησίας του ανιχνευτή προκαλείται από χαμηλές τιμές της θερμοκρασίας και μεγάλη ένταση του αέρα. Οι σύγχρονες συσκευές αισθητήρων ατμών έχουν τη δυνατότητα να ανιχνεύσουν αξιόπιστα εκρηκτικά με πίεση ατμών της τάξης των  $10^2 - 10^3 \text{ prrb}$ . Παρόλα αυτά, εκείνες οι εκρηκτικές ύλες που παρουσιάζουν μικρότερη του  $1 \text{ prrb}$  πίεση ατμών, όπως τα RDX, PETN και HMX, παρουσιάζουν αντικειμενική δυσκολία να ανιχνευθούν. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται η χρήση κατάλληλης ενισχυτικής διάταξης (pre-concentrator).

Για την ανίχνευση των ατμών και των ιχνών εκρηκτικών υλών, χρησιμοποιούνται κυρίως τα παρακάτω είδη αισθητήρων:

- Ηλεκτρονικοί – Χημικοί αισθητήρες.
- Οπτικοί αισθητήρες.
- Βίο-αισθητήρες.

Στο Σχήμα 3 απεικονίζονται οι μέθοδοι ανίχνευσης ατμών και εκρηκτικών υλών:



Σχήμα 3 : Μέθοδοι Ανίχνευσης Ιχνών Εκρηκτικών Υλών [4]

#### 1.4 Εφαρμογές Φασματομετρίας Κινητικότητας Ιόντων

Στο τέλος του 19ου αιώνα έγινε γνωστή η δυνατότητα του σχηματισμού ιόντων στον ατμοσφαιρικό αέρα. Ήταν ο γνωστός φυσικός Paul Langevin, ο οποίος στις αρχές του 20ου αιώνα, μελέτησε την κίνηση των ιόντων σε ένα ηλεκτρικό πεδίο. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης αποτέλεσαν αργότερα τη βάση για τις θεμελιώδεις αρχές της Φασματομετρίας Κινητικότητας Ιόντων (IMS). Εντούτοις, η κατασκευή της πρώτης συσκευής που χρησιμοποίησε αυτή τη τεχνολογία έλαβε χώρα σχεδόν 70 χρόνια μετά. Η συσκευή ονομάστηκε Χρωματογραφία Πλάσματος και οι αρχές λειτουργίας της βασίστηκαν στην αναλυτική ηλεκτροφορητική τεχνική αέριας φάσης. Στην τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε μια ιονίζουσα πηγή παρόμοια με αυτή που είχε χρησιμοποιηθεί σε έναν ανιχνευτή δέσμησης ηλεκτρονίων. Επίσης, ο θάλαμος δείγματος σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η συνεχής εισαγωγή οργανικών ενώσεων που χαρακτηρίζονται από υψηλή καθαρότητα.

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνική της φασματογραφίας κινητικότητας ιόντων εξελίχθηκε και σήμερα αποτελεί μια φθηνή και πολύ αναλυτική τεχνική για την



ανίχνευση δειγμάτων αέριας φάσης σε συνθήκες ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας και πίεσης. Η πρώτη χρήση της συσκευής πραγματοποιήθηκε από τις Η.Π.Α και την Μεγάλη Βρετανία στις ζούγκλες του Βιετνάμ για την ανίχνευση ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Στα τέλη της δεκαετίας του '70 με αρχές της δεκαετίας του '80, πανεπιστήμια, κυβερνητικοί οργανισμοί και μικρές εταιρείες ξεκίνησαν πολλά ερευνητικά και αναπτυξιακά προγράμματα, με στόχο την κατασκευή μιας συσκευής φασματογραφίας κινητικότητας ιόντων. Η σχεδίαση και η παραγωγή μιας τέτοιας συσκευής αποδείχτηκε αρκετά ελκυστική με πολλά πλεονεκτήματα, όπως τα πολύ χαμηλά όρια ανίχνευσης, η τραχύτητα, η επιλεκτικότητα και η δυνατότητα κατασκευής της σε μικρό-κλίμακα. Η πρόοδος της τεχνολογίας της φασματογραφίας κινητικότητας ιόντων υπήρξε ραγδαία από τότε και σήμερα χρησιμοποιούνται ακόμα και φορητές IMS συσκευές. Η δυνατότητα φορητότητας της συσκευής συντέλεσε στην επέκταση και στη διεύρυνση του φάσματος εφαρμογής των IMS οργάνων, τα οποία πλέον χρησιμοποιούνται όχι μόνο σε εργαστηριακό περιβάλλον.

Το εύρος εφαρμογής των IMS συσκευών περιλαμβάνει: παρακολούθηση χημικών όπλων, ανίχνευση εκρηκτικών, ανάλυση ποιότητας αέρα, ασφάλεια αεροδρομίων, ανάλυση ποιότητας τροφών, ανάλυση περιβάλλοντος, έλεγχος διαδικασιών, ιατρικές διαγνώσεις, βιολογικές και κλινικές αναλύσεις, ανίχνευση ναρκωτικών ουσιών, ιατροδικαστικές εξετάσεις. Η λίστα εφαρμογών συνεχώς επεκτείνεται, καθιστώντας το τομέα έρευνας και ανάπτυξης τους διαρκώς εξελισσόμενο και ενεργό. Συγκεκριμένα, για την ανάλυση αερίων η φασματογραφία κινητικότητας ιόντων αποτελεί την πιο κατάλληλη μέθοδο.

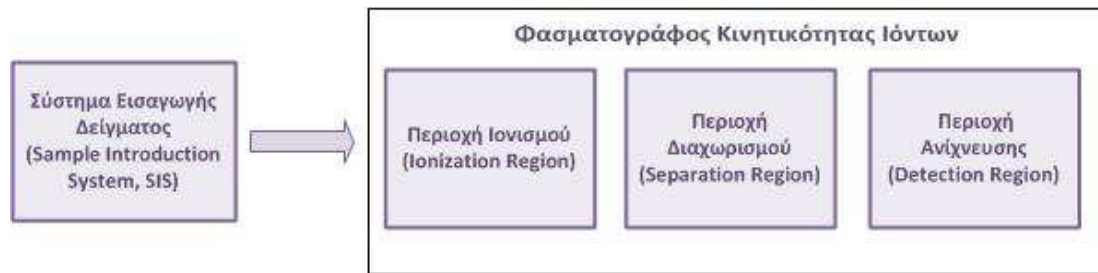
Παράλληλα, η μέθοδος αυτού του είδους φασματογραφίας χρησιμοποιείται σε νέες εφαρμογές που αφορούν στην ανάλυση πολύπλοκων, βιολογικών και χημικών δειγμάτων. Εντούτοις, η φασματογραφία κινητικότητας ιόντων από μόνη της δεν αρκεί ώστε να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την ταυτοποίηση αναλυτών. Το μειονέκτημα αυτό οφείλεται στο ότι η πλειοψηφία αυτών των αναλυτών που περιέχονται σε πολύπλοκα μείγματα συχνά παρουσιάζουν παρόμοια ή ακόμα και ίδια κινητικότητα. Για το λόγο αυτό, προτιμώνται συζευγμένες τεχνικές φασματογραφίας προκειμένου να υπάρξουν βελτιωμένες αναλύσεις δειγμάτων. Μία από αυτές τις

συζευγμένες τεχνικές είναι η ταυτοποίηση ιόντων που διέρχονται και φιλτράρονται από έναν φασματογράφο κινητικότητας ιόντων. Ουσιαστικά, σε αυτή την τεχνική, η IMS συσκευή χρησιμοποιείται ως ένα προ-φίλτρο για τα συστήματα Φασματογραφίας Μάζας (Mass Spectrometry, MS). Η φασματογραφία μάζας είναι μια παγιωμένη τεχνική χημικής ανάλυσης, που στόχο έχει να μετρηθεί και να υπολογισθεί η αναλογία μάζας προς φόρτιση ( $m/z$ ) ενός μοριακού ιόντος. Η αναλογία μάζας προς φόρτιση αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος για το μόριο, που ορίζεται από τον αριθμό μάζας ( $m$ ) ενός ιόντος διαιρούμενο με τον αριθμό φόρτισής του ( $z$ ). Σε μία IMS-MS συσκευή, τα ιόντα διαχωρίζονται σύμφωνα με την αναλογία μεγέθους-φόρτισης στο IMS τμήμα της συσκευής και σύμφωνα με την αναλογία μάζας-φόρτισης στο MS τμήμα της συσκευής. Ο συνδυασμός IMS-MS συσκευών έχει το πλεονέκτημα ότι ο μεν φασματογράφος κινητικότητας ιόντων (IMS) ξεχωρίζει τα ισομερή ίδιων χημικών ενώσεων και ο φασματογράφος μάζας (MS) στη συνέχεια ταυτοποιεί αυτές τις ενώσεις. Ο σωλήνας εκτροπής ενός φασματογράφου κινητικότητας ιόντων αποτελεί τον διάυλο προς ένα σύστημα φασματογράφου μάζας [5].

#### 1.4.1 Αρχή Λειτουργίας του Φασματογράφου Κινητικότητας Ιόντων

Μια συσκευή φασματογράφου κινητικότητας ιόντων απαρτίζεται ουσιαστικά από τέσσερα επιμέρους τμήματα, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 4 και είναι τα εξής: i. Σύστημα εισαγωγής δείγματος (Sample Introduction System, SIS), ii. Περιοχή ιονισμού (Ionization Region), iii. Σωλήνας εκτροπής (όπου λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός ή η επιλογή) (Separation Region) και iv. Περιοχή Ανίχνευσης (Detection Region).





Σχήμα 4: Περιοχές λειτουργίας Φασματογράφου Κινητικότητας Ιόντων [5]

Αρχικά και προτού ξεκινήσει η διαδικασία ιονισμού, θα πρέπει να προηγηθεί η εισαγωγή του δείγματος στη συσκευή. Η διαδικασία κατά την οποία ένα μικρό αλλά αντιπροσωπευτικό κλάσμα ενός άγνωστου αερίου μείγματος δεσμεύεται, προκειμένου στη συνέχεια να εισαχθεί στη συσκευή, ονομάζεται “δειγματοληψία”. Η σύσταση αυτού του μικρού κλάσματος πρέπει να αντιπροσωπεύει όσο το δυνατόν περισσότερο τη μέση σύνθεση του όγκου του υλικού ή του πληθυσμού. Πριν την έναρξη της ανάλυσης πραγματικών δειγμάτων και τη καταγραφή μετρήσεων και αποτελεσμάτων, θα πρέπει να έχει προηγηθεί η βαθμονόμηση (calibration) της συσκευής. Πρόκειται για μια διαδικασία, κατά την οποία καθορίζεται η σχέση μεταξύ της αναλυτικής απόκρισης και της συγκέντρωσης της υπό ανάλυσης ουσίας. Ο καθορισμός αυτός επιτυγχάνεται συνήθως με τη χρήση άλλων, γνωστών δειγμάτων. Τα γνωστά αυτά δείγματα παρασκευάζονται με τη βοήθεια χημικών προτύπων και χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση οργάνων, αποφεύγοντας φαινόμενα παρεμβολών από άλλα υλικά. Μεταξύ των εξωτερικών, χημικών προτύπων περιλαμβάνεται και ο επιθυμητός αναλυτής σε γνωστές συγκεντρώσεις. Η λήψη του σήματος απόκρισης (ένταση, ύψος κορυφής, περιοχή κορυφής) ως συνάρτηση της γνωστής συγκέντρωσης της υπό ανάλυσης ουσίας οδηγεί στη βαθμονόμηση της συσκευής. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτει μια σειρά αποτελεσμάτων – αποκρίσεων, η οποία οδηγεί σε μια καμπύλη βαθμονόμησης. Η καμπύλη αυτή αποτυπώνεται είτε με τη γραφική σχεδίαση των αποτελεσμάτων – αποκρίσεων είτε με την κατάλληλη προσαρμογή τους σε μια μαθηματική εξίσωση.

Για την είσοδο αερίου, υγρού ή στερεού δείγματος βαθμονόμησης σε έναν φασματογράφο κινητικότητας ιόντων χρησιμοποιείται πληθώρα συσκευών, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται σωλήνες διείσδυσης, δοχεία καθαρισμού και φιάλες από

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR

γυαλί αραίωσης, κεντρικοί δειγματολήπτες, πυρολύτες, μονάδες εξάτμισης, μονάδες εισόδου μεμβράνης, μονάδες θερμικής εκρόφησης, μονάδα εκχύλισης στερεάς φάσης, αναδευτήρες απορρόφησης ράβδων ανάδευσης, χρωματογραφικές στήλες και χρωματογράφοι υπερ-κρίσιμου υγρού. Οι συσκευές αυτές αποτελούν κάποια από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα Συστήματα Εισόδου Δείγματος (SISs), λόγω της χαμηλής τιμής τους και της ευκολίας στη λειτουργία τους και ο βασικός τους ρόλος είναι να μετατρέπουν υγρές ή στέρεες ουσίες σε πτητικούς αναλυτές, πριν από τον προσδιορισμό τους.

Ουσιαστικά, από το σύστημα εισαγωγής δείγματος καθορίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό το δυναμικό των αναλύσεων ενός IMS οργάνου. Βασικοί παράγοντες για την σωστή επιλογή του συστήματος εισαγωγής δείγματος αποτελούν η υπό ανάλυση ουσία, η ευαισθησία και η εκλεκτικότητα που απαιτείται. Εξάλλου, πιθανές παρεμβολές που μπορεί να προκληθούν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, όπως αυτές που μπορεί να προκαλέσει η υγρασία ή η παρουσία κάποιων ξένων χημικών ενώσεων που είναι εξίσου πτητικές με την υπό ανάλυση ουσία στην ίδια θερμοκρασία, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν αν επιλεγεί το κατάλληλο σύστημα εισαγωγής δείγματος. Το κόστος είναι ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή του συστήματος εισαγωγής δείγματος. Η ανάλυση δειγμάτων με τη χρήση μόνο της φασματογραφίας κινητικότητας ιόντων δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη, δεδομένου ότι πολλά αποτελέσματα μετρήσεων που βασίστηκαν αποκλειστικά και μόνο στη μέθοδο αυτή αποδείχθηκαν ανεπαρκή. Οι βασικότεροι λόγοι για τους οποίους κρίνεται ανεπαρκής η αποκλειστική χρήση αυτής της μεθόδου είναι η συχνή αλληλεπικάλυψη των κορυφών και η τάση που παρουσιάζουν τα ιόντα να αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους στην περιοχή του ιονισμού. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν αυτού του είδους τα προβλήματα, οι ουσίες που πρόκειται να αναλυθούν διαχωρίζονται προτού εισαχθούν στον φασματογράφο και αυτό επιτυγχάνεται με συνδυασμό διαφόρων τεχνικών. Για παράδειγμα, η ανάλυση του φασματογράφου κινητικότητας ιόντων βελτιώνεται με τη χρήση μιας συζευγμένης χρωματογραφικής στήλης. Επίσης, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο συγκεκριμένων πτητικών αναλυόμενων ουσιών ικανοποιείται με τη χρήση μιας

μονάδας εκχύλισης στερεάς φάσης σε συνδυασμό με έναν φασματογράφο. Σήμερα, τα πιο συνηθισμένα συστήματα εισαγωγής δείγματος στον φασματογράφο κινητικότητας ιόντων, λόγω χαμηλού κόστους και ευκολίας στη χρήση τους, είναι οι σωλήνες διαπερατότητας, τα δοχεία καθαρισμού και οι φιάλες από γυαλί αραίωσης, οι δειγματολήπτες υπέρυθρων και οι μονάδες εξάτμισης. Ωστόσο, τα συστήματα ιονισμού με ηλεκτροψεκασμό (electro-spray ionization, ESI) και τα συστήματα ιονισμού εκρόφησης με laser υποβοηθούμενου από υλικό μήτρας (Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization, MALDI) παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα, καθώς και τα δύο έχουν τη δυνατότητα να αναλύσουν ενώσεις μεγάλου μοριακού βάρους και ενώσεις θερμικά ασταθή, όπως συνθετικά πολυμερή, πεπτίδια και πρωτεΐνες σε συνδυασμό με έναν φασματογράφο κινητικότητας ιόντων. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά διαθέτουν το πλεονέκτημα ότι μπορούν να προκαλέσουν τον ιονισμό του δείγματος (Ionization Region). Με τον τρόπο αυτό, πραγματοποιείται απευθείας εισαγωγή ιονισμένου δείγματος στον φασματογράφο.

Ο ραδιενεργός, χημικός ιονισμός σε ατμοσφαιρική πίεση (Radioactive-Atmospheric Pressure Chemical Ionization, R-APCI) αποτελεί τη πιο συνηθισμένη μέθοδος ιονισμού σε έναν φασματογράφο κινητικότητας ιόντων. Πηγή αυτού του είδους του ιονισμού είναι μια β-πηγή ραδιενεργού ισότοπου, όπως ένα μικρό φύλλο Ni-63. Άλλα στοιχεία που έχουν χρησιμοποιηθεί ως πηγές ραδιενεργού ισότοπου είναι το τρίτιο (T ή  $H^3$ , β-ραδιενεργό ισότοπο του υδρογόνου H) και το διοξείδιο του αμερίκιου ( $Am^{241}$ ). Μία ακόμα μέθοδος ιονισμού αποτελεί ο φωτο-ιονισμός, που λαμβάνει χώρα σε ατμοσφαιρική πίεση (Atmospheric Pressure Photo Ionization, APPI) και βασίζεται στο υπεριώδες φως (UV). Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται ο ιονισμός εκείνων των μορίων που διαθέτουν δυναμικό ιονισμού μικρότερο από το δυναμικό της ενέργειας των εκπεμπόμενων φωτονίων. Παρόλο που αυτή η μέθοδος θα μπορούσε να θεωρηθεί καλύτερη, δεδομένου ότι περιορίζει το θόρυβο που προκαλείται από το φυσικό περιβάλλον, ωστόσο παρουσιάζει ένα βασικό μειονέκτημα, αφού τελικά τα ιονισμένα μόρια που προκύπτουν είναι πολύ λιγότερα.

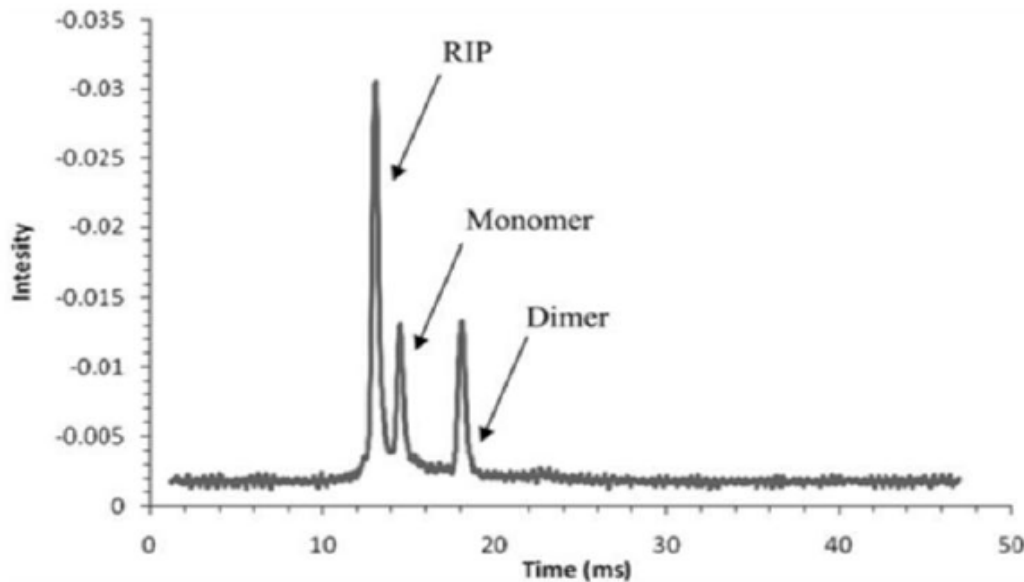
Η εφαρμογή του φαινομένου εκκένωσης Corona σε ατμοσφαιρική πίεση (Corona Discharge Atmospheric Pressure Chemical Ionization, CD-APCI) αποτελεί

μία ακόμα τεχνική χημικού ιονισμού. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιεί ηλεκτρικό πεδίο υψηλής τάσης, που αναπτύσσεται μεταξύ μιας ακίδας (βελόνας) ή ενός πολύ λεπτού καλωδίου και μιας μεταλλικής πλάκας ή ενός ηλεκτροδίου εκκένωσης. Τέλος, χρησιμοποιείται και ο Ιονισμός Απορρόφησης Laser (Laser Desorption Ionization, LDI) ως πηγή ιονισμού.

Η μέθοδος ιονισμού που θα χρησιμοποιηθεί καθορίζει αν θα ιονιστεί το άζωτο και το οξυγόνο. Στην περίπτωση που αυτό συμβεί, τα θετικά και αρνητικά ιόντα του αζώτου και του οξυγόνου ( $N_2^+$  και  $O_2^-$ ) αντιδρούν με τα μόρια υδρατμών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να σχηματίζονται ιόντα  $(H_2O)_n(H_3O)^+$  και  $O_2^-(H_2O)_n$ , τα οποία ονομάζονται αντιδρώντα ιόντα. Στον φασματογράφο απεικονίζονται οι κορυφές αυτών των ιόντων, οι οποίες ονομάζονται κορυφές αντιδρώντων ιόντων (Reactant Ion Peak, RIP). Η θερμοκρασία του αερίου και το επίπεδο υγρασίας της ατμόσφαιρας του αερίου στο εσωτερικό της περιοχής του αναλυτή με την πηγή ιονισμού επηρεάζουν το πλήθος των μορίων υδρατμού ( $n$ ). Επίσης, υπάρχει η πιθανότητα να σχηματιστούν και άλλες ομάδες ιόντων, όπως  $(H_2O)_nNH_4^+$ , οι κορυφές των οποίων ενδέχεται να απεικονιστούν στο φάσμα κινητικότητας ως μικρές κορυφές ομάδων αμμωνίας. Οι κορυφές αυτών των ενώσεων εμφανίζονται πριν τις κορυφές των αντιδρώντων ιόντων (RIP) και ονομάζονται pre-RIP.

Η φόρτιση ενός μορίου  $M$  του δείγματος μπορεί να ιονιστεί είτε θετικά ( $M^+$ ) είτε αρνητικά ( $M^-$ ). Ενδεχομένως, το μόριο, μετά τη θετική ή αρνητική φόρτισή του, να συμμετέχει σε διάφορες αντιδράσεις. Παρόλα αυτά όμως, οι πιο ενδιαφέρουσες αντιδράσεις που συμμετέχει είναι: αυτές που λαμβάνουν χώρα με τα ουδέτερα μόρια, αυτές που οδηγούν στον σχηματισμό μονομερών ενώσεων  $MH^+$ ,  $(M-H)^-$  ή  $MO_2^-$ , και αυτές που οδηγούν στον σχηματισμό διμερών  $M_2H^+$  και τριμερών  $M_3H^+$  σε μεγάλες συγκεντρώσεις της αναλυόμενης ουσίας. Σε αυτές τις αντιδράσεις σχηματισμού ενώσεων θα πρέπει να συνυπολογισθούν και αυτές που προέρχονται από την πρόκληση αντιδράσεων ενυδάτωσης, οι οποίες οδηγούν στο σχηματισμό ομάδων ιόντων (ion clusters), όπως  $M^\pm(H_2O)_n$ . Η αντίδραση ενυδάτωσης αποτελεί μια ιδιαίτερα αποτελεσματική αντίδραση, ειδικά στην περίπτωση που η σχέση των πρωτονίων του μορίου του δείγματος που βρίσκονται σε αέρια φάση είναι μεγαλύτερη από αυτή του

νερού, δηλαδή μεγαλύτερη από  $691\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Στο Σχήμα 5 απεικονίζονται οι κορυφές ενός μονομερούς, ενός διμερούς και του αντιδρώντος ιόντος.



Σχήμα 5: Απεικόνιση RIP - μονομερές και διμερές σε έναν IMS [5].

Λόγω του σχηματισμού όλων αυτών των ενώσεων, η μέθοδος της φασματομετρίας κινητικότητας ιόντων αποτελεί μια ιδιαίτερα χρήσιμη μέθοδο για τη μελέτη των κινητικών και θερμοδυναμικών αντιδράσεων ιόντων – μορίων. Με τη μέθοδο της φασματομετρίας έχουν ήδη προσδιορισθεί οι σχέσεις των πρωτονίων κάποιων χημικών ενώσεων με τις αντίστοιχες σταθερές ισορροπίας των αντιδράσεων μεταφοράς πρωτονίων. Μια ακόμα εφαρμογή του φασματογράφου κινητικότητας ιόντων είναι η μελέτη των αντιδράσεων που οδηγούν στη δέσμευση ηλεκτρονίων και στον σχηματισμό διμερούς με δεσμευμένο πρωτόνιο, όπως και στη μεταφορά πρωτονίων. Τέλος, μια πολύ σημαντική λεπτομέρεια είναι ότι ο φασματογράφος κινητικότητας ιόντων έχει εφαρμοστεί τόσο στη μελέτη της κινητικότητας των αρνητικά φορτισμένων ιόντων όσο και των θετικά φορτισμένων ιόντων.

Εφόσον το ιόν περάσει τη διαδικασία ιονισμού στο αντίστοιχο τμήμα του φασματογράφου, αυτό οδηγείται στο επόμενο τμήμα της συσκευής, που είναι το τμήμα εκτροπής ή διαχωρισμού. Σε κάποια κείμενα το τμήμα αυτό απαντάται και ως σωλήνας εκτροπής (drift tube). Πρόκειται για το κυρίως μέρος ενός φασματογράφου

κινητικότητας ιόντων. Η εφαρμογή ενός ενδιάμεσου σταδίου μεταξύ των τμημάτων ιονισμού και διαχωρισμού θεωρήθηκε αναγκαίο σε κάποιες συσκευές φασματογράφου, ώστε να υπάρξει αποτελεσματικότερη και αποδοτικότερη εστίαση των ιόντων, προτού αυτά εισέλθουν στο τμήμα διαχωρισμού. Για παράδειγμα, σε κάποιες ειδικές κατασκευές, το ενδιάμεσο στάδιο αποτελεί ουσιαστικά μια εστίαση ιόντων σε επίπεδο FAIMS (High-Field Asymmetric Waveform Ion Mobility Spectrometry), ενώ σε άλλη αντίστοιχη περίπτωση, έχει κατασκευαστεί ένα είδος χωνιού, το οποίο χρησιμοποιείται για την εστίαση των ιόντων σε έναν συμβατικό DTIMS (Drift Time Ion Mobility Spectrometer).

Άλλη τεχνική για καλύτερη και αποδοτικότερη εστίαση των ιόντων που έχει εφαρμοστεί είναι μία ειδική πύλη ιόντων που διαθέτει ένας φασματογράφος DTIMS και διεγείρει το σμήνος των ιόντων κατά την είσοδό τους στην περιοχή διαχωρισμού. Υπάρχουν δύο διαφορετικά συστήματα πυλών ιόντων, η πύλη Bradbury-Nielson (BNG) και η πύλη Tyndall (TG). Η αρχή λειτουργίας αυτών των συστημάτων πυλών βασίζεται στη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου ανάμεσα σε δύο σειρές λεπτών καλωδίων, τα οποία είναι τοποθετημένα διάσπαρτα και βυθισμένα κατά μήκος του σωλήνα εκτροπής.

Για την κίνηση των ιόντων μέσα στο σωλήνα εκτροπής χρησιμοποιείται ένα μέσον σε αέρια φάση. Η κίνηση των ιόντων και του αέριου μέσου μέσα στον σωλήνα εκτροπής επιτυγχάνεται λόγω της επίδρασης ενός ηλεκτρικού πεδίου  $E$ . Κατά τη κίνησή τους, τα ιόντα επιταχύνουν λόγω των ασκούμενων δυνάμεων Coulomb και επιβραδύνουν λόγω των αναπόφευκτων συγκρούσεων με τα μόρια του αέριου μέσου. Όταν τα ιόντα βρίσκονται σε ισορροπία κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση κατά μέσο όρο με μία σταθερή ταχύτητα μετατόπισης  $v_d$ , η οποία είναι ανάλογη του ηλεκτρικού πεδίου:  $v_d = K * E$ . Σε αυτή την ισότητα, ο αναλογικός παράγοντας ονομάζεται ταχύτητα  $K$  και εκφράζεται συνήθως σε μονάδες  $cm^2 * V^{-1} * s^{-1}$ .

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου διαφέρει από συσκευή σε συσκευή. Για παράδειγμα ο φασματογράφος DTIMS λειτουργεί με χαμηλό ηλεκτρικό πεδίο ( $E \sim 7,500 V * cm^{-1}$  ή  $E/N < 30Td$ ). Ο λόγος  $E/N$  ικανοποιεί την ανάγκη επέκτασης της σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Εκφράζεται σε μονάδες  $V * cm^2$ , όπου  $N$  είναι η

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR



τιμή της πυκνότητας, δηλαδή ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου. Ωστόσο, έχει αποφασισθεί να υιοθετηθεί η μονάδα *Townsend*:  $1Td = 10^{-21}V * m^2 = 10^{-17}V * cm^2$ . Στην σχέση αυτή η ταχύτητα είναι ένα μέγεθος που συνήθως θεωρείται σταθερό σε σχέση με το ηλεκτρικό πεδίο  $E$ . Η παραδοχή αυτή δεν απέχει από την πραγματικότητα, ειδικά στην περίπτωση των DTIMS οργάνων. Στις περιπτώσεις, ωστόσο που οι τιμές του λόγου  $E/N$  είναι μεγάλες, το ηλεκτρικό πεδίο επηρεάζει τις τιμές του  $K$ , δηλαδή ισχύει:  $e * K = K(E/N)$ .

Ένα ακόμα μέγεθος που επηρεάζει την κινητικότητα ενός ιόντος είναι η διατομή της σύγκρουσης ( $\Omega$ ) και η πυκνότητα  $N$ , δηλαδή ο αριθμός των μορίων ανά μονάδα όγκου. Σύμφωνα με τη θεωρία των Charman-Enskog, υπολογίζεται η εξίσωση Mason-Champ:

$$K = \frac{3}{16} * \left( \frac{2 * \pi}{\mu * k_B * T} \right)^{\frac{1}{2}} * \frac{z * e}{N * \Omega} \quad \text{Εξίσωση (1)}$$

όπου:  $\mu = \frac{m * M}{m + M}$  είναι η μειωμένη μάζα ενός ζεύγους ιόντος και μορίου, όπου το ιόν διάχυσης είναι μάζας  $m$  και το μόριο αερίου μέσου μάζας  $M$ ,  $k_B$  είναι η σταθερά του Boltzmann ( $1.38065 * 10^{-23} JK^{-1}$ ),  $T$  είναι η θερμοκρασία του αερίου (μετρούμενη σε βαθμούς  $K$ ),  $z$  (χωρίς διαστάσεις) είναι ο αριθμός των στοιχειακών φορτίσεων και  $e$  είναι η στοιχειακή φόρτιση ( $1.602 * 10^{-19} C$ ). Κατά τη λειτουργία ενός οργάνου FAIMS, η κινητικότητα ενός ιόντος που βρίσκεται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου υψηλής τάσης, είναι:

$$\begin{aligned} K \left( \frac{E}{N} \right) &= K_0 * \left[ 1 + a \left( \frac{E}{N} \right) \right] = K_0 * \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_{2n} * \left( \frac{E}{N} \right)^{2n} \right] \\ &= K_0 * \left[ 1 + \alpha_2 * \left( \frac{E}{N} \right)^2 + \alpha_4 * \left( \frac{E}{N} \right)^4 \right] \quad \text{Εξίσωση (2)} \end{aligned}$$

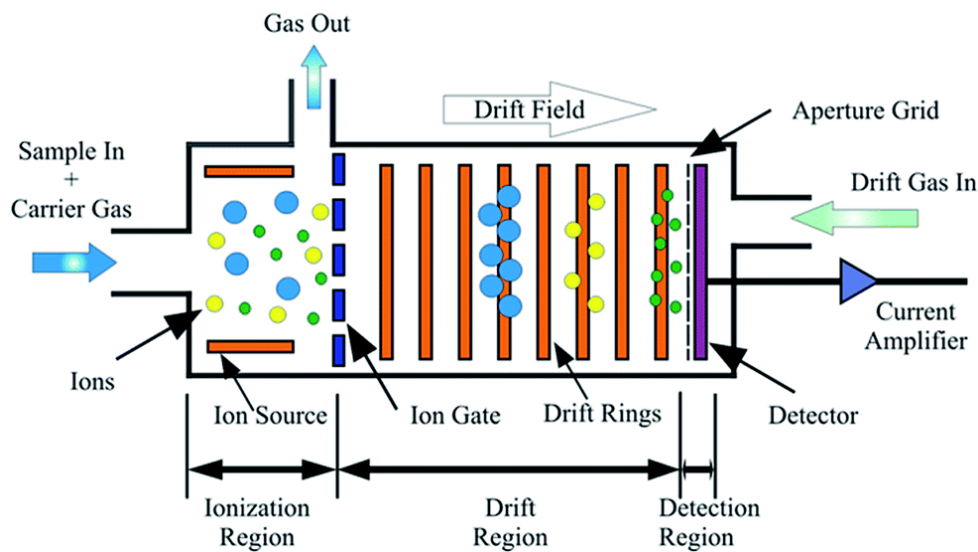
όπου  $K_0 = K(E)|_{E=0}$  είναι η κινητικότητα του ιόντος όταν αυτό κινείται υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου χαμηλού δυναμικού, όπως συμβαίνει σε ένα όργανο DTIMS. Οι τιμές του παράγοντα είναι σχεδόν ίδιες για κάθε ιόν, όταν σε αυτά εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο χαμηλού δυναμικού ( $< 30Td, \sim 7,500 V/cm$ ). Το

γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα όλα τα ιόντα να παρουσιάζουν σταθερή κινητικότητα. Τα ιόντα με την ίδια κινητικότητα εμφανίζουν τελικές κορυφές που θα υπερκαλύπτονται. Η εξάρτηση της κινητικότητας των ιόντων με το ηλεκτρικό πεδίο επιδρά στη λειτουργία του γινομένου  $\alpha * (E/N)$  εφόσον πρόκειται για σταθερή πυκνότητα αερίου, σε καταστάσεις ατμοσφαιρικής πίεσης και θερμοκρασίας. Η μαθηματική προσέγγιση του γινομένου  $\alpha * (E/N)$  αντιστοιχεί σε σειρά Taylor. Όλες οι τιμές των  $\alpha_{2n}$  μπορεί να είναι θετικές ή/και αρνητικές. Αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, ένας εκ των οποίων είναι το δυναμικό που εμφανίζει ένα ουδέτερο ιόν  $\Phi$ . Στην πραγματικότητα, κανένα ιόν δεν μπορεί να θεωρηθεί ουδέτερο (κενό, null) και ο παράγοντας  $\alpha * (E/N)$  δεν είναι ποτέ ακριβώς μηδέν, αλλά για πολλές τιμές του λόγου  $E/N$  προσεγγίζει το μηδέν πάρα πολύ. Με τη βοήθεια εφαρμοσμένων μαθηματικών τύπων και ολοκληρώματα υψηλότερης τάξης του  $\Omega$  μπορούν να υπολογισθούν οι συντελεστές  $n$ . Σύμφωνα με μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια πειραμάτων, έχει αποδειχθεί ότι ο συντελεστής  $\alpha_2$  είναι μικρότερος της μονάδας κατά τρεις έως πέντε τάξεις μεγέθους, ενώ ο συντελεστής  $\alpha_4$  είναι μικρότερος του συντελεστή  $\alpha_2$  κατά δύο τάξεις μεγέθους. Αυτό, πρακτικά, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αρκούν δύο συντελεστές και μόνο προκειμένου να υπολογισθεί το μέγεθος της εξάρτησης της κινητικότητας με το ηλεκτρικό πεδίο.

Για το τελευταίο τμήμα ενός IMS φασματογράφου, που είναι ο ανιχνευτής, χρησιμοποιείται συνήθως μία πλάκα Faraday (Faraday's plate). Η χρήση της πλάκας Faraday γίνεται σε συνδυασμό με ένα πλέγμα ανοίγματος (aperture grid), όπως συμβαίνει στα όργανα DTIMS και FAIMS. Στους φασματογράφους FAIMS, αντί να χρησιμοποιείται ένα «κύπελο» Faraday που θα λειτουργεί ως «πώμα» της δέσμης, οι περισσότερες κατασκευές χρησιμοποιούν ένα ζεύγος ηλεκτρονίων. Η λειτουργία αυτού του ζεύγους είναι αρχικά για να ελκύει τα ιόντα και στη συνέχεια να τα ανιχνεύει με τη χρήση κατάλληλων οργάνων – μετρητών ηλεκτρονίων ή pico-μετρητών. Η χρήση αυτής της διάταξης έχει ένα πολύ βασικό πλεονέκτημα: την ταυτόχρονη ανίχνευση των θετικών και των αρνητικών ιόντων, κάτι που δεν είναι εφικτό να γίνει με τη χρήση του «κυπέλου» Faraday στον ανιχνευτή, όπως συμβαίνει στα όργανα DTIMS.



Τα μεγέθη που μετρούνται στην έξοδο του ανιχνευτή απαιτούν ενίσχυση προτού σταλούν σε ένα αυτόματο καταγραφικό. Εκεί, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, τα δεδομένα αποθηκεύονται και είναι έτοιμα για επεξεργασία. Το σύνηθες είναι τα δεδομένα εξόδου να είναι τιμές της έντασης του ρεύματος. Οπότε, το φάσμα κινητικότητας των ιόντων αντιπροσωπεύεται από μία γραφική παράσταση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος των ιόντων ως συνάρτηση του χρόνου εκτροπής, δηλαδή του χρόνου που απαιτείται ώστε το ιόν, από τη στιγμή που αυτό περάσει την πύλη ιόντων, να φτάσει στο τμήμα του ανιχνευτή, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση συμβατικού IMS (DTIMS) [5].

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η απεικόνιση της εξόδου των IMS συσκευών αποτελείται από κορυφές, το ύψος των οποίων αντιστοιχούν με το ποσοστό συγκέντρωσης των υπό ανάλυση ενώσεων. Εκτός όμως από αυτά τα στοιχεία, παρέχουν και πληροφορίες για την ποιότητα αυτών των ενώσεων, αφού το σημείο στο οποίο εμφανίζονται οι κορυφές αυτές έχουν άμεση σχέση με τη μορφή και το μέγεθος των ενώσεων, αφού ο συντελεστής  $K$  επηρεάζει το χρόνο εκτροπής. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση όπου οι κορυφές RIP των υπό ανάλυση ουσιών μειώνονται και η αντίστοιχη κορυφή του αναλυτή αυξάνεται, όταν το ποσοστό συγκέντρωσης του αναλυτή στο δείγμα είναι μεγαλύτερο από ότι το ποσοστό συγκέντρωσης των ουσιών. Η εφαρμογή των διαδικασιών Ανάλυσης Γκαουσιανής Καμπύλης (Gaussian-Curve-Analysis procedures) βοηθούν στον υπολογισμό των περιοχών των κορυφών [5].

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR

### 1.4.2 Είδη Φασματογράφων Κινητικότητας Ιόντων

Υπάρχουν πολλά είδη φασματογράφων κινητικότητας ιόντων. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι η πλειοψηφία των IMS συσκευών δεν αποτελούν ανεξάρτητα όργανα, όπως ο φασματογράφος Travelling IMS (TWIMS). Ο συγκεκριμένος τύπος συσκευής λειτουργεί πάντα σε συνδυασμό με έναν φασματογράφο μάζας. Στη συνέχεια, παρατίθενται τα διαθέσιμα IMS όργανα, καθώς και μια γενική περιγραφή της λειτουργίας τους:

- Drift Time Ion Mobility Spectrometer (DTIMS)

Το πιο χαρακτηριστικό όργανο της κατηγορίας IMS είναι ο φασματογράφος κινητικότητας ιόντων με χρονική εκτροπή. Στο συγκεκριμένο όργανο η κίνηση των ιόντων είναι αποτέλεσμα ενός ομογενούς, συνεχούς ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται μέσα σε έναν σωλήνα εκτροπής με την παρουσία μορίων αερίων (βλέπε προηγούμενο Σχήμα 6). Το σχεδόν ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται κατά μήκος του άξονα του σωλήνα εκτροπής δημιουργείται από μια σειρά στοιβαγμένων ηλεκτροδίων σε μορφή δακτυλίου που διαθέτει ο DTIMS. Τη στιγμή που το φέρον αέριο μαζί με το δείγμα αερίου εισέρχονται στην περιοχή ιονισμού, ταυτόχρονα εισέρχεται ένα ουδέτερο αέριο (κυρίως αζώτου, ήλιου ή αργού) από την πλευρά του τμήματος ανίχνευσης, αλλά με αντίστροφη ροή. Το ουδέτερο αυτό αέριο ονομάζεται αέριο εκτροπής. Το αέριο εκτροπής απομακρύνει τυχόν μη ιονισμένα συστατικά μέρη του δείγματος αερίου από την περιοχή εκτροπής. Με τη βοήθεια μιας ηλεκτρονικής πύλης ιόντων, τα ιόντα που θα σχηματιστούν, ανεξαρτήτως του τρόπου που αυτά ιονίστηκαν, εγχέονται στην περιοχή εκτροπής. Η πύλη ιόντων παραμένει ανοιχτή για ένα δεδομένο, σύντομο χρονικό διάστημα (50-200μs), ενώ στη συνέχεια κλείνει, αφήνοντας ελεύθερη τη διέλευση του σμήνους των ιόντων προς την περιοχή εκτροπής. Η ταχύτητα με την οποία κινούνται τα ιόντα παραμένει σταθερή και είναι ανάλογη του ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό συμβαίνει, διότι οποιαδήποτε ενέργεια αποκτάται λόγω της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, αυτή εξουδετερώνεται εξαιτίας των συγκρούσεων με τα ουδέτερα μόρια του αερίου εκτροπής.

Σε αυτόν τον τύπο φασματογράφου, ενδέχεται να παρατηρηθεί ελάττωση της ταχύτητας  $K$ . Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι παρόλο που το χαμηλό δυναμικό  $E$  του

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

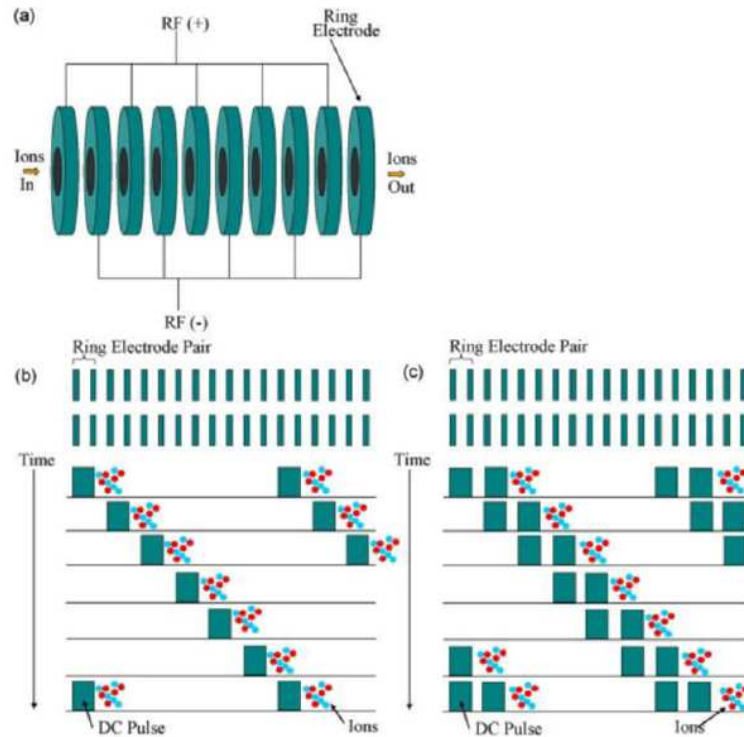
ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR

ηλεκτρικού πεδίου δεν επηρεάζει τη ταχύτητα, εντούτοις η ταχύτητα επηρεάζεται από την τιμή της πυκνότητας ( $N$ ). Επίσης, εξάγεται το συμπέρασμα ότι όταν τα ιόντα κινούνται υπό την επίδραση ενός σταθερού δυναμικού  $E$  με μια σταθερή ταχύτητα  $v$ , η μετατόπιση  $L$  είναι ανάλογη του χρόνου  $L = KEt$ . Έτσι, προκύπτει ότι ο χρόνος εκτροπής που απαιτείται προκειμένου ένα ιόν να διασχίσει την περιοχή εκτροπής είναι ανάλογος του αντίστροφου της ταχύτητας, δηλαδή του αντίστροφου του  $E/N : t_{ion} \propto (E/N)^{-1}$ .

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η φασματομετρία κινητικότητας ιόντων είναι πιο αποτελεσματική, όταν συνδυάζεται με άλλες παρόμοιες τεχνικές. Η μελέτη, επομένως, των πολυδιάστατων οργάνων IMS έχει διευρυνθεί. Πιο συγκεκριμένα, έχει σχεδιασθεί και μελετηθεί ο τρόπος λειτουργίας ενός IMS-IMS-MS ( $IMS^2 - MS$ ) οργάνου. Σε αυτή την περίπτωση οργάνου, υπάρχει ένα πρώτο τμήμα εκτροπής και τα ιόντα που εξέρχονται από αυτό, εισέρχονται σε ένα δεύτερο τμήμα εκτροπής. Για την είσοδό τους στο δεύτερο τμήμα εκτροπής χρησιμοποιείται ένα «χωνί» ιόντων, το οποίο εστιάζει ακτινωτά τα σμήνη διάχυτων ιόντων, προκειμένου αυτά να οδηγηθούν στο δεύτερο τμήμα εκτροπής. Επίσης, υπάρχει και η περίπτωση του τρισδιάστατου (3D)  $IMS^3 - MS$ , στον οποίο έχει προστεθεί και ένα τρίτο τμήμα εκτροπής με ανάλογο τρόπο λειτουργίας. Στις περιπτώσεις πολλαπλών  $IMS^n$  οργάνων ( $n=5$ ), προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα ανάλυσης χωρίς αυτό να οδηγήσει και σε αντίστοιχη αύξηση του μεγέθους του οργάνου, έχει προταθεί η χρήση ενός κυλινδρικού σωλήνα εκτροπής.

#### ▪ Travelling-Wave IMS (TWIMS)

Ο δεύτερος τύπος φασματογράφου κινητικότητας ιόντων είναι ο φασματογράφος κινητικότητας ιόντων ταξιδεύοντος κύματος. Το χαρακτηριστικό αυτού του οργάνου είναι ο οδηγός ιόντων στοιβαγμένου δακτυλίου (Stacked-Ring Ion Guide, SRIG) τον οποίο διαθέτει. Στον δακτύλιο αυτό εφαρμόζεται ένα ταξιδεύον κύμα τάσης. Στα ηλεκτρόδια του δακτυλίου που γειτονεύουν εφαρμόζεται μια RF τάση με αντίθετες φάσεις. Αυτό δημιουργεί έναν ακτινωτό περιορισμό των ιόντων που οδηγεί στην μετάδοσή τους με υψηλή απόδοση (Σχήμα 7α).



Σχήμα 7: Αρχή λειτουργίας μιας TWIMS συσκευής [5].

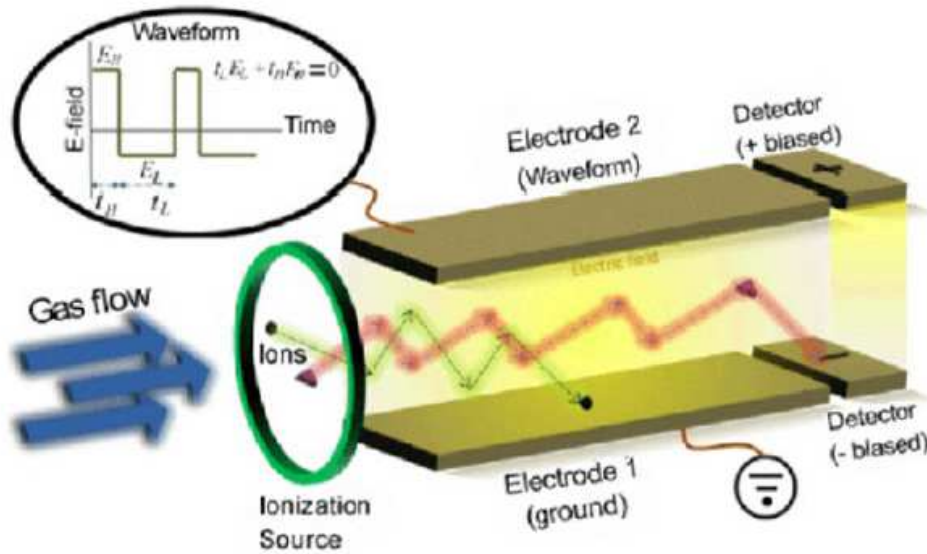
Στην περίπτωση που η συσκευή είναι γεμάτη από αέριο, προκειμένου τα ιόντα να κινηθούν μέσα σε αυτή, εφαρμόζεται μια σειρά παλμών τάσης, η οποία επαναλαμβάνεται. Στην περίπτωση του TWIMS οργάνου δεν χρησιμοποιείται αντίστροφη ροή αερίου. Η παλμική τάση συνεχούς ρεύματος είναι υπερκείμενη τάση στην τάση RF σε κάθε ηλεκτρόδιο διαδοχικά, από το ένα άκρο της συσκευής στην άλλη. Έτσι, τα ιόντα προωθούνται κατά μήκος του άξονα. Μόλις επέλθει ένα σταθερό χρονικό διάστημα παραμονής που εφαρμόζεται ο παλμός σε ένα ζεύγος ηλεκτροδίων, η τάση μεταφέρεται στο επόμενο ζεύγος, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ένα ταξιδεύον κύμα (Σχήμα 7β). Η εκτροπή προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση των διαφορετικών ειδών ιόντων που βρίσκονται μέσα στον σωλήνα επιτυγχάνεται με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου του ταξιδεύοντος κύματος. Η αλλαγή του μεγέθους της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου του ταξιδεύοντος κύματος οδηγεί σε αντίστοιχη αλλαγή της ταχύτητας των ιόντων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός τους με βάση την κινητικότητά τους. Στη φάση του διαχωρισμού, σημαντικό ρόλο έχει και το μέγεθος του κάθε ιόντος, αφού καθώς αυτά κινούνται υπό την επίδραση των

κυμάτων του δυναμικού, λαμβάνει χώρα ο διαχωρισμός τους ανά μέγεθος. Τα μικρότερα ιόντα θα συγκρουστούν λιγότερες φορές με τα μόρια αερίου εκτροπής, ενώ τα ιόντα με μεγαλύτερο μέγεθος θα συγκρουστούν περισσότερες φορές, προκαλώντας μια σχετική καθυστέρηση στο «ταξίδι» τους μέσα στον σωλήνα εκτροπής (Σχήμα 7β). Ο διαχωρισμός ενός πολύπλοκου μείγματος επιτυγχάνεται με την εφαρμογή πολλών, διαδοχικών και γρήγορων «ταξιδευόντων» κυμάτων μέσα στη συσκευή.

Ο τύπος αυτής της συσκευής λειτουργεί με χαμηλό όριο ηλεκτρικού πεδίου, όπως και η DTIMS συσκευή. Ωστόσο, απαιτείται να προηγηθεί πολύ καλή βαθμονόμηση του χρόνου εκτροπής μέσω του TWIMS οργάνου υπό καθορισμένες συνθήκες (τύπος αερίου/πίεση, ταχύτητα ή ύψος του ταξιδεύοντος κύματος, κλπ.). Το βήμα αυτό θεωρείται απαραίτητο, διότι εξαιτίας του συνεχώς μεταβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου, πλέον δεν μπορεί να εφαρμοστεί η άμεση σχέση μεταξύ  $\Omega$  και  $K_0$  της εξίσωσης (1). Η μέτρηση αναλυτών που παρουσιάζουν παρόμοια φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά με γνωστό  $\Omega$  διασφαλίζει εκείνες τις κατάλληλες συνθήκες που θα οδηγήσουν στη βέλτιστη βαθμονόμηση του οργάνου και στην αξιόπιστη ανάλυση των αποτελεσμάτων. Η δυνατότητα χρήσης της TWINS συσκευής με και χωρίς βαθμονόμηση διατομής σύγκρουσης σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως συσκευή διαχωρισμού όσο και ως δομικό εργαλείο.

▪ High Field Asymmetric Waveform Ion Mobility Spectrometer (FAIMS)

Το επόμενο, τρίτο είδος φασματογράφου κινητικότητας ιόντων είναι ο φασματογράφος κινητικότητας ιόντων υψηλού πεδίου ασύμμετρης κυματομορφής. Ο τρόπος λειτουργίας του συγκεκριμένου τύπου οργάνου βασίζεται στις διαφορές της κινητικότητας που εμφανίζουν τα ιόντα όταν αυτά βρίσκονται υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου υψηλής τάσης ( $> 30 Td, > 7,500 V/cm$ ). Αυτό το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο είναι εξαρτώμενο του χρόνου και εφαρμόζεται ως περιοδική, ασύμμετρη κυματομορφή. Ουσιαστικά, τα όργανα αυτά εκμεταλλεύονται τις διαφορετικές κινητικότητες των ιόντων, όταν σε αυτά εφαρμόζονται διαδοχικά ηλεκτρικά πεδία χαμηλής και υψηλής τάσης (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Επίπεδη επισκόπηση FAIMS συσκευής [5].

Η δημιουργία και η εφαρμογή ενός υψηλού ηλεκτρικού πεδίου για τη λειτουργία του FAIMS οργάνου είναι σημαντική, όπως εξίσου σημαντικό είναι το ηλεκτρικό αυτό πεδίο να μπορεί να παραχθεί μέσα σε λογικά όρια τάσεων. Για το σκοπό αυτό, προτιμότερο είναι στον σωλήνα εκτροπής να υπάρχουν μικρότερα κενά. Με άλλα λόγια, ο φασματογράφος FAIMS εύκολα θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια μικρογραφία του IMS σωλήνα εκτροπής κατασκευασμένο στην κλίμακα των χιλιοστών. Ωστόσο, η κατασκευή μικροσκοπικών συσκευών δεν αφορά μόνο τη λειτουργία του συγκεκριμένου οργάνου, καθώς η νάνο-τεχνολογία αποτελεί έναν ενεργό τομέα που αφορά ολόκληρο το εύρος της φασματογραφίας κινητικότητας ιόντων.

Η εφαρμογή - χρήση ενός ηλεκτρικού πεδίου υψηλής ασύμμετρης τάσης (ιδανικά με ορθογώνιο σχήμα), που ονομάζεται πεδίο διασποράς, οδηγεί στο φιλτράρισμα των ιόντων. Η ανίχνευση ενός ιόντος με τη βοήθεια του συγκεκριμένου οργάνου επιτυγχάνεται στην περίπτωση που μια τάση αντιστάθμισης του πεδίου έντασης  $E_C$  υπερτίθεται στο πεδίο διασποράς. Για ένα συγκεκριμένο ιόν το οποίο κινείται με μια συγκεκριμένη ταχύτητα  $K_{(E)}$ , ο κατάλληλος συντονισμός του  $E_C$  μπορεί να οδηγήσει στην ανίχνευση αυτού του ιόντος. Ιόντα με διαφορετική ταχύτητα  $K_{(E)}$



καταλήγουν να χαθούν στο φίλτρο ηλεκτροδίων, εξαιτίας της συγκεκριμένης τάσης αντιστάθμισης. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με τη χρήση μιας σωστά συντονισμένης έντασης  $E_C$  του πεδίου μπορεί να γίνει η ανίχνευση ενός και μόνο είδους ιόντος, ενώ απαιτείται να λάβει χώρα μια σάρωση της έντασης  $E_C$  του πεδίου προκειμένου να παραχθεί το φάσμα του συνόλου των ιόντων.

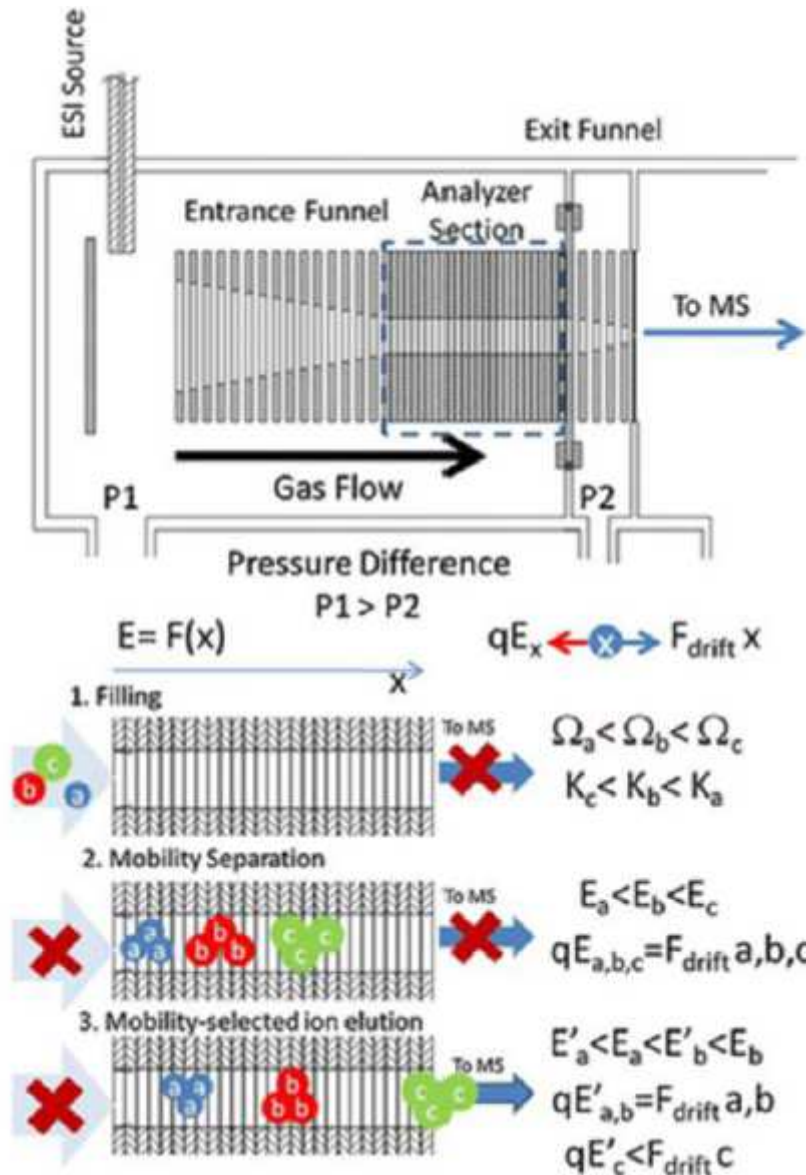
Υπάρχουν δύο βασικές διαμορφώσεις ηλεκτροδίων για τον φασματογράφο FAIMS: ο επίπεδος φασματογράφος FAIMS (p-FAIMS) και ο κυλινδρικός φασματογράφος FAILMS (c-FAIMS). Ο επίπεδος φασματογράφος FAIMS είναι γνωστός και ως Διαφορικός Φασματογράφος Κινητικότητας (Differential Mobility Spectrometer). Αποτελείται από δύο παράλληλα ηλεκτρόδια, τα οποία διαχωρίζονται από ένα «αναλυτικό» κενό. Μέσα από το κενό αυτό τα ιόντα μεταφέρονται με τη βοήθεια μιας ροής αερίου και η κίνησή τους κατά τη μεταφορά τους γίνεται κάθετα στο ηλεκτρικό πεδίο (Σχήμα 8). Τα «αναλυτικά» κενά ποικίλουν από 35 $\mu\text{m}$  έως 2mm και το μήκος των ηλεκτροδίων ποικίλει από 300 $\mu\text{m}$  έως 50mm. Για τον κυλινδρικό φασματογράφο FAIMS (c-FAIMS), οι διαστάσεις του κενού κυμαίνονται από 1.5 έως 3mm. Η βασική διαφορά του φασματογράφου FAIMS από τους φασματογράφους DTIMS και TWIMS είναι ότι ο διαχωρισμός που λαμβάνει χώρα στον φασματογράφο FAIMS δεν βασίζεται στο χρόνο (χρονικός διαχωρισμός), αλλά πρόκειται για έναν φασματογράφο χωρικής και ηλεκτρικής κινητικότητας. Για το λόγο αυτό, η γραφική παράσταση ενός FAIMS χρωματογράφου είναι παρόμοια με αυτή που απεικονίζεται στο Σχήμα 5, αλλά η ένταση σχεδιάζεται όχι σε σχέση με τον χρόνο, αλλά σε σχέση με την αντισταθμιστική τάση σάρωσης ή αλλιώς το αντισταθμιστικό πεδίο. Τα αποτελέσματα του FAIMS οργάνου μπορούν να παρουσιαστούν και με τη γραφική παράσταση διασποράς. Σε αυτή τη γραφική παράσταση σχεδιάζονται τόσο η αντισταθμιστική, χαμηλή τάση DC όσο και η ασύμμετρη τάση διασποράς υψηλής συχνότητας. Στη συσκευή του FAIMS φασματογράφου τα ιόντα έχουν τη δυνατότητα να εισέρχονται στον αισθητήρα συνεχώς. Με τον τρόπο αυτό, η εξέταση του δείγματος μπορεί να γίνεται αδιάκοπα και σε πραγματικό χρόνο. Αυτό αποτελεί ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου φασματογράφου. Ένα εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα των FAIMS είναι ότι μπορούν να ανιχνεύουν τόσο τα θετικά



όσο και τα αρνητικά ιόντα ταυτόχρονα, παρόλο που αυτό αυξάνει κατά πολύ το βαθμό της ηλεκτρονικής πολυπλοκότητας. Το βασικό μειονέκτημα αυτών των οργάνων είναι ότι το ποσοστό των ιόντων που τελικά ανιχνεύονται από ένα όργανο FAIMS-MS σε σχέση με εκείνα που παράγονται στο τμήμα ιονισμού είναι σχετικά χαμηλός, όταν το όργανο λειτουργεί υπό συνθήκες όπου η τάση αντιστάθμισης (compensation voltage, CV) αυξάνεται. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση της ευαισθησίας της συσκευής.

- Trapped IMS (TIMS)

Ο Trapped IMS (TIMS) φασματογράφος αποτελεί τον τέταρτο τύπο φασματογράφου IMS. Ο τρόπος λειτουργίας του βασίζεται στη χρήση ενός μη ομοιόμορφου ηλεκτρικού πεδίου, το οποίο βοηθάει στη συγκράτηση των στάσιμων ιόντων έναντι ενός κινούμενου αερίου. Με τον τρόπο αυτό, το ηλεκτρικό πεδίο αντισταθμίζει τη δύναμη εκτροπής. Επίσης, ο διαχωρισμός των ομάδων ιόντων πραγματοποιείται με βάση το λόγο του μεγέθους προς τη φόρτιση. Τρεις βασικές περιοχές αποτελούν το τμήμα διοχέτευσης ενός φασματογράφου TIMS (Σχήμα 9): την είσοδο της διοχέτευσης, την περιοχή του αναλυτή κινητικότητας και την έξοδο της διοχέτευσης.



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση συσκευής και λειτουργίας του TIMS [5].

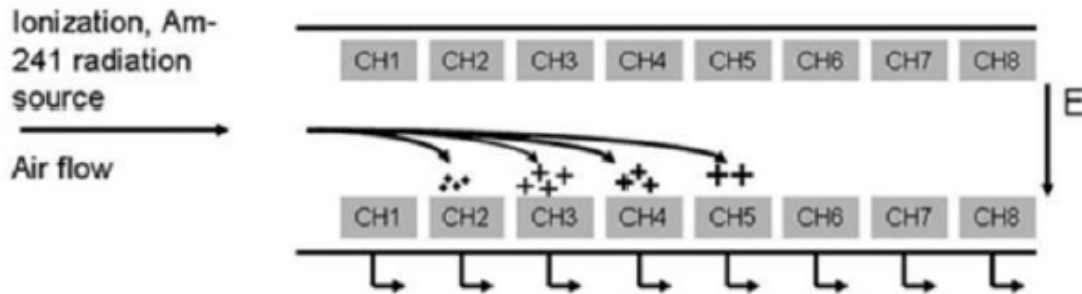
Μια διοχέτευση ιόντων χρησιμοποιείται για την έγχυση και την εστίαση των ιόντων προς την περιοχή διαχωρισμού κινητικότητας (Βήμα 1, πλήρωση). Τα ιόντα περιορίζονται ακτινικά, καθώς συμβαίνουν δύο πράγματα ταυτόχρονα: στην περιοχή διαχωρισμού κινητικότητας εφαρμόζεται ένα χαμηλό, ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο αυξάνει κατά μήκος της αξονικής τομής, ενώ στα ηλεκτρόδια εφαρμόζεται ένα πεδίο ραδιοσυχνότητας RF. Ο λόγος του μεγέθους προς τη φόρτιση είναι η συνάρτηση σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των ομάδων των ιόντων.

Επιπλέον, οι περιοχές όπου η δύναμη εκτροπής αντισταθμίζεται από τη δύναμη του ηλεκτρικού πεδίου είναι οι περιοχές όπου οι ομάδες ιόντων παγιδεύονται (Βήμα 2, διαχωρισμός). Χαρακτηριστικό του τρόπου λειτουργίας αυτής της συσκευής είναι ότι ιόντα με διαφορετικούς λόγους μεγέθους προς φόρτιση παγιδεύονται σε διαφορετικές περιοχές του άξονα, αφού η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνει κατά μήκος του άξονα της συσκευής. Στην περίπτωση που το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται, οι ομάδες ιόντων θα εκλούονται από υψηλούς σε χαμηλούς λόγους μεγέθους προς φόρτιση (Βήμα 3, έκλυση). Μια συσκευή TIMS συνδυάζεται πολύ εύκολα με έναν αναλυτή MS. Η ταχύτητα αερίου εκτροπής, ο περιορισμός των ιόντων και η ταχύτητα ανόδου του ηλεκτρικού πεδίου αποτελούν τις βασικές παραμέτρους για τον καθορισμό της κίνησης των ιόντων σε έναν αναλυτή TIMS.

▪ Open Loop IMS (OLIMS)

Ο IMS Ανοιχτού Βρόχου αποτελεί τον πέμπτο τύπο φασματογράφου. Επίσης αναφέρεται και ως IMS Αναρρόφησης (Aspiration IMS). Όπως συμβαίνει και στον φασματογράφο FAIMS, έτσι και στην περίπτωση του φασματογράφου OLIMS η διαφορετική ταχύτητα των ιόντων λόγω εφαρμογής ηλεκτρικού πεδίου είναι το κριτήριο διαχωρισμού τους. Μια διαφορετική ονομασία της τεχνολογίας αυτής είναι και OLIMS εστίασης ιόντων, ενώ η συσκευή ονομάζεται και Συμπυκνωτής Αναρρόφησης IMS με εστίαση ιόντων. Αρχικά, οι πρώτες συσκευές αυτής της κατηγορίας αποτελούνταν από τρία κυλινδρικά ηλεκτρόδια, ένα κεντρικό και δύο εξωτερικά. Οι σύγχρονες εκδόσεις του φασματογράφου αναρρόφησης ιόντων έχουν επίπεδη μορφή.

Στην συσκευή OLIMS (Σχήμα 10), τα υπό ανάλυση ιόντα μεταφέρονται με στηροή του αερίου δείγματος διαμέσου ενός εγκάρσιου ηλεκτρικού πεδίου. Το εγκάρσιο ηλεκτρικό πεδίο σχηματίζεται από οχτώ ζευγάρια ηλεκτροδίων. Η είσοδος των ιόντων στην περιοχή του αναλυτή πραγματοποιείται είτε γεμίζοντας ολόκληρη τη διατομή της ροής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10, είτε μέσω ενός περιορισμένου ανοίγματος της εισόδου, δημιουργώντας ουσιαστικά ένα τμήμα (κλάσμα) της διατομής ροής του σωλήνα εκτροπής.



Σχήμα 10: Λειτουργία του διαχωρισμού ιόντων στον IMS Ανοιχτού Βρόχου [5].

Μεμονωμένες δέσμες ιόντων δημιουργούνται από τα ιόντα με διαφορετικές κινητικότητες κατά τη φάση διαχωρισμού τους. Τα πρώτα ιόντα που εισέρχονται στο τμήμα ανίχνευσης έχουν την υψηλότερη κινητικότητα. Αυτά θα έρθουν σε σύγκρουση με τις πρώτες πλάκες ανιχνευτών. Τα ιόντα που παρουσιάζουν χαμηλότερη κινητικότητα, προωθούνται πιο αργά με τη βοήθεια της ροής του αέρα και του ηλεκτρικού πεδίου. Τα ιόντα αυτά διασχίζουν μεγαλύτερη απόσταση στο εσωτερικό του τμήματος ανίχνευσης μεταξύ των πλακών του ανιχνευτή, έως ότου τελικά συγκρουστούν με αυτές. Η συχνότητα εναλλαγής της πολικότητας του ηλεκτρικού πεδίου είναι πολύ μικρή, της τάξης του ενός δευτερολέπτου, με αποτέλεσμα ένας κύκλος εναλλαγής από θετική σε αρνητική πολικότητα να διαρκεί ελάχιστα. Με τον τρόπο αυτόν επιτυγχάνεται η ανίχνευση θετικών και αρνητικών ιόντων σχεδόν ταυτόχρονα και ακολούθως δημιουργείται μια κατανομή των συστάδων ιόντων που συγκρούονται με τα ηλεκτρόδια. Η κατανομή των συστάδων ιόντων (θετικών και αρνητικών) εκφράζεται με ένα σχέδιο ρευμάτων (pA), τα οποία μετρούνται στα οχτώ θετικά και στα οχτώ αρνητικά ηλεκτρόδια (κανάλια). Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τόσο το φαινόμενο της χωρικής φόρτισης όσο και το φαινόμενο της διάχυσης επιδρούν αρνητικά στην χωρική διαίρεση ιόντων. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με την αύξηση του ρυθμού των ροών αερίων, ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της συγκέντρωσης ιόντων και ο χρόνος εκτροπής.

Τα OLIMS όργανα αποτελούν μια ενδιαφέρουσα τεχνική που βρίσκει εφαρμογή κυρίως στους στρατιωτικούς και βιομηχανικούς τομείς. Είναι όργανα φορητά, γρήγορης απόκρισης, χαμηλής κατανάλωσης και ευαίσθητα. Μέχρι σήμερα

έχουν χρησιμοποιηθεί στην ανίχνευση και ταυτοποίηση χημικών πολεμικών μέσων και τοξικών βιομηχανικών χημικών. Επίσης, έχει παρουσιάσει πολύ καλά αποτελέσματα στην ανίχνευση παρασιτοκτόνων, μικροβιακών πτητικών οργανικών ενώσεων και πτητικών οργανικών ειδών που εκκρίνονται από τον ανθρώπινο οργανισμό.

▪ Differential Mobility Analyzers (DMA)

Ένας ακόμα τύπος φασματογράφου κινητικότητας ιόντων, ο έκτος κατά σειρά, είναι ο Ανιχνευτής Διαφορικής Κινητικότητας (Differential Mobility Analyzer, DMA). Ο διαχωρισμός των ιόντων γίνεται με κριτήριο τις διαφορετικές ηλεκτρικές κινητικότητές τους και ο διαχωρισμός τους λαμβάνει χώρα στην περιοχή του διαστήματος, όπως ακριβώς συμβαίνει και στον φασματογράφο OLIMS. Και τα δύο αυτά όργανα (OLIMS & DMA) χαρακτηρίζονται από παρόμοια διαμόρφωση, έχουν όμως και μεγάλες διαφορές. Η πρώτη, βασική τους διαφορά είναι ότι ενώ στον OLIMS τα ιόντα με διαφορετικές κινητικότητες χρειάζεται να διασχίσουν διαφορετικές αποστάσεις μέχρι τελικά να διαχωριστούν σε διαφορετικές πλάκες ανίχνευσης, στον DMA φασματογράφο όλα τα ιόντα πρέπει να διασχίσουν την ίδια απόσταση μέχρι να προσεγγίσουν τον ανιχνευτή. Η μεταφορά των ιόντων στον DMA πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός ρεύματος αερίου, το οποίο αρχικά είναι καθαρό. Η μετακίνηση των ιόντων γίνεται μεταξύ δύο ηλεκτροδίων με διαφορετικό δυναμικό το καθένα. Το καθαρό ρεύμα αερίου που μεταφέρει τα ιόντα ρέει παράλληλα με αυτά τα ηλεκτρόδια. Η χρήση υψηλών ρυθμών ροής του φέροντος αερίου συμβάλλει στην ταξινόμηση της DMA συσκευής. Με τον τρόπο αυτόν, ουσιαστικά αξιοποιείται ο χώρος αντί του χρόνου μετατόπισης και έτσι η DMA συσκευή διαθέτει το πλεονέκτημα να επιτυγχάνει υψηλότερες τιμές δυνάμεων και ποσοστά ευαισθησίας.

Υπάρχουν δύο τύπου συσκευών DMA: οι κυλινδρικοί DMAs, οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την ανάλυση αερολυμάτων μικρομετρίας και οι επίπεδοι DMAs, οι οποίοι επιτρέπουν τη σύζευξη με σχεδόν οποιοδήποτε σύστημα φασματομέτρου μάζας ιονισμού ατμοσφαιρικής πίεσης (Atmospheric Pressure Ionization-Mass Spectrometer System, API-MS). Στο Σχήμα 11 φαίνεται ένας επίπεδος DMA.

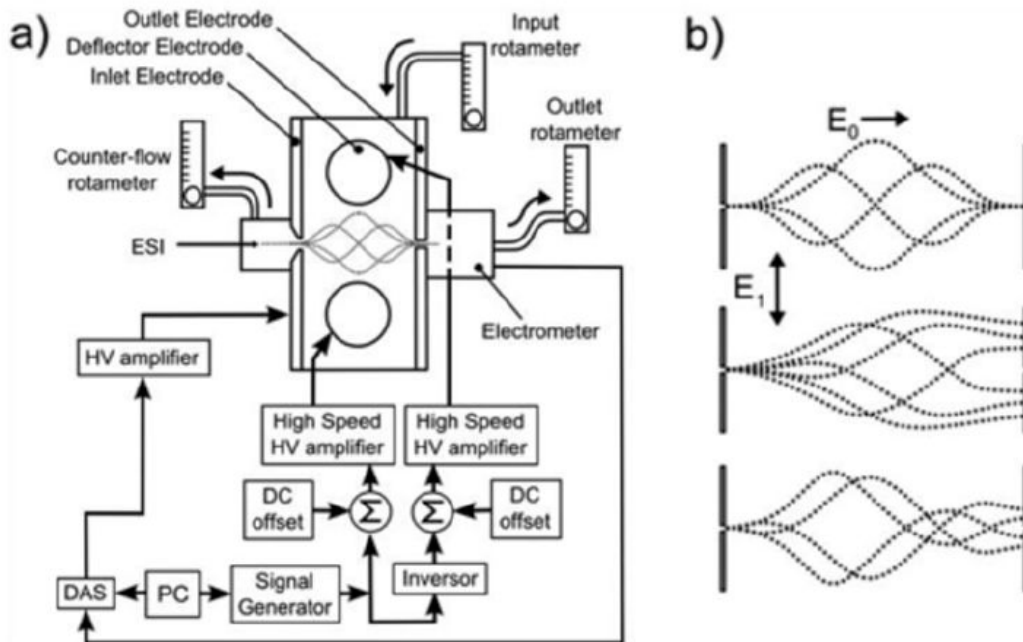


εξωτερικό ηλεκτρόδιο, μόνο τα ιόντα με μια δεδομένη ηλεκτρική κινητικότητα. Στη συνέχεια, τα εξερχόμενα ιόντα συλλέγονται από μια πλάκα ιόντων που είναι συνδεδεμένη με ένα ηλεκτρόμετρο. Τα μικρότερα σε μέγεθος ιόντα έχουν υψηλότερη κινητικότητα και αποκλίνουν λιγότερο από το αέριο σε σχέση με τα μεγαλύτερα σε μέγεθος ιόντα, που έχουν χαμηλότερη κινητικότητα.

- Transversal Modulation IMS (TMIMS)

Στον έβδομο τύπο IMS, που είναι ο Φασματογράφος Κινητικότητας Ιόντων Εγκάρσιας Διαμόρφωσης (Transversal Modulation IMS, TMIMS), ο διαχωρισμός των ιόντων γίνεται σύμφωνα με την κινητικότητά τους και επιτυγχάνεται με τη χρήση μόνο ηλεκτρικών πεδίων. Πλησιάζει πολύ τον τρόπο λειτουργίας του DMA φασματογράφου και πιθανών να μπορούσε να θεωρηθεί και υπό-κατηγορία του. Χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρικά πεδία: το πρώτο ηλεκτρικό πεδίο εφαρμόζεται κατά μήκος του άξονα και προκαλεί την εμπρόσθια κίνηση των ιόντων, ενώ το δεύτερο ταλαντευόμενο εγκάρσιο ηλεκτρικό πεδίο προκαλεί εκτροπή των τροχιών των ιόντων, με σκοπό να παραχθούν συνεχόμενα ιόντα επιλεγμένης κινητικότητας (Σχήμα 12).





Σχήμα 12: Σχηματική απεικόνιση του TMIMS φασματογράφου και γραφική απεικόνιση διαφορετικών τροχιών ιόντων μέσα σε αυτόν [5].

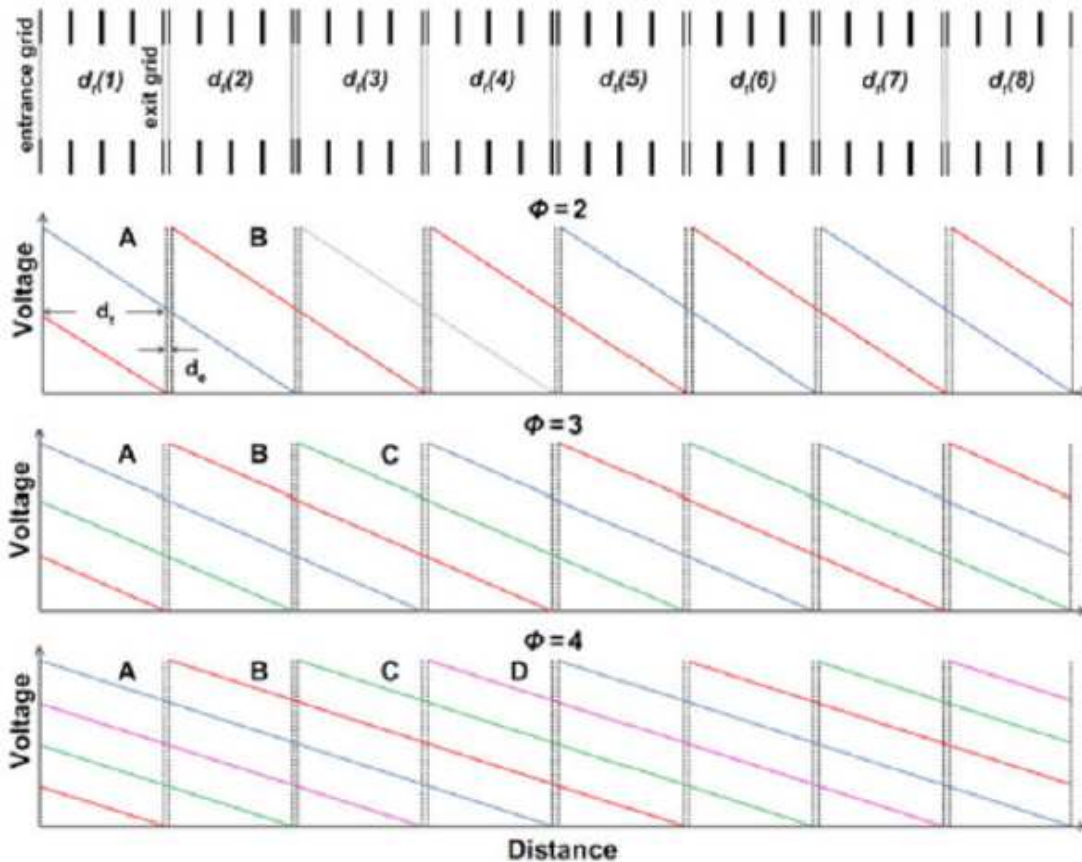
Με αυτό τον τρόπο, δημιουργούνται δύο είδη ιόντων: τα εκτρεπόμενα ιόντα, τα οποία δεν μεταφέρονται προς την έξοδο του αναλυτή και τα επιλεγμένα ιόντα, τα οποία οδηγούνται εστιαζόμενα διαμέσου της εξόδου του αναλυτή (Σχήμα 12α). Το εύρος της κινητικότητας που παρουσιάζουν τα επιλεγμένα ιόντα στενό, περιορισμένο. Στην περίπτωση που η περίοδος του ταλαντευόμενου ηλεκτρικού πεδίου ισοδυναμεί με τον χρόνο παραμονής των ιόντων, αυτά τελικά φτάνουν στην σχισμή εξόδου του TMIMS οργάνου. Δεδομένου ότι η περίοδος του ταλαντευόμενου ηλεκτρικού πεδίου είναι αντιστρόφως ανάλογη με την κινητικότητα, ο TMIMS φασματογράφος παρέχει μια συνεχόμενη ροή ιόντων με κινητικότητα  $nK_0$  ( $n = ακαίρεος$ ). Το Σχήμα 12b απεικονίζει σχηματικά τις διαφορετικές τροχιές των ιόντων σε έναν TMIMS. Οι τροχιές αυτές είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού δύο παράλληλων ηλεκτροδίων, που είναι υπεύθυνα για το σταθερό ηλεκτρικό πεδίο κατά μήκος του άξονα, με ευθυγραμμισμένες σχισμές εισόδου και εξόδου και δύο ηλεκτροδίων εκτροπής, που δημιουργούν το ηλεκτρικό πεδίο εκτροπής. Οι τροχιές που απεικονίζονται προέρχονται από τρεις

διαφορετικούς τύπους ιόντων: (i) τα επιλεγμένα ιόντα, των οποίων οι τροχιές συνενώνονται στην έξοδο, (ii) τα ιόντα με υψηλότερη κινητικότητα σε σχέση με αυτή των επιλεγμένων ιόντων και (iii) τα ιόντα με χαμηλότερη κινητικότητα σε σχέση με αυτή των επιλεγμένων ιόντων. Εργαστηριακά έχει γίνει η συσχέτιση δύο σταδίων TMIMS με έναν MS ( $TMIMS^2 - MS$ ). Ο πρώτος TMIMS λειτουργεί μόνο για την διαφανή μετάδοση όλων των ιόντων. Ακολούθως, στον δεύτερο TMIMS, εισάγεται ένα προσθετικό, προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση της 2-προπανόλης σε ένα σύνολο πεπτιδίων.

Ένας φασματογράφος TMIMS είναι σχεδόν παρόμοιος με έναν DMA φασματογράφο. Η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός ότι δεν απαιτείται η ύπαρξη ενός ρευστού υψηλής ταχύτητας. Με αυτό τον τρόπο, αποφεύγονται οι περιορισμοί του DMA που σχετίζονται με την αστάθεια ροής, την ταραχώδη μετάβαση και την συμπίεστικότητα. Άλλη μια βασική διαφορά μεταξύ των δύο οργάνων είναι ότι ο TMIMS φασματογράφος λειτουργεί με τη βοήθεια ενός ταλαντευόμενου ηλεκτρικού πεδίου, ενώ ο DMA φασματογράφος λειτουργεί με ένα υψηλό, σταθερό ηλεκτρικό πεδίο.

#### ▪ Overtone Mobility Spectrometers (OMS)

Ο όγδοος και τελευταίος τύπος φασματογράφου κινητικότητας ιόντων είναι ο Φασματογράφος Υπερευαίσθητης Κινητικότητας (Overtone Mobility Spectrometer, OMS). Η μεταφορά των ιόντων μέσα από πολλαπλές, πανομοιότυπες περιοχές εκτροπής αποτελεί την αρχή της λειτουργίας του. Κάθε μία από αυτές τις περιοχές εκτροπής διαθέτει αυτόνομη περιοχή εξάλειψης και αυτόνομη περιοχή μεταφοράς, όπως απεικονίζεται στο Διάγραμμα 1.



Διάγραμμα 1: Σχηματικό διάγραμμα περιοχών εκτροπής μιας OMS συσκευής [5].

Τα ιόντα που παράγονται από μια πηγή συνεχούς τάσης, όπως αυτά που παράγονται με τον ιονισμό ηλεκτρο-ψεκασμού, εισέρχονται σε έναν κυλινδρικό σωλήνα εκτροπής. Το χαρακτηριστικό αυτού του σωλήνα είναι ότι αποτελείται από κατακερματισμένες περιοχές εκτροπής. Επιλέγεται μια συγκεκριμένη συχνότητα, στην οποία διαμορφώνεται η λειτουργία όλων των ηλεκτρικών πεδίων εκτροπής. Η συχνότητα αυτή επιτρέπει τη μεταβίβαση, διαμέσου όλων των περιοχών εκτροπής, μόνο εκείνων των ιόντων που οι κινητικότητές τους είναι σωστά συντονισμένες στις εκάστοτε πειραματικές συνθήκες. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται το φιλτράρισμα όλων των ιόντων από τον φασματογράφο, εξαιρουμένων εκείνων που η κινητικότητά τους βρίσκεται στο στενό, επιλεγμένο εύρος. Κατά την εκτέλεση πειραματικών μετρήσεων με αυτού του είδους το όργανο, παρατηρήθηκε ότι τα ιόντα μπορούν να εξέλθουν από τον ανιχνευτή στις αρμονικές συχνότητες. Επιπλέον, η δυνατότητα

ανάλυσης σε περιοχές υψηλότερων αρμονικών είναι μεγαλύτερη από αυτή που παρατηρείται στη ζώνη της θεμελιώδους συχνότητας.

Ο συγκεκριμένος τύπος φασματογράφου έχει ελάχιστη ομοιότητα με τον φασματογράφο TWIMS. Και τα δύο όργανα απαιτούν την ύπαρξη μιας παλμικής ακολουθίας εφαρμοζόμενων δυναμικών, όπου η κάθε μία επαναλαμβάνεται κατά μήκος του σωλήνα εκτροπής. Ωστόσο, στον φασματογράφο OMS προηγείται η εξάλειψη συγκεκριμένων ιόντων, αντί αυτά να φτάνουν στις περιοχές εξάλειψης και να διαχωρίζονται εκεί. Αυτό το χαρακτηριστικό λειτουργίας της OMS συσκευής αλλάζει τον γενικό μηχανισμό διαχωρισμού στην εξίσωση της ανάλυσης.

Ο αριθμός γεωμετρικών διαμορφώσεων της συσκευής OMS σε συνδυασμό με εκείνες τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί η ανάλυση ενός φασματογράφου DTIMS ( $R_{DTIMS}$ ), αντιπροσωπεύουν την εξίσωση που περιγράφει την δυνατότητα ανάλυσης ενός OMS ( $R_{OMS}$ ) οργάνου. Ωστόσο, οι παραλλαγές των παραμέτρων που προσδιορίζουν την ανάλυση  $R_{DTIMS}$  (ηλεκτρικό πεδίο E, μήκος του σωλήνα εκτροπής L και θερμοκρασία T) του DTIMS οργάνου έχει αποδειχτεί ότι ελάχιστα επηρεάζουν την ανάλυση  $R_{OMS}$  του OMS οργάνου. Σημαντικός παράγοντας επίδρασης στην ανάλυση  $R_{OMS}$  έχει αποδειχτεί ότι είναι ο αριθμός των φάσεων για το σύστημα (δηλαδή, ο αριθμός των μοναδικών ρυθμίσεων εφαρμογής του πεδίου εκτροπής, ο αριθμός των περιοχών εκτροπής σε έναν πλήρη κύκλο μετάδοσης/εξάλειψης ιόντων), ο συνολικός αριθμός των περιοχών εκτροπής ιόντων και οι ρυθμίσεις της συχνότητας του πεδίου εκτροπής (αριθμός αρμονικών). Υπάρχει μία σχέση μοναδικής αναλογικότητας μεταξύ της ανάλυσης  $R_{OMS}$  και του αριθμού των περιοχών εκτροπής (L), όπως επίσης και της συχνότητας που υποδηλώνει την βελτίωση της απόδοσης και της ικανότητας συλλογής της συσκευής (σε σχέση με την επίλυση) για αναλογικές αλλαγές, συγκρινόμενες με τις τεχνικές του DTIMS.

Τα κύρια χαρακτηριστικά λειτουργίας που αφορούν στους έξι πιο ολοκληρωμένους τύπους IMS φασματογράφους, απεικονίζονται συνοπτικά στον Πίνακα 1 που ακολουθεί. Δεδομένου ότι οι φασματογράφοι Υπερευαίσθητης Κινητικότητας (OMS) και Κινητικότητας Ιόντων Εγκάρσιας Διαμόρφωσης (TMIMS) αποτελούν τις πιο σύγχρονες μεθόδους ανίχνευσης και δεν υπάρχουν αρκετά

αποτελέσματα για την απόδοσή τους, δεν περιλαμβάνονται τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους στον Πίνακα 1.

	Drift Time IMS	Travelling-Wave IMS	High-Field Asymmetric Waveform IMS	Trapped IMS	Open Loop IMS	Differential Mobility Analyzers
Acronym	DTIMS	TWIMS	FAIMS	TIMS	OLIMS	DMA
Αέριο εκτροπής /μεταφοράς	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι	Ναι (απαιτείται πεδίο υψηλής ταχύτητας ρευστού)
Προσμίξεις	Κοινές (π.χ. ακετόνη, αμμωνία, 2-βουτανόλη, 2χλωρο-μεθάνιο)	Όχι	Όχι κοινές (π.χ. νερό, 2χλωρο-μεθάνιο)	Κοινές	Όχι κοινές (μη εμπορικής χρήσης)	Μη κοινές
Πίεση	Περ/λοντος (~1 bar)	0,025 – 3 mbar	Περ/λοντος (~1 bar)	2,6 – 3,4 mbar	Περ/λοντος (~1 bar)	80 mbar – 1 bar
Θερμοκρασία	Περ/λοντος (~ 300 K)	~360 K	Περ/λοντος (~ 300 K)	Περ/λοντος (~ 300 K)	Περ/λοντος (~ 300 K)	Περ/λοντος (~ 300 K)
Ηλεκτρικό πεδίο E	Σταθερής, χαμηλής έντασης	Μη σταθερής χαμηλής έντασης	Εναλ/μενης, ασύμμετρης έντασης	RF χαμηλής έντασης	Σταθερής, χαμηλής έντασης	Σταθερής, υψηλής έντασης
Επίδραση από υγρασία	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι	Ναι
Τεχνικές Σύζευξης	MCC-IMS, IMS-MS, GC-IMS-MS, LC-IMS-MS	TWIMS-MS	GC-FAIMS, FAIMS-MS, ESI-FAIMS, Py-FAIMS	TIMS-MS	OLIMS-MS	DMA-MS

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά Λειτουργίας των έξι πιο κοινών τύπων IMS [5].

Πολλές από τις μελέτες που έχουν διεξαχθεί με τη χρήση συσκευών φασματογράφου κινητικότητας ιόντων έχουν βασισθεί σε παρόμοιο εξοπλισμό τόσο για την προετοιμασία του δείγματος όσο και για τον ιονισμό και τις μετρήσεις ποσότητας των ιόντων. Παρόλα αυτά, περιορισμένος αριθμός μελετών που αφορούν στην ανίχνευση συγκεκριμένων χημικών ενώσεων συμπεριλαμβάνουν και τη σύγκριση της αποτελεσματικότητας όλων των μεθόδων λειτουργίας διαθέσιμων συσκευών. Παρόλο που οι εφαρμογές ποικίλουν, η διαδικασία ανίχνευσης εκρηκτικών ουσιών με τη χρήση διαφόρων τεχνικών IMS είναι η επικρατέστερη.

Πιο συγκεκριμένα, η εφαρμογή της διαδικασίας μικρό-εκχύλισης σε στερεά φάση (Solid-phase micro-Extraction, SPME) σε μια συσκευή DTIMS επιτυγχάνει την

ανίχνευση της εκρηκτικής ουσίας με όριο ανίχνευσης 50 ng/mL. Επίσης, έχει διαπιστωθεί ότι η λειτουργία μιας συσκευής TWIMS σε υψηλότερη θερμοκρασία από αυτή μιας συσκευής DTIMS, οδηγεί στη δημιουργία ενός πεδίου υψηλότερης θερμικής επίδρασης, που ενδεχομένως να οδηγήσει με τη σειρά του στην αλλαγή της δομής συγκεκριμένων ιόντων. Επίσης, μεγάλο κομμάτι μελετών ασχολείται με τη σύγκριση των TWIMS και DTIMS φασματογράφων, κυρίως ως προς τη δυνατότητα διαχωρισμού διαφόρων ισομερών. Οι μελέτες αυτές κατέληξαν ότι παρά το γεγονός ότι οι δύο τεχνικές εμφανίζουν παρόμοιους παράγοντες διαχωρισμού, εντούτοις η ανάλυση της DTIMS συσκευής παραμένει υψηλότερη. Επίσης, σχετικά με τον φασματογράφο DMA έχει αποδειχθεί ότι έχει την ικανότητα να μετρήσει σωματίδια της τάξης μεγέθους nm, όχι μόνο μεμονωμένων ιόντων αλλά και συστοιχιών ιόντων. Επιπλέον, σχετική μελέτη έχει αποδείξει το πλεονέκτημα της χρήσης μιας DMA συσκευής παράλληλα με μια συσκευή DTIMS/MS, προκειμένου να εξεταστεί η διαδικασία της πυρήνωσης. Πρόκειται για μια διαδικασία, κατά την οποία σχηματίζονται νάνο - σωματίδια από συστάδες ιόντων μέσα σε λίγα μόνο δευτερόλεπτα. Ο συνδυασμός DMA και DTIMS/MS έχει το πλεονέκτημα ότι με τη χρήση της DMA συσκευής υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης (monitoring) του σχηματισμού νάνο - σωματιδίων της τάξης μεγέθους  $\mu\text{m}$  μέσω της διαδικασίας της πυρήνωσης για λίγο μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από ότι αν χρησιμοποιηθεί μόνο η συσκευή DTIMS/MS. Τέλος, σχετικές μελέτες έχουν αναδείξει την ικανότητα ανίχνευσης της ένωσης TNT από μια συγκεκριμένη FAIMS συσκευή σε ποσότητες της τάξης των 80 ppt, το οποίο είναι αρκετά ικανοποιητικό. Επιπρόσθετα, η λειτουργία μιας κυλινδρικής συσκευής FAIMS έχει αποδειχθεί ότι είναι αποτελεσματικότερη όταν αυτή συνδυαστεί με έναν φασματογράφο μάζας (MS), σε σχέση με μία επίπεδη συσκευή FAIMS. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η κυλινδρική έκδοση της συσκευής παρουσιάζει υψηλότερη αποτελεσματικότητα στη μεταφορά ιόντων, σε αντίθεση με την επίπεδη έκδοσή της, όπου πολλά ιόντα χάνονται και δεν διέρχονται μέσω του διαφράγματος του MS [5].



## 2. Διάταξη Ανίχνευσης Εκρηκτικής Ύλης

### 2.1. Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες Εκρηκτικών Υλών

Οι φυσικές και χημικές ιδιότητες των συστατικών των εκρηκτικών υλών αποτελούν τα βασικά στοιχεία για τη διαδικασία ανίχνευσης ιχνών εκρηκτικής ύλης. Τα εκρηκτικά είναι στην ουσία κάποιες χημικές ενώσεις, οι οποίες υπό ορισμένες συνθήκες υφίστανται αποσύνθεση. Η αποσύνθεση των εκρηκτικών ουσιών οδηγεί στην απότομη απελευθέρωση θερμότητας και πίεσης. Ο ρυθμός καύσης των εκρηκτικών ουσιών αποτελεί κριτήριο για την ταξινόμησή τους σε υψηλής ή χαμηλής καύσης εκρηκτικά. Ο ρυθμός καύσης των εκρηκτικών χαμηλής καύσης ανέρχεται σε ρυθμούς της τάξης των cm/sec, ενώ αντίστοιχα οι ταχύτητες με τις οποίες εκρήγνυνται τα εκρηκτικά υψηλής καύσης εκρήγνυνται μπορούν να φτάσουν σε ρυθμούς της τάξης των km/sec. Τα εκρηκτικά υψηλής καύσης διαχωρίζονται επιπλέον σε πρωτογενή και δευτερογενή εκρηκτικά, σύμφωνα με το βαθμό σταθερότητας που παρουσιάζουν. Τα πρωτογενή εκρηκτικά, όπως το αζίδιο του μόλυβδου ( $HN_3$ ), εμφανίζουν μια εξαιρετική ευαισθησία σε εξωτερικά ερεθίσματα, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν έκρηξη. Τέτοια εξωτερικά ερεθίσματα είναι η τριβή και η θερμική και ηλεκτρική σπίθα. Αντιθέτως, τα δευτερογενή εκρηκτικά, όπως το TNT και το RDX, παρουσιάζουν μεγάλη σταθερότητα, ενώ για να προκαλέσουν έκρηξη είναι απαραίτητη η παρουσία πρωτογενούς εκρηκτικού.

Τα πλέον κοινώς χρησιμοποιούμενα εκρηκτικά είναι χημικές ενώσεις, οι οποίες ταξινομούνται σε έξι γενικότερες κατηγορίες:

- Αλειφατικές νιτρικές ενώσεις, π.χ. το νίτρο-μεθάνιο.
- Νίτρο-αρωματικές ενώσεις, π.χ. το TNT.
- Νιτραμίνες ή Νιτροζαμίνες, π.χ. το HMX και το RDX.
- Νιτρικούς Εστέρες, π.χ. PETN, EDGN και το NQ.
- Όξινα άλατα, π.χ. νιτρικό αμμώνιο π.χ. νιτρικό αμμώνιο ( $NH_4$ )( $NO_3$ ).
- Οργανικά υπεροξειδία, π.χ. TATP και HMTD.

Στα εκρηκτικά της τελευταίας κατηγορίας δείχνουν ιδιαίτερη προτίμηση τα τελευταία χρόνια οι τρομοκράτες. Τα εκρηκτικά αυτής της κατηγορίας είναι γνωστά



και ως «σπιτικά» εκρηκτικά (Home-made Explosives, HMEs), δεδομένου ότι η σύνθεσή τους είναι απλή και εύκολα μπορούν να κατασκευαστούν με τη χρήση υλικών ευρέως διατεθειμένων στο εμπόριο. Το κύριο χαρακτηριστικό αυτών των εκρηκτικών είναι η πολύ υψηλή πίεση ατμών, γεγονός που οφείλεται στην παρουσία πτητικών, οργανικών, χημικών ενώσεων (Volatile Organic Compounds, VCOs) που περιλαμβάνουν, όπως η ακετόνη. Επιπλέον, παρουσιάζουν σημαντική αστάθεια και για το λόγο αυτό απαιτείται πολύ προσεκτικός χειρισμός και ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να αποφευχθεί η πυροδότησή τους.

Οι πιέσεις ατμών και το βάρος των μορίων των πιο διαδεδομένων εκρηκτικών υλών εμφανίζονται στον Πίνακα 2 που ακολουθεί:

Εκρηκτικές Ύλες	Βάρος Μορίων (gr/mol)	Πίεση Ατμών στους 20°C (Torr)
Δινιτρική Αιθυλενογλυκόλη (EGDN)	152.1	$5.2 \times 10^{-2}$
2,4,6-τρινιτροτολουόλιο (TNT)	227.1	$4.8 \times 10^{-6}$
Τετρανιτρικός Πενταερυθρίτης (PETN)	316.1	$6.2 \times 10^{-8}$
Πικρικό οξύ, 2,4,6-τρινιτροφαινόλη	229.1	$3.1 \times 10^{-8}$
Κυκλονίτης (RDX)	222.3	$8.3 \times 10^{-10}$
Τετρόλιο (Tetryl)	287.1	$3.7 \times 10^{-10}$

Πίνακας 2: Πιέσεις ατμών και βάρη μορίων εκρηκτικών υλών [6].

Τα πιο κοινά και ευρέως χρησιμοποιούμενα εκρηκτικά παρουσιάζουν πολύ χαμηλή πίεση σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Εξαιτίας αυτής της εξαιρετικά χαμηλής πίεσης ατμών, τα μόρια αυτών των ενώσεων παρουσιάζουν κολλώδη συμπεριφορά και έχουν την τάση να προσροφώνται σε επιφάνειες πολύ εύκολα. Ωστόσο, η πολύ χαμηλή πίεση ατμών αυτών των ενώσεων μπορεί να αυξηθεί ραγδαία με την ταυτόχρονη, ραγδαία αύξηση της θερμοκρασίας. Και αυτό αποτελεί ένα ακόμα χαρακτηριστικό των εκρηκτικών, χημικών ενώσεων. Το αποτέλεσμα της ραγδαίας αύξησης της

θερμοκρασίας είναι να δημιουργούνται ατμοί, οι οποίοι συμπυκνώνονται και προσροφώνται πολύ γρήγορα από πιο κρύες και δροσερές επιφάνειες. Το ποσοστό προσρόφησης είναι ακόμα μεγαλύτερο από επιφάνειες που εμφανίζουν υψηλή επιφανειακή ενέργεια, όπως επιφάνειες μετάλλων και οξειδίων μετάλλων σε σχέση με επιφάνειες χαμηλής ενέργειας, όπως τα πολυμερή και τα πλαστικά. Επίσης, προκαλείται συμπύκνωση των μορίων των εκρηκτικών ενώσεων σε θερμοκρασία δωματίου, εξαιτίας αυτής της κολλώδους ιδιότητά τους. Προκειμένου λοιπόν να εξαχθεί ένα ασφαλές αποτέλεσμα κατά τη διαδικασία ανίχνευσης των μορίων των εκρηκτικών ενώσεων και δεδομένου του πολύ μικρού αριθμού τους, απαιτείται ένας πιο εξειδικευμένος τρόπος δειγματοληψίας τους και μια ιδιαίτερη προεργασία του δείγματος [6].

## 2.2 Δειγματοληψία και προ-συγκέντρωση (pre-concentration)

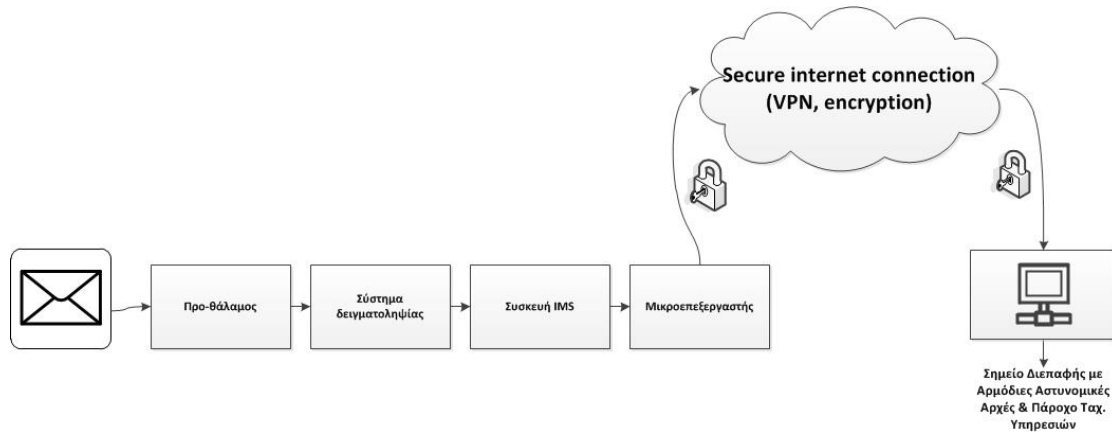
Για τη διαδικασία της δειγματοληψίας, δηλαδή της διαδικασίας της συλλογής επαρκούς ποσότητας και ποιότητας δείγματος, απαιτείται ουσιαστικά μια ολοκληρωμένη διάταξη. Η διάταξη αυτή αποτελεί ουσιαστικά το πρώτο κομμάτι ενός ολοκληρωμένου συστήματος ανίχνευσης. Η διαδικασία της δειγματοληψίας αποτελεί ίσως και το πιο δύσκολο και απαιτητικό μέρος της ανίχνευσης και ταυτοποίησης εκρηκτικών υλών, δεδομένων των ιδιαιτεροτήτων που εμφανίζουν τα μόρια αυτών των ενώσεων. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, τα περισσότερα και ευρέως χρησιμοποιούμενα εκρηκτικά χαρακτηρίζονται από χαμηλή πίεση των ατμών τους. Μια μεγάλη ποσότητα καθαρού αέρα απαιτείται, ώστε τελικά να προκύψει ένα ικανοποιητικό και αντιπροσωπευτικό δείγμα προς ανάλυση. Από την ποσότητα και την ποιότητα του δείγματος εξαρτάται ο τελικός αριθμός των δεσμευμένων μορίων της εκρηκτικής ύλης που θα οδηγηθούν προς ανάλυση. Αυτονόητο είναι ότι ο βαθμός ευαισθησίας της συσκευής ανίχνευσης, που έπεται της διάταξης δειγματοληψίας, διαμορφώνει τις απαιτήσεις δειγματοληψίας που πρέπει να ικανοποιεί η συγκεκριμένη διάταξη. Όσο πιο μεγάλη είναι η ευαισθησία της συσκευής ανίχνευσης, τόσο μικρότερη ποσότητα μορίων προς ανάλυση απαιτείται να συλλεχθεί. Οι περισσότεροι αισθητήρες ανίχνευσης εκρηκτικών υλών δεν παρουσιάζουν αρκετά ικανοποιητικό βαθμό

ευαισθησίας σε πραγματικό χρόνο και για το λόγο αυτό απαιτείται ένας πολύ καλός τρόπος συλλογής δείγματος. Λύση σε αυτό το πρόβλημα ήρθε να δώσει η σχεδίαση και η κατασκευή μιας διάταξης προ-συγκεντρωτή (pre-concentrator), η οποία χρησιμοποιείται για τη δειγματοληψία της υπό ανάλυση εκρηκτικής ύλης. Ο τρόπος λειτουργίας του προ-συγκεντρωτή είναι απλός: αρχικά, με τη βοήθεια μιας αντλίας, εισάγεται στο εσωτερικό του μια μεγάλη ποσότητα αέρα. Πρόκειται στην πραγματικότητα για ένα μίγμα πολλών διαφορετικών μορίων, μεταξύ των οποίων και μόρια εκρηκτικών υλών σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η δέσμευση των μορίων των εκρηκτικών υλών με τη χρήση ειδικών υλικών. Προκειμένου τα ειδικά αυτά υλικά να απορροφήσουν τα μόρια, θα πρέπει προηγουμένως να θερμανθούν. Ο μηχανισμός της δέσμευσης βασίζεται στο φαινόμενο της προσρόφησης πάνω σε μεγάλες επιφάνειες.

Οι πρώτοι προ-συγκεντρωτές που κατασκευάστηκαν ήταν μεγάλων διαστάσεων, η λειτουργία τους απαιτούσε μεγάλα ποσά τροφοδοσίας και χαρακτηρίζονταν από αργούς χρόνους απόκρισης. Όμως, η πρόοδος που έχει σημειωθεί τα τελευταία χρόνια και εξακολουθεί να σημειώνεται στον τομέα της νάνο-τεχνολογίας επέτρεψε να σχεδιαστούν και να κατασκευαστούν μικροσκοπικοί προ-συγκεντρωτές, που εξαιτίας της χαμηλής θερμικής τους μάζας θερμαίνονται πολύ γρήγορα. Καλύπτονται από υλικά που μπορούν να αντέξουν τις θερμοκρασιακές μεταβολές και ο βαθμός αποτελεσματικότητάς τους στη δειγματοληψία μορίων εκρηκτικών υλών είναι πολύ υψηλός [6].

### 2.3 Γενική Περιγραφή Προτεινόμενης Διάταξης

Στο Διάγραμμα 2 που ακολουθεί απεικονίζεται η προτεινόμενη διάταξη ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης σε ταχυδρομικά αντικείμενα που ρίπτονται σε υπαίθρια γραμματοκιβώτια:



Διάγραμμα 2: Γενικό διάγραμμα προτεινόμενης διάταξης

Τα ταχυδρομικά αντικείμενα εισέρχονται στα υπαίθρια γραμματοκιβώτια μέσω μιας σχισμής, αρκετά πλατιάς, που βρίσκεται στην πρόσοψη των γραμματοκιβωτίων. Προκειμένου να γίνει ο έλεγχος για την ύπαρξη ιχνών εκρηκτικής ύλης στο εσωτερικό ή και στην επιφάνεια των ταχυδρομικών αντικειμένων, αυτά αρχικά τοποθετούνται σε έναν προθάλαμο, ειδικά διαμορφωμένο στο εσωτερικό του γραμματοκιβωτίου και στερεωμένο στο ύψος της σχισμής. Από τον προθάλαμο αυτόν, τα ταχυδρομικά αντικείμενα εισέρχονται σειριακά σε ένα κουτί κενό αέρος, όπου ουσιαστικά λαμβάνει χώρα η διαδικασία της δειγματοληψίας. Το κουτί είναι κενό αέρος, ώστε να αποφευχθούν τυχόν προσμίξεις με άλλα μόρια του περιβάλλοντος χώρου και να ενισχυθεί έτσι η «καθαρότητα» του δείγματος. Στο εσωτερικό αυτού του κουτιού εφαρμόζεται παροχή καθαρού αέρα, ώστε να απελευθερωθούν μόρια που βρίσκονται στο εσωτερικό ή και στην επιφάνεια του ταχυδρομικού αντικειμένου. Η ποσότητα του καθαρού αέρα μαζί με τα απελευθερωμένα μόρια εισέρχονται στον προ-συγκεντρωτή με τη βοήθεια μιας αντλίας, όπου πλέον λαμβάνει χώρα η διαδικασία της δέσμευσης των μορίων εκρηκτικών υλών, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Τελικά, ένα ικανοποιητικό ποσοστό καθαρού δείγματος εισέρχεται στην περιοχή ιονισμού της IMS συσκευής και ακολουθείται η διαδικασία ανάλυσης και ταυτοποίησής του.

## 2.4 Διάταξη IMS αισθητήρα

Η διάταξη IMS αισθητήρα που μελετήθηκε ανήκει στην κατηγορία των φασματογράφων κινητικότητας ιόντων με χρονική εκτροπή (Drift Time Ion Mobility Spectrometer, DTIMS), η αρχή λειτουργίας του οποίου έχει αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα.

Η σύγχρονη ανάπτυξη της νάνο-τεχνολογίας έχει σημειώσει τεράστια άλματα στη συμπαγή σχεδίαση (compact design) και την κατασκευή τέτοιου είδους διατάξεων IMS. Σήμερα αυτού του είδους οι συσκευές εμφανίζουν πολύ μεγάλη ευαισθησία και γρήγορη απόκριση, ανιχνεύοντας ίχνη ποσοτήτων εκρηκτικής ύλης επιπέδου ppb-ppm μέσα σε διάστημα msec, λειτουργούν σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και επιπλέον έχουν τη δυνατότητα να διαχωρίζουν ισομερείς ενώσεις.

Το μειονέκτημα των αισθητήρων αυτών αποτελούσε πάντα ο σχεδιασμός και η συναρμολόγηση πολύπλοκων σωλήνων εκτροπής ιόντων (IMS drift tubes). Προκειμένου να δημιουργηθεί το απαραίτητο, ομογενές ηλεκτρικό πεδίο στον IMS σωλήνα, απαιτούνταν ηλεκτρόδια και μονωτήρες, συνδυασμένα με άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις. Όλες αυτές οι απαιτήσεις σχεδιασμού και συναρμολόγησης είχαν ως αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους και του βάρους του σωλήνα εκτροπής, χωρίς ταυτόχρονα να είναι εγγυημένο το αποτέλεσμα ως προς την ευαισθησία και την ανάλυση της συσκευής. Η χρήση λοιπόν πανάκριβων συστημάτων, ακατάλληλων για μαζική παραγωγή, ανέβαζε αρκετά το κόστος παραγωγής τέτοιων χειροκίνητων συσκευών και καθιστούσε απαγορευτική την πρακτική εφαρμογή τους.

Ωστόσο, η έρευνα στον τομέα της νάνο-τεχνολογίας προχώρησε και εξελίχθηκε και σήμερα υπάρχουν μικροσκοπικοί, εύκολοι στην συναρμολόγηση και φθηνοί σωλήνες εκτροπής ιόντων. Οι σωλήνες αυτοί είναι κατασκευασμένοι από τυλισσόμενα, συνεστραμμένα, κεραμικά υλικά χαμηλών θερμοκρασιών (Low Temperature Co-fire Ceramic, LTCC) και περιλαμβάνουν ολοκληρωμένο κύκλωμα δυναμικών αντιστάσεων (Integral Resistor Network). Ουσιαστικά, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός τέτοιου σωλήνα είχε ως αποτέλεσμα να αφαιρεθούν μέχρι και 150 μεμονωμένα εξαρτήματα, μειώνοντας δραματικά το μέγεθος των μέχρι τότε αντίστοιχων συσκευών ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης. Επιπροσθέτως, ο συνδυασμός αυτών των υλικών οδήγησε στην

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR

παραγωγή μιας εσωτερικής, χημικά αδρανούς επιφάνειας, βοηθώντας έτσι στην καλύτερη και αποδοτικότερη λειτουργία της συσκευής.

Η τεχνολογία συνεστραμμένων κεραμικών υλικών χαμηλών θερμοκρασιών (Low Temperature Co-fire Ceramic, LTCC) καλύπτει την απαίτηση για την παραγωγή φθηνών, αυτοματοποιημένων σωλήνων εκτροπής με τον ελάχιστο αριθμό μετρήσεων και ηλεκτρικών συνδέσεων στα κυκλώματα ελέγχου και ανίχνευσης. Η LTCC τεχνολογία επιτρέπει απλές λειτουργίες για την παραγωγή ηλεκτροδίων. Αυτά βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους και η απόδοσή τους, δηλαδή η δημιουργία του απαραίτητου, ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου, δεν επηρεάζεται από τις επιφανειακά τοποθετημένες αντιστάσεις. Οι αντιστάσεις αυτές κατασκευάζονται απευθείας πάνω στον σωλήνα, περιορίζοντας έτσι στο ελάχιστο τις απαιτούμενες ηλεκτρικές συνδέσεις. Επιπλέον, τα ολοκληρωμένα θερμικά στοιχεία είναι ενσωματωμένα στην κατασκευή, αντί να εφαρμόζονται εξωτερικά, όπως συμβαίνει στη “stacked” σχεδίαση.

Τα αποτελέσματα των ελέγχων και των μετρήσεων της συσκευής μπορούν να αναλυθούν με τη χρήση τεχνολογίας ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και να καθορίσουν το είδος και τη συγκέντρωση της εκρηκτικής ύλης. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται η κατάλληλη βαθμονόμηση (calibration) της συσκευής [7].

#### 2.4.1 Διαδικασία Βαθμονόμησης της IMS συσκευής

Βασικό και απαραίτητο βήμα πριν την ανάλυση πραγματικών δειγμάτων, αποτελεί η βαθμονόμηση (calibration) μιας συσκευής. Η βαθμονόμηση μιας συσκευής αποτελεί τον τρόπο ρύθμισής της, λαμβάνει χώρα πριν την πραγματοποίηση μετρήσεων πραγματικών δειγμάτων και έχει σκοπό να διασφαλίσει την ορθότητα των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που θα ακολουθήσουν. Το σύνηθες κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης μιας συσκευής είναι να προηγείται η μέτρηση μιας πρότυπης ουσίας, που ονομάζεται βαθμονομητήρας (calibrant) [5].

Πιο συγκεκριμένα, η βαθμονόμηση μιας IMS συσκευής βασίζεται στον καθορισμό της σχέσης μεταξύ ενός πρότυπου διαλύματος (τιμή αναφοράς) και της υπό

ανάλυσης ουσίας. Η σωστή βαθμονόμηση της IMS συσκευής στοχεύει τόσο στην ποιοτική (ανίχνευση) όσο και στην ποσοτική (μέτρηση ποσότητας) ανάλυση της εκρηκτικής ύλης. Η σύσταση του πρότυπου διαλύματος (βαθμονομητήρας, calibrant) είναι όσο το δυνατόν παρόμοια με τη σύσταση της υπό ανάλυση εκρηκτικής ουσίας. Η χρήση αυτού του είδους χημικών προτύπων διαλυμάτων στοχεύουν στην βαθμονόμηση των IMS συσκευών, αποφεύγοντας ταυτόχρονα φαινόμενα παρεμβολών από άλλα, ξένα υλικά. Προετοιμάζεται, λοιπόν μια σειρά τέτοιων εξωτερικών πρότυπων διαλυμάτων, που περιλαμβάνουν και την υπό ανάλυση εκρηκτική ουσία σε γνωστές, ποσοτικοποιημένες συγκεντρώσεις. Κάθε φορά που εισάγεται συγκεκριμένης σύστασης δείγμα στην συσκευή, καταγράφεται το σήμα στην έξοδό της και με τον τρόπο αυτό προκύπτει μια σειρά αντιστοιχίσεων μεταξύ της σύστασης του πρότυπου διαλύματος και της γνωστής, ποσοτικοποιημένης συγκέντρωσης της υπό ανάλυσης εκρηκτικής ουσίας. Ένα βασικό σήμα εξόδου είναι το ουδέτερο (blank) σήμα, που αποτελεί την απόκριση της συσκευής σε δείγμα που δεν περιέχει καθόλου την υπό ανάλυση εκρηκτική ουσία. Από τα αποτελέσματα που καταγράφονται προκύπτει μια καμπύλη βαθμονόμησης είτε με τη γραφική σχεδιάσή τους είτε με την κατάλληλη προσαρμογή τους σε μια μαθηματική εξίσωση [8].

Οι μετρήσεις και η καταγραφή των αποκρίσεων μιας συσκευής κατά τη διαδικασία βαθμονόμησής της γίνεται πάντα υπό συγκεκριμένες, σταθερές και προκαθορισμένες συνθήκες. Βασική παραδοχή κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης μιας IMS συσκευής είναι ότι, υπό συγκεκριμένες, σταθερές συνθήκες, το γινόμενο  $K_0 t$  είναι σταθερό, όπου  $K_0$  η σταθερά κινητικότητας ιόντων. Αυτό σημαίνει ότι ο υπολογισμός της κινητικότητας διαφόρων ιόντων εκρηκτικών υλών μπορεί να γίνει με τη βοήθεια της σταθεράς κινητικότητας ενός βαθμονομητή (calibrant),  $K_{0c}$ , σύμφωνα με τη σχέση:  $K_0 = K_{0c} \left[ \frac{t_c}{t_d} \right]$ , όπου  $t_c$  είναι ο χρόνος εκτροπής του βαθμονομητή για τις συγκεκριμένες συνθήκες υπό τις οποίες διεξάγεται το πείραμα και καταγράφονται μετρήσεις και  $t_d$  είναι ο χρόνος εκτροπής της εκρηκτικής ύλης υπό τις ίδιες συνθήκες. Η συνηθέστερη χημική ένωση που χρησιμοποιείται ως βαθμονομητής για τη βαθμονόμηση μιας IMS συσκευής είναι η 2,4-τολουιδίνη ( $C_7H_9N$ ). Η χρήση της συγκεκριμένης χημικής ουσίας



μπορεί να περιορίσει κάποια λάθη στις μετρήσεις που γίνονται για τον υπολογισμό κάποιων παραμέτρων, εισάγει όμως άλλα, λόγω της επίδρασής της με την υγρασία και τα οργανικά υπολείμματα που πιθανόν να βρίσκονται στον σωλήνα εκτροπής. Πιο συγκεκριμένα, η επίδρασή της έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία συστοιχιών ιόντων που αλλάζουν την κινητικότητα των μεμονωμένων ιόντων.

Πειράματα και μετρήσεις για την διακρίβωση των συσκευών IMS έχουν γίνει με τη χρήση ιόντων tetra-alkyl-ammonium ( $[H(CH_2)_n]_4N^+$ ), 2-4 τολουιδίνης και di-tetr-butyl-pyridine ( $C_{13}H_{21}N$ ), που θεωρούνται πολύ αποτελεσματικά πρότυπα για τις IMS συσκευές, αφού η φασματική ανάλυσή τους παράγει μοναδικές κορυφές και εμφανίζουν πολύ ευαίσθητο σήμα. Έρευνες έχουν δείξει ότι, προκειμένου να αποφευχθούν λάθη στις μετρήσεις λόγω παρουσίας άλλων, ξένων προσμίξεων κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί ένας συνδυασμός των προαναφερθέντων προτύπων, όπως ένα πρότυπο αποτελούμενο από τη 2-4 τολουιδίνη, όπου βοηθάει στην ανίχνευση ξένων προσμίξεων, και του tetra-alkyl-ammonium άλατος, το οποίο δεν επηρεάζεται από τον παράγοντα θερμοκρασίας και την παρουσία ξένων προσμίξεων, λόγω της χαμηλής τάσης του να δημιουργεί συστοιχίες ιόντων. Η γραμμική βαθμονόμηση των IMS συσκευών ποικίλει από 10 έως 1.000  $\mu M$  (micro - molar,  $10^{-6} mol/L$ ) [9].

Το μετρούμενο, αναλογικό μέγεθος στην έξοδο της συσκευής που μελετήθηκε είναι ρεύμα, το οποίο απαιτεί ενίσχυση με τη βοήθεια κατάλληλης ηλεκτρονικής διάταξης (amplifier). Ακολούθως, το ενισχυμένο σήμα διέρχεται από έναν A/D μετατροπέα (A/D converter), ώστε τα αναλογικά δεδομένα να μετατραπούν σε ψηφιακά. Από την καμπύλη βαθμονόμησης που προκύπτει, δημιουργείται ένας πίνακας μετρήσεων της συγκέντρωσης των συνηθέστερων εκρηκτικών υλών (Lookup Table), ο οποίος χρησιμοποιείται στη συνέχεια ως βάση για τον προγραμματισμό του μικροεπεξεργαστή (microprocessor).

## 2.5 Μικροεπεξεργαστής (microprocessor)

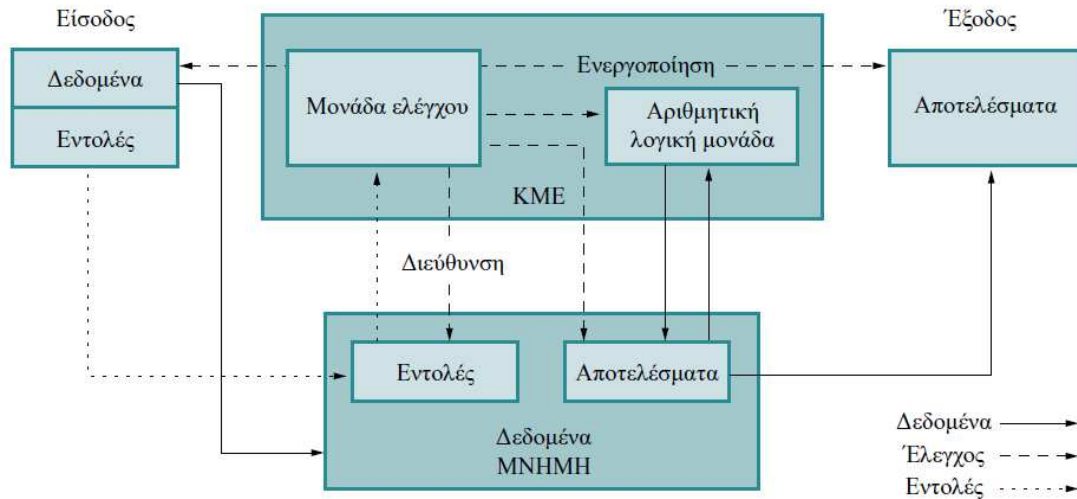
### 2.5.1 Λίγα λόγια για τον μικροεπεξεργαστή

Ο μικροεπεξεργαστής είναι το αποτέλεσμα της ενσωμάτωσης σε ένα και μόνο ολοκληρωμένο κύκλωμα όλων των επιμέρους, απαιτούμενων, πολύπλοκων κυκλωμάτων που αποτελούν την κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα, αφού σχεδιαστεί με τη βοήθεια ειδικών προγραμμάτων ηλεκτρονικού υπολογιστή πάνω σε δίσκους πυριτίου, τοποθετείται σε πλαστική ή κεραμική βάση. Για τις συνδέσεις χρησιμοποιείται χρυσό σύρμα και η συναρμολόγηση ολοκληρώνεται με την τοποθέτηση του πλαστικού ή κεραμικού περιβλήματος. Στη συνέχεια απαιτείται προγραμματισμός του μικροεπεξεργαστή, ώστε να διαθέτει πλέον όλες τις βασικές λειτουργίες ενός ψηφιακού υπολογιστή. Αρκετά από τα επιμέρους, πολύπλοκα κυκλώματα χρησιμοποιούνται ως μνήμη του μικροεπεξεργαστή, ενώ κάποια άλλα για τη διασύνδεσή του με τον εξωτερικό κόσμο και για τις λειτουργίες χρονισμού και προώθησης των δεδομένων προς τους τελικούς προορισμούς τους.

Ο μικροεπεξεργαστής ή αλλιώς κεντρική μονάδα επεξεργασίας, αποτελεί μία από τις λειτουργικές μονάδες ενός μικροϋπολογιστικού συστήματος και ρυθμίζει όλες τις ενέργειες που πρέπει να εκτελέσει αυτό. Περιλαμβάνει την αριθμητική και λογική μονάδα, την μονάδα ελέγχου και τους καταχωρητές. Η αριθμητική και λογική μονάδα (Arithmetic and Logic Unit, ALU) είναι υπεύθυνη για την επεξεργασία των δεδομένων, η μονάδα ελέγχου (Control Unit, CU) ελέγχει και συντονίζει όλες τις μονάδες του συστήματος και στους καταχωρητές (registers) πραγματοποιείται προσωρινή αποθήκευση ενδιάμεσων αποτελεσμάτων και δεδομένων.

Ο ρόλος του μικροεπεξεργαστή σε ένα μικροϋπολογιστικό σύστημα είναι να καθορίζει τη σειρά με την οποία εκτελούνται οι εντολές, σύμφωνα πάντα με την απαιτούμενη εφαρμογή. Ταυτόχρονα, συντονίζει την μετάδοση των δεδομένων που εισέρχονται στο σύστημα μέσω των εισόδων του και απευθύνονται τόσο προς τον ίδιο τον μικροεπεξεργαστή όσο και προς την κύρια μνήμη του συστήματος. Στη συνέχεια, διευθετεί τη μετάδοσή τους προς τις προκαθορισμένες εξόδους του συστήματος. Η επεξεργασία των δεδομένων εκτελείται με βάση το πρόγραμμα επεξεργασίας που

εκτελεί το μικροϋπολογιστικό σύστημα. Στο Σχήμα 13 απεικονίζεται η δομή του μικροεπεξεργαστή.



Σχήμα 13: Δομή του μικροεπεξεργαστή [10].

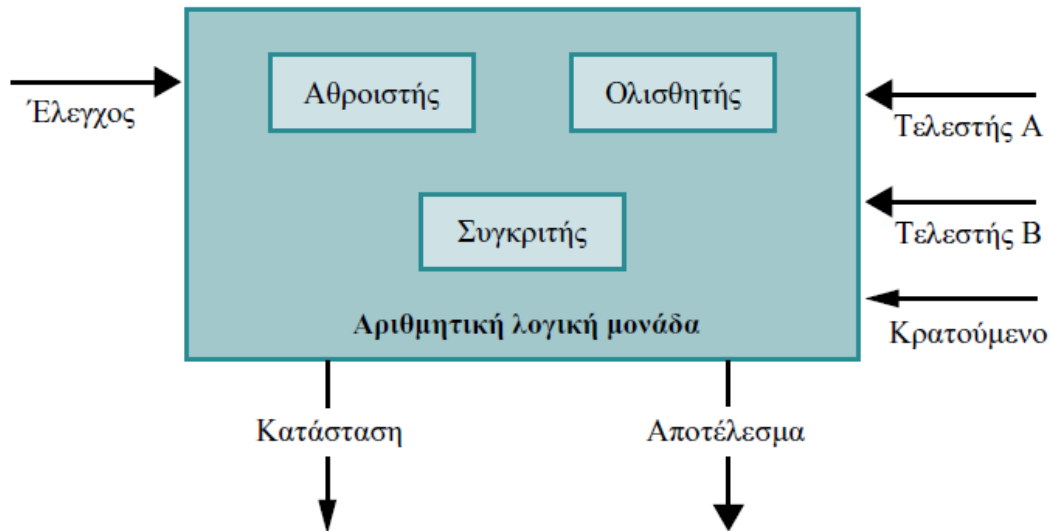
Η αριθμητική και λογική μονάδα (ALU) είναι η μονάδα όπου εκτελούνται όλες οι αριθμητικές και λογικές πράξεις που απαιτούνται, σύμφωνα πάντα με το πρόγραμμα που «τρέχει» ο μικροεπεξεργαστής. Το σύνηθες είναι οι πράξεις αυτές να είναι μικρο-προγραμματιζόμενες, γεγονός που οδηγεί σε γρηγορότερη εκτέλεσή τους και μεγαλύτερες ταχύτητες. Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιούνται ξεχωριστές μνήμες ελέγχου (control memories), στις οποίες αποθηκεύεται το σύνολο των εντολών που αφορούν στην εκτέλεση των λογικών και αριθμητικών πράξεων.

Οι αριθμητικές πράξεις οι οποίες εκτελούνται από την αριθμητική και λογική μονάδα του μικροεπεξεργαστή αρχικά θα μπορούσαν να θεωρηθούν περιορισμένες. Ο τρόπος λειτουργίας όμως της μονάδας και γενικότερα του μικροεπεξεργαστή επιτρέπει την εκτέλεση πολύπλοκων αριθμητικών πράξεων ως αποτέλεσμα συνδυασμού αυτών των απλών αριθμητικών πράξεων. Αυτές οι αριθμητικές πράξεις είναι οι εξής: η πρόσθεση και η αφαίρεση δύο αριθμών, η αύξηση και η ελάττωση κατά ένα ενός αριθμού και τέλος το συμπλήρωμα ως προς 1 ή ως προς 2 ενός αριθμού.

Οι λογικές πράξεις αφορούν κατά κύριο λόγο σε δεδομένα δυαδικής άλγεβρας και είναι οι γνωστές ΚΑΙ (AND), Ή (OR) και ΟΧΙ (NOT). Επιπλέον, ως λογικές

πράξεις θεωρούνται η σύγκριση δύο αριθμών (<, >, =) και η περιστροφή ή ολίσθηση ενός αριθμού.

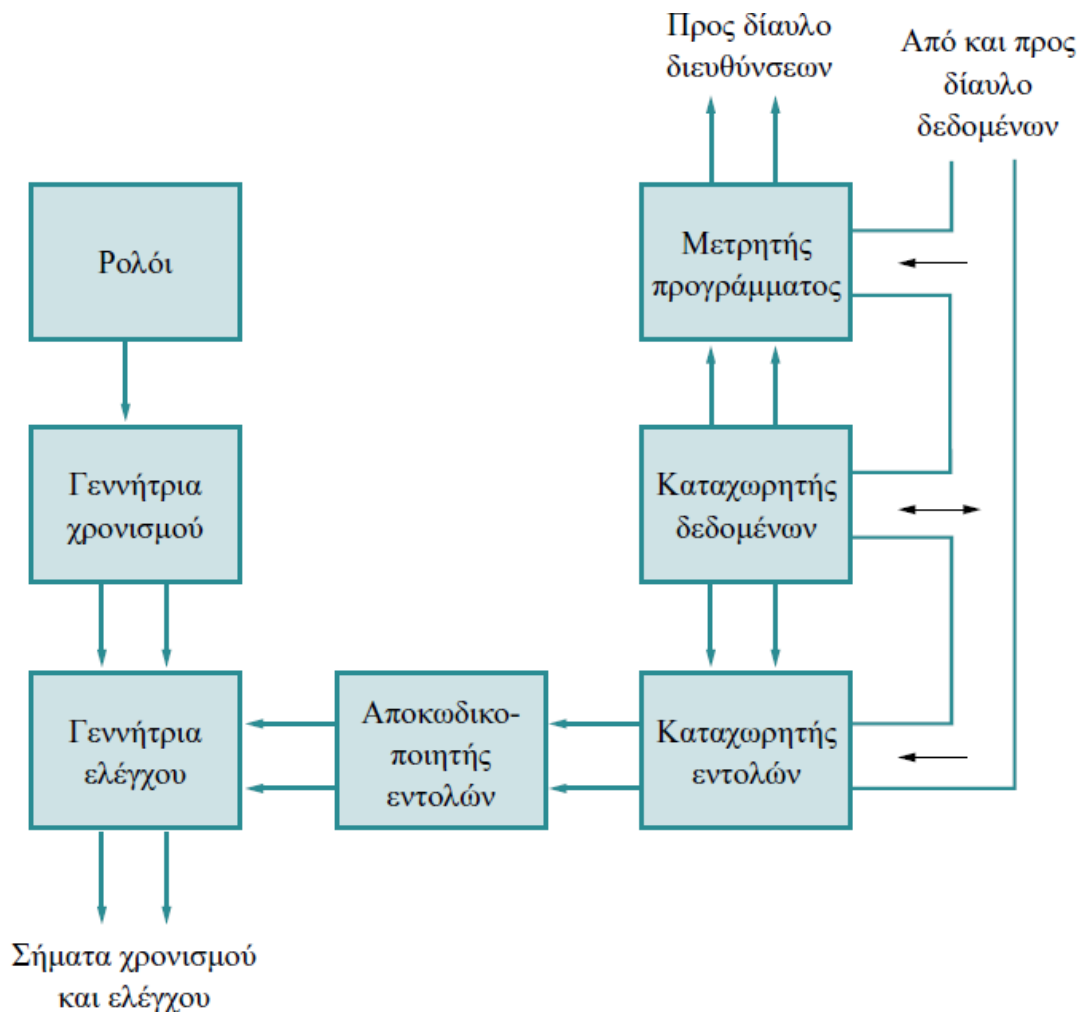
Στο Σχήμα 14 που ακολουθεί απεικονίζονται τα κυκλώματα που περιέχει μια ALU μονάδα.



Σχήμα 14: Η αριθμητική και λογική μονάδα του μικροεπεξεργαστή [10].

Αν και σε κάποιες περιπτώσεις, τα κυκλώματα της ALU ενδεχομένως να διαφέρουν μεταξύ των μοντέλων των μικροεπεξεργαστών, ωστόσο το σύνηθες είναι να υπάρχουν τα εξής: κύκλωμα αθροιστή (adder, για τις βασικές αριθμητικές πράξεις), κύκλωμα συγκριτή (comparator, για τη σύγκριση δύο αριθμών), κύκλωμα ολισθητή (shifter, για τη διαδικασία της περιστροφής ή ολίσθησης ενός αριθμού), μονάδα λογικής επεξεργασίας (εκτέλεση λογικών πράξεων), καταχωρητές (αποθήκευση των αποτελεσμάτων των πράξεων).

Ως συνέπεια των τόσων αυξημένων απαιτήσεων, είναι αυτονόητη η ανάγκη ύπαρξης της μονάδας ελέγχου (Control Unit, CU) του μικροεπεξεργαστή. Ουσιαστικά, πρόκειται για τον πυρήνα του μικροεπεξεργαστή, αφού η μονάδα αυτή είναι υπεύθυνη για το χρονοισμό, την αποκωδικοποίηση και την ενεργοποίηση όλων των υπόλοιπων τμημάτων ενός συστήματος. Το λειτουργικό διάγραμμα της μονάδας ελέγχου του μικροεπεξεργαστή φαίνεται στο Διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 3 : Λειτουργικό Διάγραμμα Μονάδας ελέγχου μικροεπεξεργαστή [10].

Το ρολόι αποτελεί το βασικό εργαλείο για όλα τα σήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των κυκλωμάτων του συστήματος. Η διάρκεια των παλμών χρονισμού σε ένα σύστημα κυμαίνεται από σχετικά μεγάλους χρόνους, της τάξης των secs ή msecs έως πολύ μικρούς, της τάξης των nsecs. Οι παλμοί χρονισμού εμφανίζονται μόνο όταν και για όσο είναι απαραίτητο, υπάρχει προκαθορισμένη ακολουθία με βάση την οποία επαναλαμβάνονται ενώ υπάρχει και η πιθανότητα να εμφανίζονται κατόπιν συγκεκριμένης απαίτησης.

Όπως είναι γνωστό, η λειτουργία του μικροεπεξεργαστή είναι σειριακή και ανάλογη με τις εντολές του προγράμματος που «τρέχει» σε αυτόν. Ωστόσο, δεν είναι

μόνο το αποθηκευμένο πρόγραμμα υπεύθυνο για την λειτουργία του. Ο μικροεπεξεργαστής, με δεδομένο το γεγονός ότι γνωρίζει τη διεύθυνση αποθήκευσης της πρώτης, εκτελέσιμης εντολής στη μνήμη του, καλείται να ανατρέξει σε αυτή τη θέση μνήμης, να ανακτήσει την εντολή και αφού την εξετάσει, να πάρει αποφάσεις για τις απαιτούμενες ενέργειες που πρέπει να εκτελέσει, ώστε να ικανοποιηθεί η εντολή. Για όλα αυτά, ο μικροεπεξεργαστής αναπτύσσει τα κατάλληλα σήματα ελέγχου. Από τη στιγμή που λάβει χώρα η αποκωδικοποίηση της εντολής και προκειμένου αυτή να εκτελεστεί, πραγματοποιείται η ενεργοποίηση της μνήμης, των μονάδων εισόδου/εξόδου και της αριθμητικής και λογικής μονάδας. Η ενεργοποίηση αυτών των μονάδων γίνεται σε κατάλληλα χρονικά διαστήματα και με τέτοιο τρόπο ώστε οι λειτουργίες τους να μην δημιουργούν παρεμβολές και να μην οδηγούν σε λανθασμένα αποτελέσματα.

Οι καταχωρητές (Registers) είναι ουσιαστικά μνήμες αποθήκευσης προσωρινών δεδομένων ή αποτελεσμάτων, χρήσιμα για την ορθή λειτουργία του μικροεπεξεργαστή. Ανάμεσα στα διάφορα μοντέλα μικροεπεξεργαστών πιθανών να διαφοροποιείται το πλήθος και το είδος των καταχωρητών που διαθέτουν, όμως κάποιοι τύποι είναι βασικοί. Συνήθως, συναντώνται οι εξής:

- Συσσωρευτής (accumulator): Αποτελεί ένα από τα κυκλώματα της αριθμητικής και λογικής μονάδας. Χρησιμεύει για την αποθήκευση είτε ενός εκ των δύο αριθμών που απαιτούνται για να εκτελεστεί μια αριθμητική ή λογική πράξη είτε του αποτελέσματος μιας πράξης.
- Καταχωρητής γενικού σκοπού (general purpose register): Επίσης ανήκει στην αριθμητική και λογική μονάδα του μικροεπεξεργαστή. Σε αυτού του είδους τους καταχωρητές αποθηκεύεται ο δεύτερος αριθμός που χρειάζεται για την εκτέλεση μιας πράξης, όπως και τα ενδιάμεσα αποτελέσματα. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση της διεύθυνσης της θέσης μνήμης είτε που βρίσκονται οι αριθμοί είτε που θα αποθηκευτεί το αποτέλεσμα. Σε πολλά μοντέλα μικροεπεξεργαστών ο συσσωρευτής έχει αντικατασταθεί από μεγάλο αριθμό καταχωρητών γενικού σκοπού.

- Καταχωρητής κατάστασης επεξεργαστή (processor status word): Ένας ακόμα καταχωρητής που συναντάται στην αριθμητική και λογική μονάδα. Ουσιαστικά, πρόκειται για τις γνωστές σημαίες κατάστασης (flags) ή δείκτες. Χρησιμεύουν ως ένδειξη της κατάστασης του μικροεπεξεργαστή ή των αποτελεσμάτων μιας πράξης που έχει προηγηθεί. Είναι το είδος του καταχωρητή με το οποίο ο μικροεπεξεργαστής δηλώνει ένα μηδενικό (zero) ή ένα αρνητικό (negative) αποτέλεσμα, μια υπερχειλίση (overflow), ένα κρατούμενο (carry), κλπ.
- Καταχωρητής εντολών (Instruction Register): Ο συγκεκριμένος καταχωρητής ανήκει στα κυκλώματα της μονάδας ελέγχου του μικροεπεξεργαστή. Είναι ο χώρος στον οποίο, κατά την διάρκεια της αποκωδικοποίησης μιας εντολής προτού αυτή εκτελεστεί, αποθηκεύεται ο κώδικας λειτουργίας της.
- Μετρητής προγράμματος (program counter): Επίσης ένας καταχωρητής της μονάδας ελέγχου. Ο ρόλος του είναι να αποθηκεύει τη διεύθυνση της θέσης μνήμης της εντολής που πρόκειται να εκτελεστεί. Μόλις ολοκληρωθεί η εκτέλεση μιας εντολής, ανακαλείται από την μνήμη η εντολή, της οποίας η διεύθυνση είναι αποθηκευμένη στον μετρητή προγράμματος.
- Δείκτης σωρού (stack pointer): Πρόκειται για την περιοχή αποθήκευσης δεδομένων που χρησιμοποιεί ο μικροεπεξεργαστής. Σε κάποιες περιπτώσεις ο σωρός (stack) αποτελεί ένα σύνολο καταχωρητών, ενώ σε άλλες περιπτώσεις αποτελεί ένα τμήμα της μνήμης RAM. Χρησιμεύει για την αποθήκευση ενδιάμεσων αποτελεσμάτων ή και χρήσιμων για τον μικροεπεξεργαστή πληροφοριών. Έχει τη μορφή LIFO (Last In First Out), δηλαδή το πρώτο δεδομένο που θα βγει από το σωρό είναι αυτό που τοποθετήθηκε τελευταίο [10].

### 2.5.2 Ο μικροεπεξεργαστής Raspberry PI 3 model B+

Ο μικροεπεξεργαστής που εξετάστηκε για τη διάταξη ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης σε ταχυδρομικά αντικείμενα που ρίπτονται σε υπαίθρια γραμματοκιβώτια είναι ο Raspberry PI 3 model B+.





Εικόνα 1: Ο μικροεπεξεργαστής Raspberry PI 3 model B+ [11].

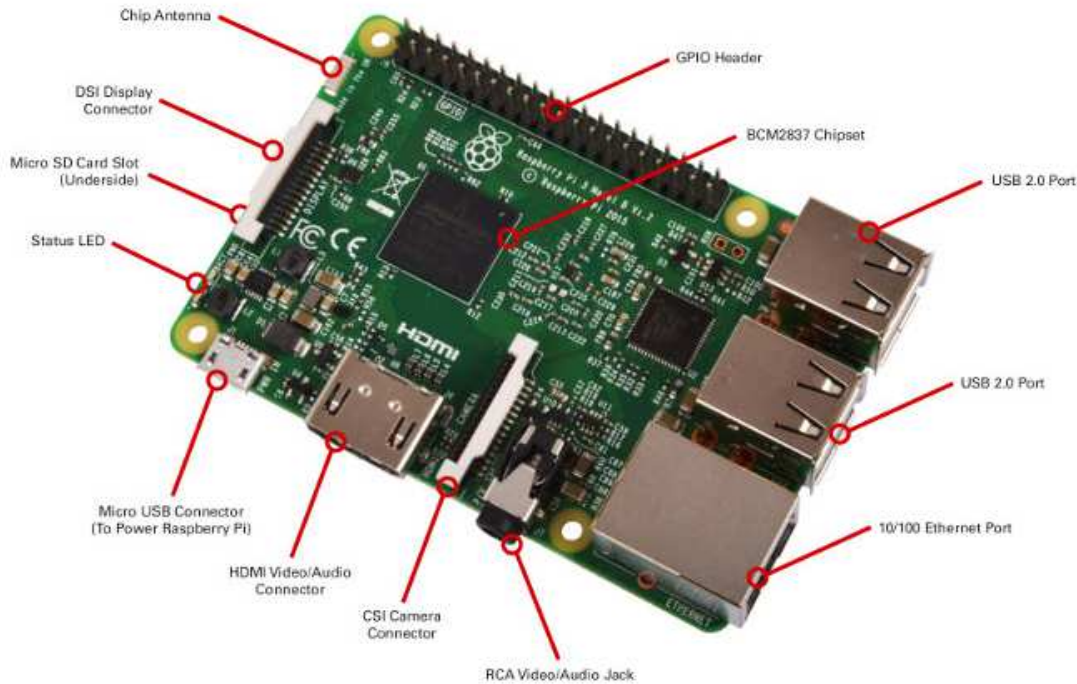
Αρχικά, ο προκάτοχος του επεξεργαστή που μελετήθηκε, το μοντέλο Raspberry PI 3 model B, έκανε την εμφάνισή του το Φεβρουάριο του 2016, ενώ μόλις τον Φεβρουάριο του 2018, η εταιρεία ανακοίνωσε την καινούργια έκδοσή του (B+). Εξακολουθεί να παραμένει ένας ισχυρός, μικρός και ελαφρύς υπολογιστής, βασισμένος σε ARM τεχνολογία. Πιο συγκεκριμένα, διαθέτει έναν 4-πύρηνο επεξεργαστή της εταιρείας ARM (Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53, ARMv8), 64-bit SoC (System on Chip) στα 1.4GHz. Το πλεονέκτημα αυτού του μικροσκοπικού εξαρτήματος είναι ότι παρουσιάζει πολύ καλύτερη απόδοση θερμότητας, με αποτέλεσμα να έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί σχεδόν στο μέγιστο των 1.4GHz του 4πύρηνου επεξεργαστή [11]. Επιπλέον, έχει προστεθεί το βελτιωμένο και έξυπνο ολοκληρωμένο κύκλωμα διαχείρισης ισχύος (Power Management Integrated Circuit, PMIC) της εταιρείας MaxLinear, το MxL7704. Το κύκλωμα αυτό αντικαθιστά έναν μεγάλο αριθμό διακριτών εξαρτημάτων που υπήρχαν στο προηγούμενο μοντέλο του μικροεπεξεργαστή. Με αυτό τον τρόπο, ο μικροεπεξεργαστής γίνεται πιο συμπαγής και ευέλικτος και αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση των αποστάσεων και του αριθμού των

υλικών που απαιτούνται για την τροφοδοσία του ολοκληρωμένου BCM2837B0 και βρίσκονταν τοποθετημένα περιμετρικά του. Το κέρδος εξαιτίας της χρήσης ενός κυκλώματος διαχείρισης ισχύος, στην συγκεκριμένη περίπτωση του MxL7704, μπορεί να γίνει πιο κατανοητό, αν αναλογιστεί κανείς ότι μια τυπική, αναλογική διάταξη ισχύος τεσσάρων καναλιών μπορεί να χρησιμοποιήσει σχεδόν 150 υλικά, ενώ αυτός ο αριθμός υλικών μπορεί να αυξηθεί ραγδαία αν απαιτηθούν επιπλέον λειτουργίες από τον μικροεπεξεργαστή. Το κύκλωμα MxL7704 παρέχει τέσσερα κανάλια τροφοδοσίας και έναν σταθεροποιητή χαμηλής ισχύος (Low-Drop Out Regulator, LDO) με μέγιστο ρεύμα εξόδου 100mA, χρησιμοποιεί λιγότερα από 80 υλικά και διαθέτει πολλές λειτουργίες που δεν διατίθενται στις κλασσικές και βασικές αναλογικές διατάξεις ισχύος. Και όλα αυτά τα χαρακτηριστικά συμπεριλαμβάνονται σε ένα συμπαγές, μόλις 5mmx 5mm QFN πακέτο [12].

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα διαχείρισης ισχύος παρέχει στον μικροεπεξεργαστή δυναμικό, κλιμακωτό έλεγχο τάσης, δυνατότητα παρακολούθησης της κατάστασης λειτουργίας του και έλεγχο των ακολουθιών και της δρομολόγησής του. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω σημείου διεπαφής με τον 4πύρηνο επεξεργαστή του μικροεπεξεργαστή. Επιπλέον, το ολοκληρωμένο περιέχει τέσσερις σύγχρονους step-down ρυθμιστές – σταθεροποιητές, οι οποίοι παρέχουν στον μικροεπεξεργαστή ρεύμα από 1.5A έως 4A, ενώ ο LDO σταθεροποιητής των 100mA παρέχει καθαρή τάση από 1.5V έως 3.6V για όλα τα αναλογικά υπό-συστήματά του [12].

Ένα ακόμα χρήσιμο χαρακτηριστικό που διαθέτει το συγκεκριμένο μοντέλο μικροεπεξεργαστή είναι ο εκτεταμένος ακροδέκτης (header) των 40 ακίδων (pins) που λειτουργούν ως General Purpose Inputs/Outputs (GPIO). Η χαμηλής κατανάλωσης μνήμη του μικροεπεξεργαστή είναι 1GB LPDDR2-900 SDRAM. Το χαρακτηριστικό που αποτελεί καινοτομία της σειράς στο κομμάτι της συνδεσιμότητας είναι η παρουσία θύρας διπλής ζώνης ασύρματης επικοινωνίας (dual-band wireless LAN), που λειτουργεί στα 2.4GHz και στα 5GHz και καλύπτει όλα τα πρότυπα της IEEE (802.11.b/g/n/ac), όπως και το Bluetooth (version 4.2 BLE), διευρύνοντας με αυτόν τον τρόπο το πλήθος των εφαρμογών που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο μικροεπεξεργαστής, χωρίς επιπλέον οικονομικό αντίκτυπο και μειώνοντας σημαντικά τους ελέγχους

συμβατότητας. Επιπλέον, υπάρχει μία θύρα GigabitEthernet μέσω USB2.0, με μέγιστο ρυθμό μετάδοσης τα 300Mbps. Τέλος, στις δυνατότητες συνδεσιμότητας που παρέχει ο μικροεπεξεργαστής συγκαταλέγονται και επιπλέον τέσσερις USB 2.0 θύρες [13].



Εικόνα 2: Τα εξαρτήματα του μικροεπεξεργαστή Raspberry PI 3 model B+ [14]

Οι απαιτήσεις του μικροεπεξεργαστή για τροφοδοσία είναι χαμηλές (5V/2.5A DC) και υπάρχουν πολλές δυνατότητες, ανάλογα με την εφαρμογή. Η τροφοδοσία του μικροεπεξεργαστή μπορεί να γίνει είτε μέσω ενός microUSB connector (Εικόνα 4) είτε μέσω του GPIO ακροδέκτη [13] [16]. Τέλος, το συγκεκριμένο μοντέλο της σειράς παρέχει τη δυνατότητα PoE (Power over Ethernet) τροφοδοσίας, για την οποία όμως απαιτείται ξεχωριστό PoE HAT [15].



Εικόνα 3: PoE HAT για Raspberry PI 3 model B+ [15].



Εικόνα 4: Το microUSB τροφοδοτικό για τον επεξεργαστή Raspberry PI [16].

Επίσης, ο μικροεπεξεργαστής διαθέτει μία σειρά από θύρες που έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίξουν εφαρμογές εικόνας, ήχου και πολυμέσων. Πιο

συγκεκριμένα, ο Raspberry PI 3 model B+ διαθέτει μία θύρα HDMI πλήρους μεγέθους, μία θύρα για σύνδεση οθόνης (MIPI DSI display port), μία θύρα για σύνδεση κάμερας (MIPI CSI camera port) και μία κοινή θύρα για αναπαραγωγή βίντεο και ήχου [13].

Το λειτουργικό σύστημα του μικροεπεξεργαστή φορτώνεται μέσω μιας κατάλληλα διαμορφωμένης microSD κάρτας, η οποία τοποθετείται στην αντίστοιχη υποδοχή που υπάρχει στην πλακέτα του μικροεπεξεργαστή. Η κάρτα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για αποθήκευση δεδομένων που αφορούν στη λειτουργία του μικροεπεξεργαστή. Οι παράμετροι για την αρχική λειτουργία του μικροεπεξεργαστή περιέχονται στο ειδικό σύστημα διαχείρισης και εγκατάστασης NOOBS (New Out Of Box Software), που αφορά το συγκεκριμένο μοντέλο μικροεπεξεργαστή. Το πρόγραμμα NOOBS βρίσκεται διαθέσιμο προς εγκατάσταση, χωρίς επιπλέον οικονομική χρέωση, στην επίσημη ιστοσελίδα της εταιρείας Raspberry [17], όπου παρέχονται και όλες οι οδηγίες εγκατάστασής του στην microSD κάρτα. Τον Μάρτιο του 2018 ανακοινώθηκε το NOOBS v.2.7.0, η τελευταία έκδοσή του, η οποία περιλαμβάνει τα εξής λειτουργικά συστήματα [17]:

- **Rasbian:** Πρόκειται για ένα λειτουργικό σύστημα, ελεύθερο προς διάθεση, βασισμένο στο λειτουργικό Debian, ειδικά διαμορφωμένο για τον εξοπλισμό των μοντέλων μικροεπεξεργαστών Raspberry PI. Περιλαμβάνει ένα σύνολο βασικών και βοηθητικών προγραμμάτων, τα οποία επιτρέπουν στον μικροεπεξεργαστή να λειτουργεί ορθά. Επιπλέον, το λειτουργικό σύστημα Rasbian παρέχει περισσότερα από 35.000 πακέτα, προ - εγκατεστημένων λειτουργικών προγραμμάτων, με φιλική προς τον χρήστη διαμόρφωση για εύκολη εγκατάσταση στον μικροεπεξεργαστή. Η αρχική έκδοση των πακέτων Rasbian ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2012, εξακολουθεί όμως να εξελίσσεται δυναμικά, δίνοντας έμφαση στη βελτίωση της σταθερότητας και της απόδοσής τους [18].
- **Pidora:** Πρόκειται για ένα λειτουργικό σύστημα βασισμένο σε Linux, που χρησιμοποιείται στα υπολογιστικά συστήματα Raspberry PI. Περιλαμβάνει πακέτα λειτουργικών προγραμμάτων, διαθέσιμα στην ειδική, δωρεάν και open source πλατφόρμα της κοινότητας του Fedora Project [19].

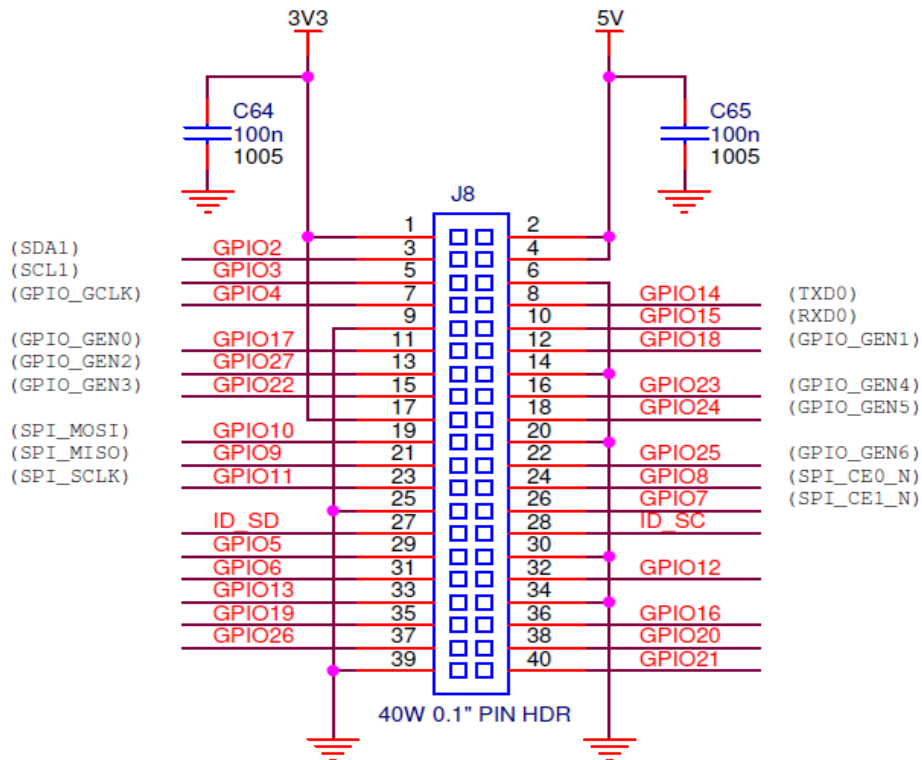


- **LibreELEC:** Πρόκειται επίσης για ένα ελαφρύ, λειτουργικό σύστημα βασισμένο σε Linux, κατασκευασμένο για την αναπαραγωγή πολυμέσων Kodi [20].
- **OSMC (Open Source Media Center):** Είναι ένας δωρεάν και open source αναπαραγωγός πολυμέσων βασισμένος σε Linux [21].
- **RISCOS:** Αποτελεί το βρετανικό λειτουργικό σύστημα, το οποίο σχεδιάστηκε ειδικά για τους ARM επεξεργαστές. Είναι ένα γρήγορο, αποτελεσματικό και συμπαγές πρόγραμμα, το οποίο έχει σχεδιαστεί και δοκιμαστεί από έμπιστους χρήστες και προγραμματιστές [22].
- **ArchLinux:** Αποτελεί μια συλλογή πηγών και πληροφοριών που λειτουργούν ως εργαλείο για όσους ασχολούνται με προγραμματισμό σε Linux για υπολογιστές ARM [23].

Ο μικροεπεξεργαστής Raspberry PI 3 model B+ διαθέτει έναν ενιαίο ακροδέκτη με 40 ακίδες (GPIO pins, General Purpose Inputs/Outputs). Πρόκειται για ένα από τα πιο δυναμικά χαρακτηριστικά του. Αποτελούν το φυσικό σημείο διεπαφής του μικροεπεξεργαστή με τον φυσικό κόσμο και ουσιαστικά λειτουργούν ως διακόπτες που ανοίγουν και κλείνουν. Από τις 40 ακίδες οι 26 αποτελούν γενικής φύσεως είσοδοι και έξοδοι, 12 ακίδες χρησιμοποιούνται για τροφοδοσία και γείωση, ενώ υπάρχουν και 2 ακίδες οι οποίες χρησιμοποιούνται ως IDEEPROM.

Οι ακίδες εισόδου – εξόδου μπορούν να προγραμματιστούν με διάφορους τρόπους. Τα σήματα εισόδου δεν περιορίζονται μόνο σε αυτά που προέρχονται από έναν διακόπτη (switch). Ως είσοδοι προς τον μικροεπεξεργαστή μπορούν να οριστούν τα σήματα που προέρχονται από ένα αισθητήριο ή από έναν υπολογιστή ή από μία άλλη συσκευή, γενικότερα. Αντιστοίχως, ως έξοδος του μικροεπεξεργαστή μπορεί να οριστεί οτιδήποτε, από την απλή περίπτωση της ενεργοποίησης ενός LED έως την αποστολή δεδομένων σε μια άλλη συσκευή για αποθήκευση ή και για περαιτέρω επεξεργασία. Επιπλέον, ο μικροεπεξεργαστής Raspberry PI 3 model B+, με τον κατάλληλο προγραμματισμό και στην περίπτωση που αυτός αποτελεί στοιχείο ενός ευρύτερου δικτύου, παρέχει την δυνατότητα ελέγχου των υπόλοιπων συσκευών του δικτύου και λήψης δεδομένων από αυτές για περαιτέρω επεξεργασία. Αυτή η δυνατότητα σύνδεσης του μικροεπεξεργαστή και ο έλεγχος άλλων συσκευών που

βρίσκονται στο ίδιο δίκτυο με αυτόν αποτελεί ένα από τα πιο ισχυρά χαρακτηριστικά του.



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα GPIO του Raspberry PI 3 model B+ [24].





Διάγραμμα 5: Διάγραμμα GPIO του Raspberry Pi 3 model B+ [25].

- **Ground:** Οι ακίδες γείωσης (συνολικά 8 pins: 6, 9, 14, 20, 25, 30, 34, 39) είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους, οπότε η σύνδεση της τροφοδοσίας μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε από αυτές [25].
- **DPI (Display Parallel Interface):** Συνολικά 28 pins (3, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 40). Χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση LCD οθονών (RGB24, RGB666, RGB565) [25].
- **GPCLK (General Purpose CLock):** Συνολικά 3 pins (7, 29, 31). Δίνουν παλμούς εξόδου συγκεκριμένης συχνότητας [25].

- **JTAG (Joint Test Action Group):** Συνολικά 11 pins (7, 13, 15, 16, 18, 22, 29, 31, 32, 33, 37). Χρησιμοποιούνται για εντοπισμό σφαλμάτων (debugging) [25].
- **W1 (One-Wire Interface):** Συνολικά 1 pin (7). Χρησιμοποιείται για τη διαχείριση όλων των master-slave συσκευών [25].
- **PCM (Pulse-Code Modulation):** Συνολικά 4 pins (12, 35, 38, 40). Χρησιμοποιείται ως έξοδος ψηφιακού ηχητικού σήματος υψηλής ανάλυσης [25].
- **SDIO (SD Card Interface):** Συνολικά 6 pins (13, 15, 16, 18, 22, 37). Χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της micro SD κάρτας [25].
- **I2C (Inter Integrated Circuit):** Συνολικά 4 pins (3, 5, 27, 28). Εξαιρετικά χρήσιμες ακίδες, δεδομένου ότι χρησιμοποιούνται για επικοινωνία με διαφορετικού τύπου περιφερειακά. Οι ακίδες αυτές έχουν συνδεδεμένη εσωτερικά μία pull-up αντίσταση 1.8 KΩ στα 3.3V. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως γενικού σκοπού είσοδοι – έξοδοι, όπου δεν απαιτείται 3.3 V τάση [25].
- **SPI (Serial Peripheral Interface):** Συνολικά 11 pins (11, 12, 19, 21, 23, 24, 26, 35, 36, 38, 40). Πρόκειται για σειριακό δίαυλο τεσσάρων συρμάτων. Χρησιμοποιείται για την σύγχρονη, σειριακή, αμφίδρομη (full-duplex) επικοινωνία πολύπλοκων και συμβατών συσκευών που είναι συνδεδεμένες με αρχιτεκτονική master-slave [25].
- **UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter):** Συνολικά 2 pins (8, 10). Χρησιμοποιείται για ασύγχρονη, σειριακή μετάδοση δεδομένων. Αποτελεί έναν ασφαλή τρόπο ελέγχου του μικροεπεξεργαστή μέσω των γενικού τύπου εισόδων του ή για σειριακή επικοινωνία μέσω κονσόλας [25].
- **WiringPi:** Συνολικά 28 pins (3, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 35, 36, 37, 38, 40). Σκοπός είναι να υπάρξει μια απλή κοινή πλατφόρμα και ένα σύνολο λειτουργιών, ώστε ο μικροεπεξεργαστής να μπορεί να προσπελαστεί με τη χρήση διαφόρων γλωσσών προγραμματισμού [25].

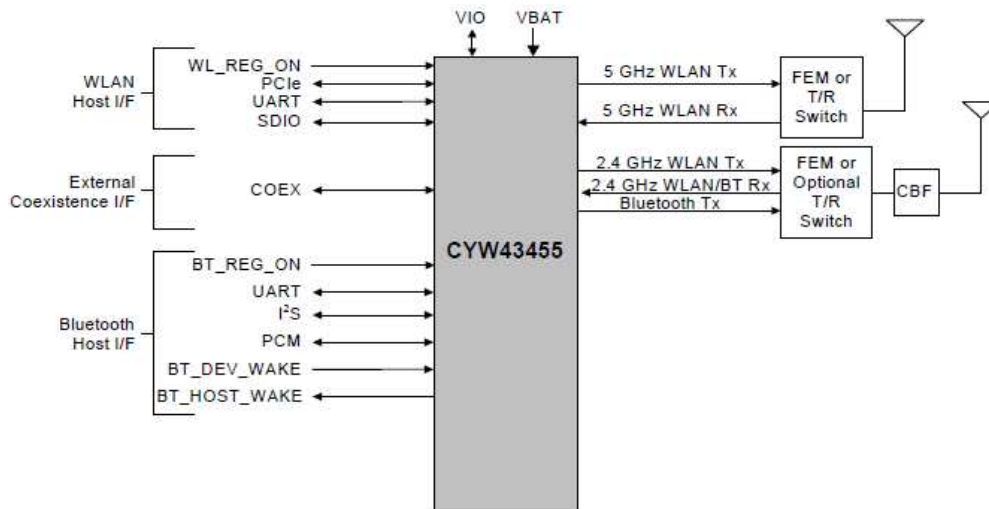
Η ασύρματη, διπλής ζώνης επικοινωνία του μικροεπεξεργαστή (W-LAN και Bluetooth) επιτυγχάνεται με τη χρήση του ολοκληρωμένου κυκλώματος CYW43455 combo της εταιρείας Cypress [11]. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (single-chip device), το οποίο παρέχει υψηλότατο επίπεδο ολοκλήρωσης για εφαρμογές που

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR

χρησιμοποιούν το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) και ασύρματο σύστημα συμβατό με τα πρότυπα IEEE 802.11ac MAC/baseband/radiοκαι Bluetooth 4.2. Σύμφωνα με το IEEE 802.11ac πρότυπο, η ασύρματη λειτουργία του ολοκληρωμένου κυκλώματος υποστηρίζει διαμόρφωση εύρους 256QAM στα κανάλια των 20MHz, 40MHzκαι 80MHz με ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων που προσεγγίζουν το 433.3Mbps. Επιπλέον, υποστηρίζονται όλα τα χαρακτηριστικά των IEEE 802.11a/b/g/n. Το ολοκληρωμένο κύκλωμα αποτελείται από επιμέρους κυκλώματα ενισχυτών μετάδοσης και ενισχυτών λήψης χαμηλής κατανάλωσης στα 2.4GHzκαι στα 5GHz, ενώ προαιρετικά υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν εξωτερικά κυκλώματα ενισχυτών ισχύος (Power Amplifiers, PAs) για την μετάδοση σημάτων και κυκλώματα ενισχυτών χαμηλού θορύβου (Low-Pass Amplifiers, LPAs) για τη λήψη σημάτων με θόρυβο. Ο τρόπος διασύνδεσης με το ασύρματο δίκτυο μπορεί να επιτευχθεί μέσω ενός SDIO v.3 σημείου διεπαφής (Secure Digital Input/Output, SDIO), μιας θύρας UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) τεσσάρων καναλιών υψηλής ταχύτητας ή και μιας σειριακής PCIeGen 1 (Peripheral Component Interconnect Express) θύρας. Το Bluetooth τμήμα του ολοκληρωμένου υποστηρίζει επίσης ένα UART σημείο διεπαφής τεσσάρων καναλιών υψηλής ταχύτητας. Η σχεδίαση του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου βασίστηκε σε αναπτυγμένες τεχνικές και ακολουθήθηκαν τέτοιες διαδικασίες που είχαν σκοπό να περιορίσουν την κατανάλωση ισχύος και να κατασκευάσουν ένα συμπαγές προϊόν. Περιλαμβάνει μια μονάδα διαχείρισης ισχύος, η οποία ουσιαστικά απλοποιεί την τοπολογία του συστήματος ισχύος και επιτρέπει στο ολοκληρωμένο να λειτουργεί απευθείας από μια κινητή πλατφόρμα μπαταριών, μεγιστοποιώντας έτσι τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Επιπρόσθετα, υλοποιεί εξαιρετικά ενισχυμένους και εξελιγμένους μηχανισμούς και αλγόριθμους που εξασφαλίζουν την συνύπαρξη με τη μέγιστη απόδοση του WLAN και του Bluetooth. Ένα ακόμα πλεονέκτημα του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου είναι ότι επιτρέπει την υποστήριξη και τη συνύπαρξη εξωτερικών ασύρματων συσκευών, όπως LTE συσκευές κινητής τηλεφωνίας (Long Term Evolution cellular) και GPS συσκευές, μέσω εξωτερικής θύρας. Ως αποτέλεσμα αυτής της δυνατότητας είναι η βελτιωμένη ποιότητα για την ταυτόχρονη μετάδοση δεδομένων, φωνής και εικόνας [26].



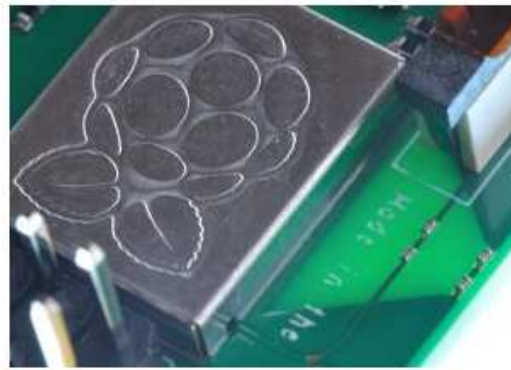
Διάγραμμα 6: Το λειτουργικό διάγραμμα βαθμίδων του ολοκληρωμένου CYW43455 ασύρματης επικοινωνίας [26].

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας CYW43455 combo βρίσκεται τοποθετημένο στην πλακέτα του μικροεπεξεργαστή κάτω από την μεταλλική θωράκιση με το τυπωμένο σήμα της εταιρείας Raspberry και είναι συνδεδεμένο με μια προηγμένη PCB κεραία [11].



Εικόνα 5: Η μεταλλική θωράκιση με το σήμα της εταιρείας, κάτω από την οποία βρίσκεται το ολοκληρωμένο κύκλωμα ασύρματης επικοινωνίας [11].

Η τοποθέτησή του κάτω από την μεταλλική θωράκιση εξασφαλίζει την προστασία του από παρεμβολές που πιθανών να προκληθούν από την PCB κεραία που βρίσκεται τοποθετημένη ακριβώς δίπλα. Η κεραία, αδειοδοτημένη από την εταιρεία ProantAB, έχει την όψη ενός ημιδιάφανου τριγώνου και έχει χρησιμοποιηθεί και σε προηγούμενα μοντέλα του μικροεπεξεργαστή. Η λειτουργία της στηρίζεται σε μια τριγωνική κοιλότητα που βρίσκεται στο επίπεδο της πλακέτας που υπάρχει και η γείωση. Στο εσωτερικό της κοιλότητας, τα ραδιοκύματα συντονίζονται και στη συνέχεια εστιάζουν προς το στενό άκρο της κοιλότητας. Από το σημείο αυτό, τα ραδιοκύματα μεταδίδονται προς το υπόλοιπο ασύρματο κύκλωμα του μικροεπεξεργαστή [27].



Εικόνα 6: Η PCB κεραία, αδειοδοτημένη από την εταιρεία ProantAB [28].

Συγκριτικά με τα προηγούμενα μοντέλα, η τελευταία έκδοση του μικροεπεξεργαστή παρουσιάζει πολύ καλύτερη απόδοση στη ζώνη των 2.4GHz και εξαιρετική στη ζώνη των 5GHz.

Σχετικά με την GigabitEthernet επικοινωνία, ο μικροεπεξεργαστής διαθέτει ένα εξελιγμένο ολοκληρωμένο κύκλωμα, το LAN7515 της εταιρείας Microchip. Πρόκειται



για ένα προϊόν χαμηλού κόστους και υψηλής απόδοσης, το οποίο υποστηρίζει 10/100/1000 Mbps μετάδοση [11]. Ο τρόπος λειτουργίας του στοχεύει στο να απλοποιηθεί η σχεδίαση ενός συστήματος μέσω της αξιοποίησης της στοίβας USB που διαθέτει το ολοκληρωμένο και να μειωθεί με αυτό τον τρόπο ο χώρος που καταλαμβάνει σε μια πλακέτα, μείωση που φτάνει έως και 65%. Η USB τεχνολογία στην οποία στηρίζεται η λειτουργία του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου αποτελεί ένα δυνατό εργαλείο για την ανάπτυξη εναλλακτικών, χαμηλού κόστους λύσεων για τη διασύνδεση πολλών συσκευών σε έναν υπολογιστή, προκειμένου να επεκταθούν οι δυνατότητές του. Με πιο απλά λόγια, οι θύρες διασύνδεσης Ethernet και USB που διαθέτει το ολοκληρωμένο παρέχουν τρομερή ευελιξία στη δρομολόγηση και στην τοποθέτηση συσκευών σε σχέση με τις κλασσικές διαδικτυακές λύσεις που βασίζονται στο PCI/PCI Express πρότυπο (Peripheral Component Interconnect Standard). Το LAN7515 χρησιμοποιείται ευρέως σε φορητές συσκευές (Mobile Internet Devices, MIDs) για εφαρμογές πολυμέσων, σε κονσόλες ηλεκτρονικών παιχνιδιών, σε ψηφιακές τηλεοράσεις, σε διαδικτυακούς εκτυπωτές και σε ενσωματωμένα συστήματα. Στο μόλις 9x9mm συμπαγές περίβλημά του με τις 144 ακίδες περιλαμβάνεται ένα πλήρες ενσωματωμένο USB 2.0 Hub υψηλών ταχυτήτων και ένας Ethernet ελεγκτής για την 10/100/1000 Mbps Ethernet επικοινωνία. Η UniClock™ τεχνολογία που χρησιμοποιείται από την εταιρεία Microchip στοχεύει την απλοποίηση του κυκλώματος χρονισμού, η οποία επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός μόνο κρυστάλλου στα 25MHz που καλύπτει τόσο την USB όσο και την Ethernet διασύνδεση. Η απλοποίηση αυτή έχει ως άμεσο αποτέλεσμα τη μείωση των ποσοτήτων των πρώτων υλών και των υποσυστημάτων (Bill of Materials, BOM) που απαιτούνται για την κατασκευή του τελικού προϊόντος, χωρίς να απαιτούνται επιπλέον υλικά στην περίπτωση που χρειαστεί να συνδεθούν και άλλα USB Hubs. Για τον χρονισμό των επιπλέον USB Hubs που πιθανόν να συνδεθούν, το ολοκληρωμένο διαθέτει και ένα ρολόι 24MHz για το χρονισμό τους [29].



Εικόνα 7: Το ολοκληρωμένο LAN7515 της εταιρείας Microchip, υπεύθυνο για την GigabitEthernet επικοινωνία του μικροεπεξεργαστή [28].

Για την USB επικοινωνία το ολοκληρωμένο διαθέτει πολλαπλές USB 2.0 θύρες για την downstream κίνηση. Προκειμένου να υπάρξει ορθή διαχείριση δεδομένων από και προς τα υπόλοιπα κυκλώματα του μικροεπεξεργαστή, το ολοκληρωμένο εφαρμόζει την λογική του Dedicated Transaction Translator (TT) [30] για κάθε μια USB 2.0 θύρα που συμμετέχει στην downstream κίνηση. Πρόκειται για έναν ειδικό, «λογικό» μηχανισμό που εφαρμόζεται στις downstream θύρες ενός hub και ο ρόλος του είναι να απομονώνει ένα περιβάλλον σηματοδοσίας υψηλής ταχύτητας από ένα περιβάλλον χαμηλής ή και μεικτής ταχύτητας. Με άλλα λόγια, προσαρμόζει την ταχύτητα μετάδοσης των upstream δεδομένων με την ταχύτητα των downstream δεδομένων, προκειμένου να υπάρξει πλήρη συμμόρφωση μεταξύ των ρυθμών μετάδοσης δεδομένων των κυκλωμάτων και των συσκευών που είναι συνδεδεμένα με το ολοκληρωμένο.

Για την Ethernet επικοινωνία, ο 10/100/1000 Ethernet ελεγκτής υποστηρίζει πολλά πακέτα χαρακτηριστικών για την εξοικονόμηση ενέργειας (Power Management Wakeup Features) και επιπλέον το IEEE 802.3az Energy Efficient Ethernet πρότυπο, το οποίο αφορά στις συσκευές που λειτουργούν ως πομποί στο φυσικό επίπεδο και προβλέπει την εξοικονόμηση ενέργειάς τους κατά τη διάρκεια περιόδων χαμηλής



κίνησης δεδομένων. Τέλος, έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει τεράστια πλαίσια (frames) των 9KB [29].

## 2.6 Απαιτήσεις τροφοδοσίας της προτεινόμενης διάταξης

Οι απαιτήσεις τροφοδοσίας της προτεινόμενης διάταξης μπορούν εύκολα να καλυφθούν, δεδομένου ότι στην πλειονότητά τους, τα υπαίθρια γραμματοκιβώτια βρίσκονται τοποθετημένα πολύ κοντά στην πρόσοψη των καταστημάτων της εταιρείας που έχει ορισθεί ως πάροχος καθολικής υπηρεσίας και των πρακτόρων της. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα πλεονέκτημα για τις ανάγκες τροφοδοσίας της διάταξης ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης στα ταχυδρομικά αντικείμενα που ρίπτονται στα γραμματοκιβώτια, αφού η διάταξη μπορεί να ηλεκτροδοτείται μέσω καλωδίου που θα προέρχεται από τις εγκαταστάσεις των καταστημάτων. Για λόγους φυσικής ασφάλειας και προκειμένου αυτό να προφυλάσσεται τόσο από τις καιρικές συνθήκες όσο και από περιπτώσεις βανδαλισμού, το καλώδιο τροφοδοσίας θα πρέπει να εισέρχεται στο γραμματοκιβώτιο υπογειώς, μέσω ειδικού καναλιού από τη βάση στήριξης του γραμματοκιβωτίου.

Ένα ακόμα ζήτημα που πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη είναι το ζήτημα αυτονομίας της διάταξης σε περίπτωση διακοπής ηλεκτρικού ρεύματος. Η αλματώδη ανάπτυξη την τεχνολογίας στο χώρο της φασματογραφίας και των εφαρμογών της έχει επιτρέψει τη σχεδίαση και την κατασκευή εύχρηστων και αποτελεσματικών χειροκίνητων, φορητών IMS συσκευών, οι οποίες λειτουργούν με τη χρήση συστημάτων επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Παρόμοια συστήματα επαναφορτιζόμενων μπαταριών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να προσαρμοστούν κατάλληλα στο εσωτερικό των υπαίθριων γραμματοκιβωτίων, προκειμένου να προσφέρουν την απαραίτητη αυτονομία της διάταξης και να εξασφαλίσουν τη συνεχή, αδιάκοπη λειτουργία της για μεγάλο χρονικό διάστημα [31].

## 2.7 Σύστημα Τηλεπικοινωνιακής Επικοινωνίας της διάταξης

Η σημερινή, ραγδαία εξέλιξη στο χώρο των τηλεπικοινωνιών παρέχει τεράστιες δυνατότητες ταχύτητας, οι οποίες υποστηρίζονται από το μοντέλο μικροεπεξεργαστή

που προτείνεται για τη συγκεκριμένη διάταξη. Παράλληλα, οι απίστευτες και οικονομικές λύσεις χωρητικότητας και αποθήκευσης δεδομένων που παρέχονται από τις υπηρεσίες του Υπολογιστικού Νέφους (Cloud Computing) καθιστά τη σχεδίαση και την ανάπτυξη του τηλεπικοινωνιακού συστήματος για την προτεινόμενη διάταξη μια σχετικά εύκολη και γρήγορη διαδικασία.

### 2.7.1 Το Υπολογιστικό Νέφος (Cloud Computing)

Το υπολογιστικό νέφος (Cloud Computing) αντιπροσωπεύει ένα μοντέλο εύκολης και on-demand πρόσβασης μέσω του Διαδικτύου σε ένα σύνολο κατάλληλα διαμορφωμένων υπολογιστικών πόρων, οι οποίοι είναι εύκολα προσβάσιμοι και διαχειρίσιμοι και με την ελάχιστη, ενδιάμεση αλληλεπίδραση από κάποια εταιρεία παροχής υπηρεσιών. Ως πόροι στο υπολογιστικό νέφος νοούνται τα δίκτυα, οι εξυπηρετητές, οι αποθηκευτικοί χώροι δεδομένων, οι εφαρμογές και οι υπηρεσίες [32]. Η ανάπτυξη του μοντέλου του υπολογιστικού νέφους βασίζεται σε τέσσερα μοντέλα ανάπτυξης και τρία μοντέλα υπηρεσιών, ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις του χρήστη – πελάτη.

#### Μοντέλα Υπηρεσιών

- Software as a Service (SaaS): Πρόκειται για τη δυνατότητα που δίνεται στον χρήστη να χρησιμοποιεί τις εφαρμογές του παρόχου που βρίσκονται και είναι διαθέσιμες σε υποδομή Νέφους. Η προσβασιμότητα στην εφαρμογή πραγματοποιείται από οποιαδήποτε συσκευή του χρήστη μέσω συγκεκριμένου σημείου διεπαφής, όπως για παράδειγμα μέσω web-based ηλεκτρονικού ταχυδρομείου, είτε μέσω προγράμματος. Ο χρήστης χρησιμοποιεί την εφαρμογή και μόνο, χωρίς να έχει δικαιώματα διαχείρισης και ελέγχου επί της υποδομής Νέφους, δηλαδή επί του δικτύου, των εξυπηρετητών, των λειτουργικών συστημάτων και των αποθηκευτικών χώρων [32].
- Platform as a Service (PaaS): Στο συγκεκριμένο μοντέλο υπηρεσίας, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει γλώσσες προγραμματισμού, βιβλιοθήκες, υπηρεσίες και διάφορα άλλα εργαλεία που παρέχονται και υποστηρίζονται από τον

πάροχο, προκειμένου να αναπτύξει ή και να αποκτήσει μια διαδικτυακή εφαρμογή. Όπως και στο προηγούμενο μοντέλο υπηρεσίας, ο χρήστης δεν έχει κανένα δικαίωμα διαχείρισης και ελέγχου επί των υποδομών του Νέφους. Δικαίωμα ελέγχου έχει μόνο στις εφαρμογές που αναπτύσσει ο ίδιος ο χρήστης και, υπό προϋποθέσεις, στις ρυθμίσεις διαμόρφωσης του περιβάλλοντος της υπό ανάπτυξη εφαρμογής [32].

- **Infrastructure as a Service (IaaS):** Στο τρίτο μοντέλο υπηρεσίας, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει βασικούς υπολογιστικούς πόρους, όπως τα δίκτυα, τις μονάδες αποθήκευσης και επεξεργασίας, προκειμένου να αναπτύξει και να εκτελέσει κάποιο λογισμικό. Το λογισμικό αυτό μπορεί να περιλαμβάνει το λογισμικό κάποιου λειτουργικού συστήματος ή κάποιας εφαρμογής. Ο χρήστης δεν έχει κανένα δικαίωμα διαχείρισης και ελέγχου επί των υποδομών του Νέφους. Ωστόσο, ο χρήστης ενδεχομένως να έχει δικαίωμα ελέγχου των λειτουργικών συστημάτων, των αποθηκευτικών χώρων και των υπό ανάπτυξη εφαρμογών και πιθανόν δικαίωμα περιορισμένου ελέγχου συγκεκριμένων διαδικτυακών στοιχείων, όπως για παράδειγμα επί του τείχους προστασίας (firewall) [32].

### Μοντέλα Ανάπτυξης

- **Private Cloud:** Η ανάπτυξη της υποδομής ενός ιδιωτικού Νέφους προορίζεται για χρήση αποκλειστικά και μόνο από έναν οργανισμό προς τους πελάτες του. Ο οργανισμός αυτός μπορεί να είναι ιδιοκτήτης αυτής της υποδομής και να τη διαχειρίζεται και να τη λειτουργεί σύμφωνα με τις ανάγκες του. Επίσης, η υποδομή μπορεί να βρίσκεται εντός ή εκτός των εγκαταστάσεων του οργανισμού [32].
- **Community Cloud:** Η υποδομή του Νέφους σε αυτή την περίπτωση προορίζεται για χρήση από ένα συγκεκριμένο τμήμα χρηστών κάποιων οργανισμών, οι οποίοι οργανισμοί έχουν κοινά ενδιαφέροντα, όπως θέματα ασφάλειας, πολιτικές και ζητήματα συμμόρφωσης. Δικαιώματα διαχείρισης, ιδιοκτησίας και λειτουργίας της υποδομής μπορούν να έχουν ένας ή περισσότεροι οργανισμοί που ανήκουν στην «κοινότητα» ή συνδυασμοί αυτών [32].

- **Public Cloud:** Πρόκειται για υποδομή Νέφους που απευθύνεται σε όλους και χρησιμοποιείται από όλους. Η υποδομή μπορεί να ανήκει και να τη διαχειρίζεται μια επιχείρηση, ένας ακαδημαϊκός ή κυβερνητικός οργανισμός ή συνδυασμός αυτών. Επίσης, η υποδομή βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του παρόχου [32].
- **Hybrid Cloud:** Πρόκειται για το συνδυασμό δύο ή περισσότερων διακριτών μεταξύ τους υποδομών Νέφους (private, community or public). Οι υποδομές που συμμετέχουν στον συνδυασμό παραμένουν ανεξάρτητες οντότητες. Το μόνο κοινό τους σημείο είναι η χρήση κοινής τεχνολογίας για τη μεταφορά δεδομένων και την φορητότητα των εφαρμογών [32].

Λόγω της φύσης των δεδομένων που θα παράγονται από την προτεινόμενη διάταξη ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης και που θα χρειαστεί να αποθηκευτούν για κάποιο χρονικό διάστημα, μια καλή και αποδοτική λύση θα ήταν η σχεδίαση και η ανάπτυξη ενός υπολογιστικού μοντέλου που θα βασίζεται σε μοντέλο ανάπτυξης Community Cloud και θα εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα του μοντέλου Infrastructure as a Service. Μέλη της κοινότητας θα είναι όλες οι αρμόδιες αστυνομικές αρχές και ο πάροχος καθολικής ταχυδρομικής υπηρεσίας. Στις μονάδες αποθήκευσης που θα ανήκουν στην υποδομή του Νέφους θα μπορούν να αποθηκεύονται τα δεδομένα που θα λαμβάνονται από την προτεινόμενη διάταξη που θα είναι εγκατεστημένη στα υπαίθρια γραμματοκιβώτια. Μέσω συγκεκριμένου σημείου διεπαφής και με συγκεκριμένα δικαιώματα πρόσβασης, αρμόδιοι, πιστοποιημένοι υπάλληλοι των αστυνομικών αρχών και του παρόχου καθολικής υπηρεσίας θα έχουν τη δυνατότητα να διαχειρίζονται και να επεξεργάζονται τα συγκεκριμένα δεδομένα.

### 2.7.2 Σενάριο Λειτουργίας

Ο συνδυασμός των υψηλών τηλεπικοινωνιακών ταχυτήτων και των οικονομικών λύσεων αποθήκευσης ικανοποιεί ένα από τα βασικά ζητούμενα της προτεινόμενης διάταξης. Ωστόσο, η έγκαιρη ενημέρωση και ειδοποίηση των αρμόδιων αστυνομικών αρχών και των υπεύθυνων της εταιρείας καθολικής ταχυδρομικής υπηρεσίας, σε περίπτωση ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης σε κάποιο υπαίθριο γραμματοκιβώτιο, αποτελεί ζήτημα ύψιστης προτεραιότητας. Τα δεδομένα που

ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Π.ΡΑΛΛΗ & ΘΗΒΩΝ 250, 122 44, ΑΙΓΑΛΕΩ, ΑΘΗΝΑ, ΕΛΛΑΔΑ

ΤΗΛ.: +30-210-5381311, MSCAUTO1@TEIPIR.GR

προκύπτουν από τις μετρήσεις της διάταξης αποστέλλονται μέσω ασύρματης επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο σε έναν κεντρικό εξυπηρετητή στο υπολογιστικό Νέφος, όπου αποθηκεύονται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, προκειμένου να υποστούν κάποιας μορφής επεξεργασία σε μεταγενέστερο χρόνο. Στην περίπτωση που υπάρξει ανίχνευση εκρηκτικής ύλης σε κάποιο ταχυδρομικό αντικείμενο, μαζί με την αποστολή των δεδομένων στον κεντρικό εξυπηρετητή, αποστέλλεται αυτόματα και ηλεκτρονικό μήνυμα σε προκαθορισμένες διευθύνσεις ηλεκτρονικού ταχυδρομείου ή και γραπτό μήνυμα σε κινητά τηλέφωνα των επικεφαλής των αρμόδιων αστυνομικών αρχών και των υπεύθυνων της εταιρείας καθολικής ταχυδρομικής υπηρεσίας. Το μήνυμα αυτό περιλαμβάνει στοιχεία σχετικά με τα αποτελέσματα της διαδικασίας ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης και του σημείου εντοπισμού της, δηλαδή τις συντεταγμένες (γεωγραφικό μήκος και πλάτος) του σημείου που βρίσκεται το υπαίθριο γραμματοκιβώτιο. Αμέσως μετά την ενημέρωση σχετικά με τον εντοπισμό ταχυδρομικού αντικείμενου που περιέχει εκρηκτική ύλη, λαμβάνουν χώρα όλες εκείνες οι ενέργειες από πλευράς αρμόδιων αστυνομικών αρχών σύμφωνα με την επίσημη διαδικασία που ακολουθείται σε αυτές τις περιπτώσεις.

### 2.7.3 Το Σύστημα Προσδιορισμού Γεωγραφικής Θέσης (Global Positioning System, GPS)

Το παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού γεωγραφικής θέσης GPS (Global Positioning System) χρησιμοποιεί έναν μεγάλο αριθμό δορυφόρων (αρχικά ο αριθμός τους ήταν 24, από το 1995 χρησιμοποιούνται για αυτό το σκοπό 31 δορυφόροι) και επίγειων σταθμών. Οι επίγειοι σταθμοί λειτουργούν ως σημεία αναφοράς, προκειμένου το σύστημα να μπορέσει να υπολογίσει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τη γεωγραφική θέση ενός σημείου. Η εξέλιξη των ολοκληρωμένων συστημάτων δίνει τη δυνατότητα εντοπισμού της γεωγραφικής θέσης ενός σημείου με ακρίβεια που φτάνει το ένα μέτρο. Ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος βασίζεται στη μέθοδο του «τριγωνισμού» (triangulation). Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, υπολογίζεται η απόσταση του σημείου από τρεις διαφορετικούς δορυφόρους, μετρώντας ουσιαστικά τον χρόνο που απαιτείται

για τη μετάδοση του ραδιοκύματος από το δορυφόρο προς το σημείο ενδιαφέροντος, αφού έχει προηγηθεί συγχρονισμός των ρολογιών του δορυφόρου και των δεκτών [33].

Όπως αναφέρθηκε λεπτομερειακά σε προηγούμενη ενότητα, ο μικροεπεξεργαστής Raspberry PI 3 model B+ έχει τη δυνατότητα να υποστηρίζει σύστημα GPS μέσω USB σύνδεσης. Για το σκοπό αυτό, το συγκεκριμένο μοντέλο του μικροεπεξεργαστή διαθέτει δύο ακίδες εισόδου / εξόδου γενικού σκοπού UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter), κατάλληλα διαμορφωμένες, στις οποίες προτείνεται να συνδεθεί ένα GPSmodule. Με τον κατάλληλο προγραμματισμό και την ενεργοποίηση προ-εγκατεστημένων εντολών από τις βιβλιοθήκες της εταιρείας, ο μικροεπεξεργαστής λαμβάνει, επεξεργάζεται και αποστέλλει την κατάλληλη χρονική στιγμή τα δεδομένα που αφορούν στις γεωγραφικές συντεταγμένες του γραμματοκιβωτίου [34] [35].

## 2.8 Κόστος Προτεινόμενης Διάταξης

Το κόστος της προτεινόμενης διάταξης μπορεί να αναλυθεί ουσιαστικά σε τρία επιμέρους, βασικά τμήματα: το κόστος της διάταξης ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης, συμπεριλαμβανομένου και του προ-συγκεντρωτή, το κόστος του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, που περιλαμβάνει τον μικροεπεξεργαστή και το GPSmodule και τέλος το κόστος του συστήματος τροφοδοσίας και αυτονομίας (διάταξη μπαταριών).

Στην πλειοψηφία τους, οι εταιρείες που κατασκευάζουν και εμπορεύονται φορητές, χειροκίνητες συσκευές που βασίζονται στην τεχνολογία φασματομετρίας κινητικότητας ιόντων (IMS) για ανίχνευση εκρηκτικής ύλης, περιλαμβάνουν κατάλληλες συστοιχίες μπαταριών που εξασφαλίζουν την αυτονομία των συσκευών για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Λαμβάνοντας αυτό το δεδομένο υπόψη, η τιμή μιας IMS συσκευής ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης αγγίζει το ποσό των 11.000 € περίπου [31], συμπεριλαμβανομένου και των συστοιχιών μπαταριών. Επιπλέον, η τιμή αγοράς του μικροεπεξεργαστή Raspberry PI 3 model B+ κυμαίνεται από 40 € έως 56 € το τεμάχιο [36][37]. Τέλος, η αγορά ενός συμβατού με τον συγκεκριμένο μικροεπεξεργαστή GPSmodule κυμαίνεται από 23 € έως 30 € ανά τεμάχιο, ενώ η τιμή

του μπορεί να μειωθεί στη τιμή των 24 € ανά τεμάχιο για αγορά άνω των 50 τεμαχίων [38] [39].

Στον Πίνακα 3 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι ενδεικτικές τιμές για τα τρία μέρη της προτεινόμενης διάταξης:

Τμήμα Διάταξης	Τιμή (€ / τεμάχιο)
Διάταξη IMS (+μπαταρίες αυτονομίας)	11.000
Μικροεπεξεργαστής Raspberry PI 3 model B+	40 ~ 56
GPS module	23 ~ 30
Σύνολο	11.063 ~ 11.086

Πίνακας 3: Ενδεικτικές τιμές για τα τρία τμήματα της προτεινόμενης διάταξης

Στο συνολικό κόστος θα πρέπει να προστεθεί και το κόστος που αφορά στη χρήση υποδομής χωρητικότητας του Υπολογιστικού Νέφους (Cloud Computing) που θα απαιτηθεί για την αποθήκευση των δεδομένων και την υλοποίηση της αντίστοιχης εφαρμογής επεξεργασίας αυτών. Για το σκοπό αυτό και προκειμένου να μειωθεί το συνολικό κόστος του εγχειρήματος, οι υπηρεσίες Νέφους που προσφέρει η Κοινωνία της Πληροφορίας (ΚτΠ Α.Ε.) [40] στο Ελληνικό Δημόσιο θα μπορούσαν να αποτελέσουν μία άριστη λύση.

Πιο συγκεκριμένα, η μη κερδοσκοπική εταιρεία του Δημοσίου, μετά από δεκαεπτά συναπτά έτη λειτουργίας της (έτος ίδρυσης 2001), έχει σήμερα να επιδείξει σημαντική εμπειρία και τεχνογνωσία στην υλοποίηση και διαχείριση συστημάτων και υποδομών Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών (ΤΠΕ) των φορέων της Δημόσιας Διοίκησης. Από το 2007, οπότε και ξεκίνησε η φιλοξενία και η υποστήριξη πληροφοριακών συστημάτων και εφαρμογών της Δημόσιας Διοίκησης σε δικό της Κέντρο Δεδομένων (Data Center), ξεκίνησε το σχεδιασμό και τελικά κατάφερε να φέρει εις πέρας με ασφάλεια και συνέπεια, τη λειτουργία του Government Cloud (G-Cloud), προσφέροντας ουσιαστικές και αποδοτικές υπηρεσίες Νέφους στους δημόσιους φορείς. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα εργαλείο στρατηγικού εκσυγχρονισμού, καινοτόμο και πρωτοποριακό, που κατατάσσει την Ελλάδα μεταξύ



των τεσσάρων χωρών – μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης (μαζί με την Εσθονία, την Ισπανία και το Ηνωμένο Βασίλειο) που διαθέτουν κάτι παρόμοιο, με στόχο τη βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών του δημόσιου τομέα προς τους πολίτες και τις επιχειρήσεις [40] [41].

Η λειτουργία του G-Cloud βασίζεται στην κοινή χρήση υπολογιστικών υποδομών από υπηρεσίες και φορείς της Δημόσιας Διοίκησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους κτήσης, συντήρησης και υποστήριξης των υποδομών αυτών για τις δημόσιες υπηρεσίες και τους δημόσιους φορείς, με ταυτόχρονη αύξηση του βαθμού ευελιξίας και ασφάλειάς τους. Το σύνολο των ψηφιακών υπηρεσιών που προσφέρονται σήμερα μέσω του G-Cloud είναι υψηλών προδιαγραφών και προκαθορισμένης ποιότητας (Service Level Agreement, SLA), αναπτυγμένες κυρίως στο μοντέλο του ιδιωτικού νέφους (Private Cloud) και βασισμένες σε υποδομές τελευταίας τεχνολογίας, όπως οι υποδομές υπολογιστικού νέφους και εικονικοποίησης (Cloud Computing και Virtualization). Οι υπηρεσίες και οι φορείς του δημοσίου που συνδέονται στο G-Cloud έχουν τη δυνατότητα να επωφεληθούν από τα πλεονεκτήματα της υπηρεσίας IaaS (Infrastructure as a Service), χρησιμοποιώντας όσες εικονικές μηχανές (virtual machines, VMs) απαιτούν οι ανάγκες τους, μέσω εύελικτων μεθόδων πρόσβασης και χωρίς να επωμισθούν το κόστος προμήθειας του απαραίτητου εξοπλισμού (υλικού και λογισμικού) [40].

Με δεδομένη λοιπόν την χαμηλού κόστους χρήση των υπηρεσιών G-Cloud, η εκτιμώμενη τιμή υλοποίησης της διάταξης ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης που αναλύεται την παρούσα διατριβή, κυμαίνεται στην τιμή που αναφέρεται στον Πίνακα 3.

### **3. Αναμενόμενα Αποτελέσματα - Βελτιώσεις**

#### **3.1 Αναμενόμενα αποτελέσματα χρήσης της διάταξης**

Η προτεινόμενη διάταξη ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης σε ταχυδρομικά αντικείμενα που ρίπτονται σε υπαίθρια γραμματοκιβώτια σίγουρα αποτελεί μια καινοτομία, η οποία έχει σκοπό να ελαχιστοποιήσει ή ακόμα και να εξαλείψει τις αρνητικές συνέπειες μιας ενδεχόμενης έκρηξης. Κανείς δεν μπορεί να αμφισβητήσει

ότι η απώλεια αθώων, ανθρώπινων ζώων είναι το χειρότερο ενδεχόμενο που μπορεί να συμβεί σε μια τέτοια περίπτωση. Δεδομένου της ασταθούς και μη προβλέψιμης συμπεριφοράς των εκρηκτικών υλών, τις περισσότερες φορές θύματα είναι απλοί, διερχόμενοι, αθώοι πολίτες ή και οι υπάλληλοι του παρόχου ταχυδρομικών υπηρεσιών, που απλώς εκτελούν τα καθήκοντά τους στο πλαίσιο της καθημερινής εργασίας τους. Το αίσθημα του φόβου και του πανικού και η έλλειψη ασφάλειας που διακατέχει όλους τους πολίτες μετά από ένα τόσο δυσάρεστο γεγονός, που προκαλείται με τόσο άσχημο και βίαιο τρόπο, έχει άμεσες συνέπειες στη ψυχολογία και στον τρόπο που λειτουργούν καθημερινά για μεγάλο χρονικό διάστημα μετά το συμβάν. Ακόμα όμως και σε περιπτώσεις τραυματισμών, οι συνέπειες μπορεί να είναι εξίσου δυσάρεστες, αν αναλογιστεί κανείς ότι υπάρχουν περιπτώσεις σοβαρών ή και μόνιμων σωματικών βλαβών.

Πέρα των πιθανών απωλειών αθώων, ανθρώπινων ζώων και σοβαρών τραυματισμών που ενδεχομένως προκληθούν και που σαφώς θα πρέπει η αποφυγή τους να αποτελεί πρώτη προτεραιότητα για όλους τους αρμόδιους, τεράστιου κόστους συνέπειες είναι και οι υλικές ζημιές που θα δημιουργηθούν στις εγκαταστάσεις και στα μέσα του παρόχου ταχυδρομικών υπηρεσιών. Γραμματοκιβώτια, οχήματα που μεταφέρουν σάκους με ταχυδρομικά αντικείμενα, μηχανές αυτόματης διαλογής που κοστίζουν τεράστια χρηματικά ποσά μπορούν να καταστραφούν μερικώς ή ολικώς, ενώ απαιτούνται εξίσου μεγάλα ποσά για την επισκευή ή την αντικατάστασή τους. Επιπλέον, θα πρέπει να υπολογισθεί η οικονομική ζημία που θα επιφέρει στην εταιρεία παροχής ταχυδρομικών υπηρεσιών η καταστροφή μέρους του εξοπλισμού της και η επίδραση που θα έχει μια ενδεχόμενη διακοπή της εύρυθμης λειτουργίας της στην παροχή υπηρεσιών προς τους πολίτες. Τέλος, άμεση συνέπεια όλων αυτών θα είναι και το πλήγμα του κύρους της εταιρείας παροχής ταχυδρομικών υπηρεσιών.

Η χρήση της διάταξης ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης που θα τοποθετηθεί καταλλήλως στο εσωτερικό του υπαίθριου γραμματοκιβωτίου μπορεί να αυξήσει κατά πολύ τις πιθανότητες αποφυγής μιας ενδεχόμενης έκρηξης και όλων των αρνητικών συνεπειών της. Πρωτίστως, προφυλάσσεται η ανθρώπινη ζωή και αποφεύγονται σοβαροί ή και μόνιμοι τραυματισμοί αθώων πολιτών. Οι υλικές καταστροφές

προλαμβάνονται και σίγουρα περιορίζονται σε ένα και μόνο σημείο: στο υπαίθριο γραμματοκιβώτιο όπου τοποθετήθηκε το ταχυδρομικό αντικείμενο που περιέχει την εκρηκτική ύλη. Πολύ μεγάλο και σημαντικό ρόλο, επίσης αναμένεται να έχει η χρήση της διάταξης στην έγκαιρη και άμεση ενημέρωση και ειδοποίηση των αρμόδιων αστυνομικών αρχών. Σε μια τέτοια περίπτωση, το δείγμα της εκρηκτικής ύλης θα παραμείνει αναλλοίωτο, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την ακριβέστερη εξέταση, ανάλυση και ταυτοποίησή του, λαμβάνοντας ταυτόχρονα και άλλες πολύ χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο παρασκευής του. Επιπλέον, δεν καταστρέφονται άλλα χρήσιμα στοιχεία, όπως δαχτυλικά αποτυπώματα που πιθανόν να βρίσκονται πάνω στο ταχυδρομικό αντικείμενο και θα μπορέσουν να οδηγήσουν στην ταυτοποίηση των επίδοξων τρομοκρατών.

### 3.2 Μελλοντικές Βελτιώσεις

Η συνεχώς αυξανόμενη χρήση εκρηκτικών υλών σε τρομοκρατικές επιθέσεις ενισχύει την απαίτηση για αποδοτικούς και όσο το δυνατόν έγκαιρους τρόπους ανίχνευσής τους και άμεσης ειδοποίησης των αρμόδιων αρχών. Οι επιστημονικές ομάδες σε ολόκληρο τον κόσμο αναλύουν και μελετούν τη χημική συμπεριφορά των υλών αυτών, με σκοπό να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν διατάξεις βασισμένες σε νέα δεδομένα, ώστε να επιτύχουν ακόμα πιο αξιόπιστα και ευαίσθητα όργανα ανίχνευσης εκρηκτικών υλών. Μια εξίσου ενδιαφέρουσα πρόκληση σε αυτόν τον επιστημονικό τομέα αποτελεί και η επιτυχής ανίχνευση εκρηκτικών υλών που βρίσκονται σε απειροελάχιστες ποσότητες.

Άλλες καινούργιες και αρκετά υποσχόμενες μέθοδοι ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης που βρίσκονται σε ερευνητικό στάδιο περιλαμβάνουν τη χρήση χημικών αισθητήρων φθορισμού [42]. Στη συγκεκριμένη μελέτη, παρουσιάζεται λεπτομερειακά η δοκιμή ενός νέου υλικού φθορισμού (πολυμερές φιλμ) και τα αποτελέσματα των πειραμάτων που διεξήχθησαν για την ανίχνευση εκρηκτικών υλών. Πιο συγκεκριμένα, αναλύεται η μικροδομή του πολυμερούς φιλμ, εξετάζεται η σταθερότητα που

παρουσιάζει το φιλμ παρουσία ροής αέρα και ερευνάται η σχέση της μικροδομής και της απόδοσης του υλικού ανάλογα με τις μεθόδους επίστρωσης του φιλμ.

Σε μια δεύτερη μελέτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας έρευνας μέτρησης της αποτελεσματικότητας της εκρόφησης πηγών laser στην κλίμακα των picoseconds και nanoseconds [43]. Σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης είναι να εξεταστεί η πιθανότητα δημιουργίας μιας συσκευής δειγματοληψίας για την ανίχνευση εκρηκτικών υλών, η οποία θα μπορεί να λειτουργεί απομακρυσμένα και χωρίς επαφή. Η λειτουργία της συσκευής βασίζεται στις αρχές της φασματομετρίας κινητικότητας ιόντων (IMS) και της ασύμμετρης φασματομετρίας κινητικότητας ιόντων (FAIMS). Για τα πειράματα της συγκεκριμένης έρευνας χρησιμοποιήθηκε ένα υπόστρωμα χαλαζία ως πηγή εκρόφησης laser.

Σε μια τρίτη μελέτη παρουσιάζεται η ταυτόχρονη ανίχνευση και διάκριση πέντε διαφορετικών ειδών εκρηκτικών υλών με μια ειδικά κατασκευασμένη διάταξη κβαντικών κουκίδων [44]. Σε αυτή τη διάταξη συνδυάζονται στοιχεία πίνακα με μια απλή, «πολυ-κάναλη» (multichannel) πλατφόρμα, τα αποτελέσματα του οποίου είναι γρήγορα και απαιτούν πολύ μικρή ποσότητα δείγματος. Πιο συγκεκριμένα, η μέθοδος αυτή χρησιμοποίησε κουκίδες κβαντισμού (quantum dots) ως ανιχνευτές που εκπέμπουν φως σε μια πλατφόρμα, όπου εισάγονται ταυτόχρονα πέντε διαφορετικά είδη εκρηκτικής ύλης μέσω αντίστοιχων υποδοχέων. Με τη χρήση ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος προκαλείται η διέγερση των κουκίδων κβαντισμού, οι οποίες εκπέμπουν διαφορετικό χρώμα φωτός. Η αλληλεπίδραση των υποδοχέων με τα εκρηκτικά οδηγεί στην μεταβολή της απόσβεσης των κβαντικών κουκίδων.

Σε όλη αυτή την εξέλιξη στον τομέα της ανίχνευσης εκρηκτικών υλών δεν θα μπορούσε να μην έχει συμμετοχή η επιστήμη της νάνο-τεχνολογίας. Επιστήμονες από το Πανεπιστήμιο του Tel Aviv στο Ισραήλ, συνεργάστηκαν και κατάφεραν να σχεδιάσουν και να κατασκευάσουν ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα [45], το οποίο αποτελεί μια εξαιρετικά ευαίσθητη και ιδιαίτερα επιλεκτική πλατφόρμα, που έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει, να διακρίνει και να ταυτοποιήσει εκρηκτικά, χημικά είδη. Η λειτουργία της πλατφόρμας βασίζεται στη χρήση συστοιχιών μεγάλης κλίμακας ηλεκτρικών νάνο-αισθητήρων, οι οποίοι παρουσιάζουν υψηλή απόδοση.

Παράλληλα με την πρόοδο των ερευνών και την ανάπτυξη των εφαρμογών στον τομέα της φασματομετρίας, ραγδαία είναι η εξέλιξη και στο χώρο των τηλεπικοινωνιών. Οι δυνατότητες του μικροεπεξεργαστή που προτείνεται για τη διάταξη μπορούν να χρησιμοποιηθούν καταλλήλως και να υλοποιήσουν ακόμα περισσότερα σενάρια λειτουργίας. Μια τέτοια περίπτωση θα μπορούσε να είναι η αποστολή φωτογραφιών των ύποπτων ταχυδρομικών αντικειμένων σε πραγματικό χρόνο, ώστε να υπάρχουν περισσότερα στοιχεία σε ενδεχόμενη ανίχνευση εκρηκτικής ύλης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] <http://www.cnn.gr/news/ellada/story/41471/vomves-paketo-to-delivery-toy-tromoy>
- [2] <http://www.cnn.gr/news/ellada/story/72247/ekrixi-sto-dnt-to-dema-vomva-eixe-os-apostolea-ton-vasili-kikilia>
- [3] <https://athens.indymedia.org/post/800375/>
- [4] ZbigniewBielecki, Jacek Janucki, Adam Kawalec, JanuszMikolajczyk, Norbert Palka, Mateusz Pasternak, Tadeusz Pustelny, Tadeusz Stacewicz, Jacek Wojtas, “Sensors and Systems for the Detection of Explosive Devices-An Overview”, Metrology and Measurement Systems, Index 330930, ISSN 0860-8229, Vol. XIX (2012), No. 1, pp3-28.
- [5] R. Cumeras, E. Figueras, C.E. Davis, J.I. Baumbach, I. Gracia, “Review on Ion Mobility Spectrometry. Part 1: Current Instrumentation”, HHS Public Access, 2015 March 7;140(5): 1376-1390. doi:10.1039/c4an01100g.
- [6] Larry Senesac & Thomas G. Thundat, “Nano sensors for trace explosive detection”, Materials Today, March 2008, vol. 11, number 3.
- [7][http://www.sandia.gov/research/research\\_foundations/bioscience/\\_assets/documents/Fact\\_Sheets/21MS-17.pdf](http://www.sandia.gov/research/research_foundations/bioscience/_assets/documents/Fact_Sheets/21MS-17.pdf)
- [8] [http://www.eln.teiste.gr/sites/default/files/HL\\_DIAT\\_FASM.pdf](http://www.eln.teiste.gr/sites/default/files/HL_DIAT_FASM.pdf)
- [9] RobertoFernández-Maestre, “Ion Mobility Spectrometry: History, Characteristics and Applications”, Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 15(2): 467 - 479, 2012.
- [10] Γεωρ. Αλεξίου, Καθ. Τμήμ. Μηχανικών Η/Υ & Πληροφορικής Πανεπ. Πατρών, “Μικροεπεξεργαστές”, ISBN: 960-538-197-4, Κωδικός Έκδοσης: ΠΛΗ 21/3, ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ.
- [11] <https://www.raspberrypi.org/blog/raspberry-pi-3-model-b-plus-sale-now-35/>
- [12] [www.maxlinear.com/maxlinears-mxl7704-power-management-ic-powers-the-raspberry-pi-3-model-b/](http://www.maxlinear.com/maxlinears-mxl7704-power-management-ic-powers-the-raspberry-pi-3-model-b/)
- [13] <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- [14] <https://www.cnx-software.com/2016/02/29/raspberry-pi-3-board-is-powered-by-broadcom-bcm2827-cortex-a53-processor-sells-for-35/>
- [15] <https://www.raspberrypi.org/products/poe-hat/>
- [16] <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-universal-power-supply/>
- [17] <https://www.raspberrypi.org/documentation/installation/noobs.md>
- [18] <http://raspbian.org/>
- [19] <https://wiki.cdot.senecacollege.ca/wiki/Pidora>

- [20] [www.libreelec.tv](http://www.libreelec.tv)
- [21] [www.osmc.tv](http://www.osmc.tv)
- [22] [www.riscosopen.org](http://www.riscosopen.org)
- [23] [www.archlinuxarm.org](http://www.archlinuxarm.org)
- [24] <https://www.raspberrypi.org/blog/introducing-raspberry-pi-model-b-plus/>
- [25] <https://pinout.xyz/>
- [26] <http://www.cypress.com/file/358916/download>
- [27] [blog.pimoroni.com/a-deep-dive-into-the-raspberry-pi-3-b-hardware/](http://blog.pimoroni.com/a-deep-dive-into-the-raspberry-pi-3-b-hardware/)
- [28] <http://raspi.tv/2018/new-raspberry-pi-model-3b-1-4-ghz-330mbit-ethernet-802-11ac-poe>
- [29] <https://www.microchip.com/wwwproducts/ProductCompare/LAN7515/LAN9514>
- [30] <http://www.cypress.com/file/103041/download>
- [31] U.S Department of Homeland Security, “Portable Ion Mobility Spectrometry (IMS), Chemical Agent Detectors, Market Survey Report”, December 2013.
- [32] National Institute of Standards and Technology (NIST), U.S. Department of Commerce, “NIST Cloud Computing Standards Roadmap”, Special Publication 500-291, ver. 2, July 2013.
- [33] <http://hmg.gr/storehouse/word-acrobat/GPS.pdf>
- [34] <https://www.raspberrypi.org/forums/viewtopic.php?t=203410>
- [35] <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/raspberry-pi-3-gps-module-interfacing>
- [36] <https://nettop.gr/index.php/raspberry-pi/kit-plaketes/raspberry-pi-3-modelb-plus.html?src=raspberrypi>
- [37] <http://export.farnell.com/raspberry-pi/rpi3-modbp-starter/raspberry-pi-3-model-b-starter/dp/2848199>
- [38] [www.gearbest.com/raspberry-pi/pp\\_436481.html](http://www.gearbest.com/raspberry-pi/pp_436481.html)
- [39] [www.seeedstudio.com/Raspberry-PI-GPS-Module-p-2731.html](http://www.seeedstudio.com/Raspberry-PI-GPS-Module-p-2731.html)
- [40] <http://www.gcloud.ktpae.gr>
- [41] “Security Framework for Governmental Clouds”, ISBN 978-92-9204-115-1 doi: 10.2824/57349, February 2015.
- [42] Damien Rembelski, Jeremy Bordet, Quentin Brouard, Benoit Minot, ChristelleBarthet, Celine Frenois, “Fluorescent sensing for nitrated compounds: Study of the sensor microstructure for on explosive detection”, Science Direct, Eurosensors 2015, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.680.



[43] A.A. Chistyakov, G.E. Kotkovskii, I.P. Odulo, E.M. Spitsyn, A.V. Shestakov, “A method of highly sensitive detecting of explosives on the basis of FAIMS analyzer with laser ion source”, Science Direct, Elsevier B.V., doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.329.

[44] William J. Peveler, Alberto Roldan, Nathan Hollingsworth, Michael J. Porter, Ivan P. Parkin, “Multichannel Detection and Differentiation of Explosives with a Quantum Dot Array”, DOI: 10.1021/acsnano.5b06433, ACS Nano 2016, 10, 1139-1146.

[45] Amir Lichtenstein, Ehud Havivi, Ronen Shacham, Ehud Hahamy, RonitLeibovich, Alexander Pevzner, Vadim Krivitsky, Guy Davivi, Igor Presman, RoeyElnathan, Yoni Engel, Eli Flaxer, Fernando Patolsky, “Supersensitive fingerprinting of explosives by chemically modified nanosensors arrays”, Nature Communications, Macmillan Publishers Limited, DOI: 10.1038/ncomms5195, 2014.

# A Device for Explosive Materials Detection on Postal Objects in Outdoor Mailboxes for Citizen Protection

MARIA SPYROPOULOU

Department of Automation Engineering  
Piraeus University of Applied Sciences  
P. Ralli & Thivon 250, Athens, 12244  
GREECE

Email Address: mspyropo1995@gmail.com

*Abstract:* The increase in terrorist attacks at a global level has dramatically changed the way people live. New forms of terrorism have emerged, changing the everyday lives of ordinary citizens, who are often the "collateral losses" of these acts. In particular, the sending of "terror-packs" to target persons has highlighted the security gap in the provision of postal services and, in particular, the risk faced by both the universal service provider employees and the ordinary citizens, since the behavior of an explosive device is unpredictable even when it is simply moved or placed somewhere. Moreover, the inability of the postal provider to identify the sender and track simple postal items (PRIORITY B letter mail) that are dropped in outdoor mailboxes is another weapon in the hands of terrorists. This dissertation will present the design study of an explosive detection system contained in a postal item dropped in an open mailbox. In addition, it describes the way in which the provision and timely notification of the competent authorities and services are provided for their immediate intervention in order to avoid the extension of the damage. The permanent installation of such a system in outdoor mailboxes can focus primarily on the protection of human life and, secondarily, on the timely and immediate mobilization of competent authorities and services in case of detection of suspicious postal items, something that will be a pioneering initiative for Greece. These two points are also the purpose of this dissertation, in an attempt to use technologically advanced applications to contribute to safety and avoid human losses and material damage. In the main part of the dissertation the design criteria of the proposed system, sensor devices, the microprocessor, the supply and autonomy devices and the communication device are analyzed. The way of operation and the communication environment with the competent authorities and services are presented in detail through the description of the operating scenario. In addition, the dissertation will include financial and technical data concerning the operation and installation costs of the proposed system in outdoor mailboxes. The study is completed by recording the conclusions that the system is expected to use.

*Key Words:* explosives, ion mobility spectrometry, outdoor mailboxes, sensing detection device

## 1. Introduction

In recent years, humanity has witnessed many, bloody and fatal terrorist attacks, thus in many cases the victims are innocent, unsuspecting citizens. Busy places where celebrations and anniversaries take place, rail stations and airports are the first choices of terrorists to hit and cause as many losses as possible. Lately, another method of terrorism to which terrorists are particularly preoccupied with is the sending of "terror-parcels". This is the sending of postal items that contain an explosive device or explosives. In this case, the target can only be the person - recipient of the parcel or letter. However, no one can rule out the possibility of serious injury or contamination of those involved in the process of

collecting and distributing postal items. Terrorists, exploiting the anonymity offered by the simple mail order process, throw the "terror-parcels" in outdoor mailboxes, from which they are then collected according to the universal service provider's collection procedures and forwarded to their final destination. In the past, these acts of terrorist organizations have been repeated many times, sometimes successfully and sometimes not.

## 2. Laboratory Tests

The competent departments of the Greek Police carry out a thorough investigation and thoroughly check that any trace of explosive material is seized or is in explosive remnants to identify its nature, determine its type and chemical composition, be

characterized (whether it is a military explosive or non-class, specialized, low or high power) and to make a first risk assessment. The analytical chemistry sector has a wide range of specialized and reliable methods and devices that help identify the main components of explosives even when the explosive is a mixture of different components and the sample is in very limited quantities. Also, explosion product residues remain intact, which remain unchanged after the explosion and are attached to fragments of the explosive device or materials around the point of the explosion.

In general, and in the case of a non-exploded explosive sample test, the usual analytical process involves an initial stage of separation of its components in organic and inorganic products. Subsequently, the components of the mixture and their identification are categorized. At this stage, the specialized methods and special devices used are based on the fact that each category of component of an explosive has a different degree of solubility in water and other organic solvents.

A similar procedure shall be followed by the competent police departments and in the case where the sample to be tested is derived from explosive remnants attached to fragments of explosive material or materials at the point of explosion. However, the procedure of washing the sample with organic solvents and water is preceded in order to obtain the organic and inorganic components. Then, there is an interfering method of cleaning the samples from impurities. The sample can now be inserted for separation and identification of its components, as in the previous case.

To achieve all of the above, conventional gas and liquid chromatography mass spectrometry devices, as well as other, highly sensitive sensors, are used. From the results of these tests, it is possible to study precisely the qualitative and quantitative composition of the explosive, even when the available quantity of the sample is too small [1].

### **3. Techniques for Detecting Excitable Explosive Mechanisms**

Nowadays, new forms of terrorist attacks have proved to be more dangerous and more sophisticated, since even remote control methods of the improvised explosive mechanism, which is easily achieved through a common mobile phone device, are also used. An improvised explosive device is essentially an improvised explosive charge. The main part is the detonator, which can be either home-made or professional.

Activating the detonator requires the presence of explosives. An improvised explosive may be any chemical compound or mixture of chemical compounds, which under certain conditions may cause a reaction that leads to an explosion. The main components of an improvised explosive are inorganic salts that contain bonded oxygen molecules, such as nitrate, chlorate, perchloric acid or organic nitrate compounds or peroxides [2].

Today, more than a hundred types of military and commercial explosives are found. For their detection some specific characteristics are used, which are:

- Geometry - the metallic substance of the detonator can be detected by image and / or shape analysis,
- Density of material - the density of explosive materials is higher than most organic materials,
- Elementary composition - refers to methods of analysis of emitted vapors,
- Vapor emission – e.g. Specific chemical elements and their compounds, such as nitrogen, can be detected in a vapor sample.

The methods for detecting improvised explosive devices are divided into two categories: Mass Explosive Detection and Explosive Trace Detection. In the case of Mass Detection, the mass of the explosive material is directly detected macroscopically, usually by viewing images from X-Ray scanners or other similar equipment. In the case of Trace Explosive Detection, the explosive is detected by the chemical identification of its microscopic residues. These residues may be either in the form of particles or in the form of gaseous molecules or in both of these forms.

The purpose of the mass detection method is to detect large quantities of explosives. On the other hand, gas detectors have the ability to detect quantities of less than one microgram. Hydrogen, nitrogen, carbon and oxygen are the main ingredients of an explosive.

Explosive concentrations are classified into three basic groups, according to the steam pressure they present: High, Medium and Low Vapor Pressure (Figure 1) [2].

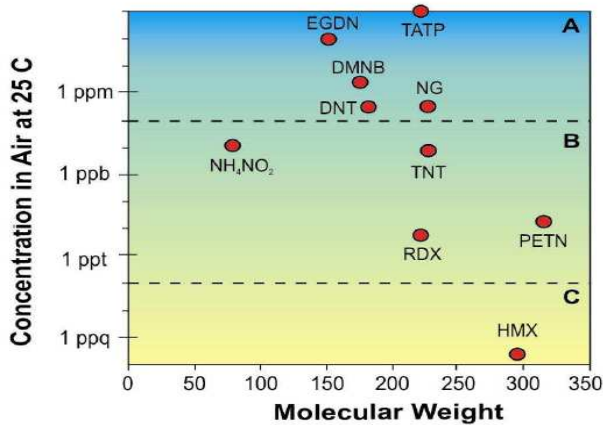


Fig. 1: Vapor concentration of explosives [2]

### 3.1 Bulk Detection Systems

The development of techniques based on X-rays, gamma rays, infrared rays, etc. have contributed to the effective detection of weapons and explosive devices. Briefly, the methods used for mass detection include:

- X-ray and gamma ray systems,
- Neutron methods
- Electromagnetic Systems.

The mass detection method is not applicable for direct scanning in humans, as it is likely to cause health problems.

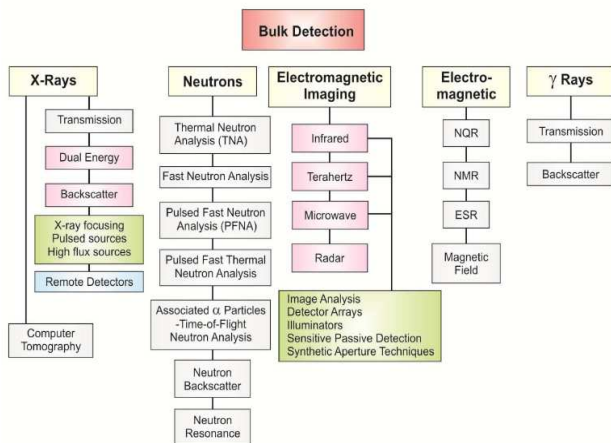


Fig.2: Overview bulk detection of explosives [2]

### 3.2 Trace Detection Methods

The methods by which vapors are detected are non-invasive and rely on the measurement of traces of certain specific characteristics of volatile compounds that evaporate from explosives. The degree of volatility varies from explosive to explosive. Volatility is a size characterized by the concentration of saturated vapor near the surface of

the explosive. For the detection of vapors and traces of explosives, the following types of sensors are used:

- Electronic - Chemical sensors,
- Optical sensors,
- Biosensors [2].

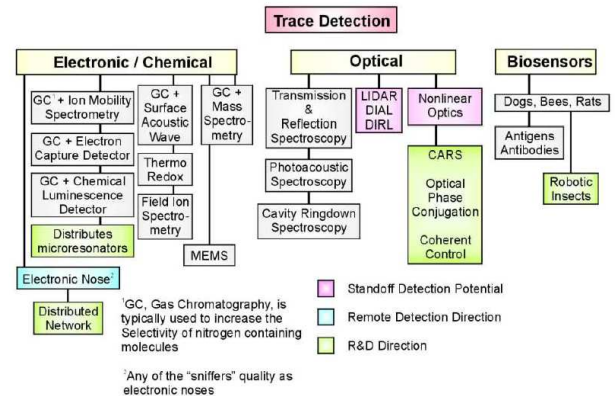


Fig. 3: Overview traces detection of explosives [2]

### 4. Operating Principle of the Ion Mobility Spectrometer

The mobile phase switch is essentially represented by four sub-sections illustrated in Figure 4 and is as follows: i. Sample Introduction System (SIS), ii. Ionization Region, iii. Separation Region (where separation or selection takes place) and iv. Detection Region.

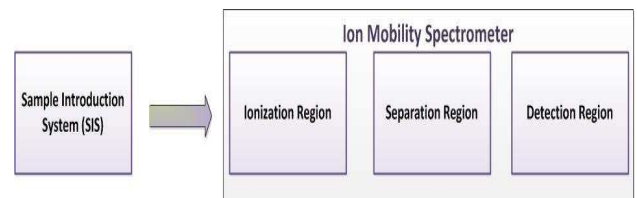


Fig. 4: Elements of an Ion Mobility Spectrometer [3]

Initially and before the ionization process begins, the sample should be inserted into the device. The process by which a small but representative fraction of an unknown gas mixture is bound to be introduced into the apparatus is called "sampling". The composition of this small fraction should represent as much as possible the average composition of the material or population volume. Prior to initiating the actual sample analysis and recording measurements and results, the calibration of the device should be preceded. For the introduction of a gas, liquid or solid calibration sample into an ion mobility spectrometer, a plurality of devices are used, including permeation tubes, purge vessels and dilution glass flasks, central

probes, pyrolyzers, evaporation units, membrane-inlet systems, thermal desorption units, solid phase micro-extraction units, Stir-bar sorptive extractors, chromatographic columns and supercritical fluid chromatographs. These devices are some of the most widely used SISs because of their low price and ease of operation and their primary role is to convert liquid or solids to volatile analyzers before they are identified. Essentially, the sample input system determines to a very large extent the potential of analyzing of an IMS instrument. Key factors for the proper selection of the sample input system are the analytical substance, the sensitivity and the selectivity required. In addition, potential interferences that may be caused during measurements such as those that may be caused by humidity or the presence of some foreign chemical compounds that are as volatile as the test substance at the same temperature can be minimized if the appropriate sample system is selected. Cost is another important factor that should be taken into account when selecting the sample input system.

Sample analysis using ion mobility spectroscopy alone cannot be considered as reliable since many measurement results based solely on this method have proved to be inadequate. The main reasons why the exclusive use of this method is considered to be insufficient is the frequent overlapping of the peaks and the tendency for the ions to interact with each other in the area of ionization. In order to address these problems, the substances to be analyzed are separated before being introduced into the spectrometer and this is achieved by combining different techniques. For example, analysis of the ion mobility spectrometer is improved using a coupled chromatographic column. Also, real-time monitoring of specific volatile analytic compounds is accomplished using a solid phase extraction unit in combination with a spectrometer. Electro spray ionization (ESI) systems and laser-assisted laser ionization systems assisted by matrix material (Matrix-Assisted Laser Desorption Ionization, MALDI) have the greatest advantages, as both are able to analyze high molecular weight compounds and thermally unstable compounds.

Radioactive Atmospheric Pressure Chemical Ionization (R-APCI) is the most common ionization method in an ion mobility spectrometer. A source of this type of ionization is a  $\beta$ -source radioactive isotope, such as a small Ni-63 sheet. Other elements that have been used as sources of radioactive isotope are tritium (T or  $H^3$ ,  $\beta$ -radioactive isotope of hydrogen H) and dietary dioxide ( $Am^{241}$ ). Another method of ionization is photon ionization, which takes place at atmospheric pressure (Atmospheric

Pressure Photo Ionization, APPI) and is based on ultraviolet light (UV). The Corona Discharge Atmospheric Pressure Chemical Ionization (Corona Discharge Atmospheric Pressure Chemical Ionization, CD-APCI) is another technique of chemical ionization. This technique uses a high voltage electric field, which develops between a needle or a very thin cable and a metal plate or discharge electrode. Finally, Laser Desorption Ionization (LDI) is used as the source of ionization. The ionization method to be used determines whether nitrogen and oxygen will be ionized. In this case, the positive and negative ions of nitrogen and oxygen ( $N_2^+$  και  $O_2^-$ ) react with water vapor molecules. This results in ions ( $(H_2O)_n(H_3O)^+$  and  $O_2^-(H_2O)_n$ ) being formed, which are called reacting ions. Spectroscopy shows the peaks of these ions, called Reactant Ion Peak (RIP). Also, there are the potential to form other ion groups, such as  $(H_2O)_nNH_4^+$ , the tops of which may be depicted in the mobility spectrum as small peaks of ammonia groups. The peaks of these compounds appear before the reactive ion peaks (RIPs) and are called pre-RIP.

Charging a sample molecule M can be ionized either positively ( $M^+$ ) or negatively ( $M^-$ ). Possibly, the molecule, after its positive or negative charge, may participate in various reactions. However, the most interesting reactions involved are those taking place with the neutral molecules that lead to the formation of monomeric compounds ( $MH^+$ ,  $(M-H)^-$  or  $MO_2^-$ ), and those leading in the formation of dimers ( $M_2H^+$ ) or trimers ( $M_3H^+$ ) at high concentrations of the analyte. These coupling reactions should also include those resulting from the induction of hydration reactions which lead to the formation of ion clusters, such as  $M^\pm(H_2O)_n$  [3].

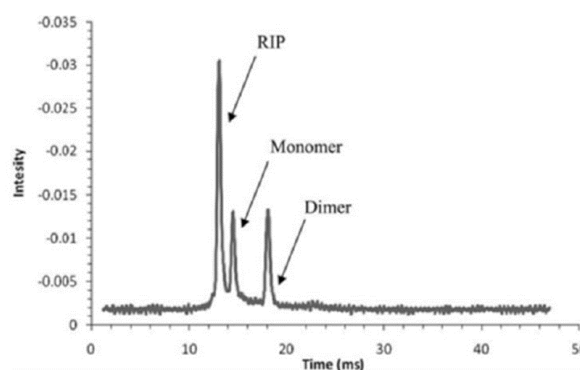


Fig. 5: Typical IMS chromatogram showing the reactant ion peak (RIP), monomer and dimer [3].

Since it goes through the procedure of alignment with the corresponding section of the lens, it is

guided in the next part of the device, which is the drift or partition or drift tube. Applying an intermediate step between the ionization and segregation sections was considered necessary in some spectrometer devices to provide a more efficient and efficient focusing of the ions before they enter in the separation section. Two different ion gate systems are used for this purpose: the Bradbury-Nielson gate (BNG) and the Tyndall (TG) gate. The principle of operation of these portal systems is based on the creation of an electric field between two rows of fine wires, which are located scattered and submerged along the deflection tube. For moving the ions into the diverting tube, a gaseous medium is used. The movement of the ions and the gaseous medium into the deflection tube is achieved due to the effect of an electric field  $E$ . In their movement, the ions accelerate due to the Coulomb forces exerted and slow down due to inevitable collisions with the gaseous molecules. When the ions are in equilibrium they move in the same direction on average with a constant displacement velocity  $v_d$ , which is proportional to the electric field:  $v_d = K * E$ . The intensity of the electric field differs from device to device.

For the last portion of an IMS spectrometer, which is the detector, a Faraday plate (Faraday's plate) is usually used. The use of the Faraday plate is done in conjunction with an aperture grid. The sizes measured at the detector output require amplification before being sent to an automatic logger. There, with the use of appropriate software, the data is stored and ready for editing. It is common for the output data to be current intensity values. Thus, the ion mobility spectrum is represented by a graph of the ionic current intensity as a function of the deflection time, i.e. the time required for the ion, once it passes the ion gate, to reach the detector portion [3].

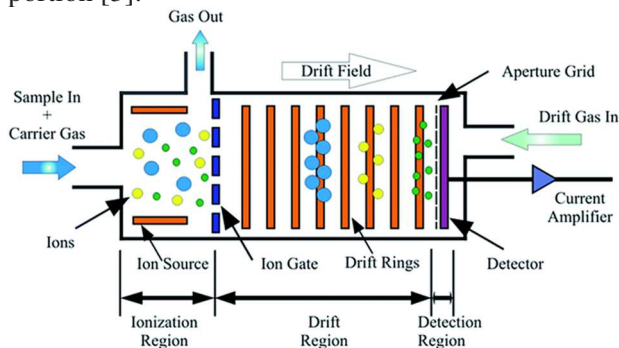


Fig.6: Schematic of a conventional drift time IMS (DTIMS) system [3]

## 4.1 Physical and Chemical Properties of Explosive Substances

Physical and chemical properties of explosive materials are the key elements of the traceability detection process. Explosives are essentially some chemical compounds, which under certain conditions undergo decomposition. Decomposition of explosives leads to sudden release of heat and pressure. The rate of combustion of explosives is a criterion for their classification in high or low combustion explosives.

The combustion rate of low combustion explosives amounts to cm / sec, while the velocities with which explosive combustion explosions explode can explode to the rate of km / sec. High explosive explosives are further separated into primary and secondary explosives according to the degree of stability they present. Primary explosives exhibit an excellent sensitivity to external stimuli, such as friction and thermal and electrical sparks, which are capable of causing an explosion. Instead, secondary explosives, such as TNT and RDX, are highly stable, and a primary explosive is required to cause an explosion.

Home-made Explosives (HMEs), due to their simple composition, can easily be manufactured using commercially available materials. The main feature of these explosives is the very high vapor pressure, which is due to the presence of Volatile Organic Compounds (VCOs) including, such as acetone. In addition, they are highly unstable and therefore very careful handling and special care is needed to avoid their burning.

The most common and widely used explosives show very low ambient pressure. Because of this extremely low vapor pressure, the molecules of these compounds exhibit sticky behavior and tend to adsorb onto surfaces very easily. However, the very low vapor pressure of these compounds can grow rapidly with the simultaneous, rapid increase in temperature. And this is another feature of explosive, chemical compounds. The result of the rapid rise in temperature is to create vapors, which are condensed and adsorbed very quickly by cooler and cooler surfaces.

The adsorption rate is even greater than surfaces with high surface energy, such as metal and metal oxide, compared to low energy surfaces such as polymers and plastics. Also, condensation of molecules of explosive compounds at room temperature is caused due to this sticky property. Therefore, in order to obtain a safe result in the process of detecting the molecules of explosive compounds and given their very small number, a

more specialized way of sampling and a particular sample preparation is required [4].

## 4.2 Sample-collection and Pre-concentration

A complete layout is required for the process of collecting sufficient quantity and sample quality. This device is essentially the first piece of an integrated detection system. As mentioned in the previous section, most widely used explosives are characterized by their low vapor pressure. A large amount of clean air is required so that a satisfactory and representative sample can finally be obtained. From the quantity and quality of the sample, the final number of bound molecules of the explosive will be determined for analysis. It goes without saying that the higher the sensitivity of the detection device, the smaller the amount of analytical molecules required to be collected. Most explosive detection sensors do not have a fairly satisfactory degree of sensitivity in real time and therefore a very good way to collect a sample is required. A solution to this problem came from the design and construction of a pre-concentrator, which is used to sample explosive analysis.

Pre-concentrator operation is simple: initially, with a pump, a large amount of air is introduced into it. It is actually a mixture of many different molecules, including molecules of explosives at very low concentrations. Subsequently, the explosive molecules are bound by the use of special materials. In order for these special materials to absorb the molecules, they should be heated beforehand. The binding mechanism is based on the adsorption effect on large surfaces [4].

## 4.3 Proposed Device's General Description

Diagram 1 below illustrates the proposed explosive detection device for postal items dropped in outdoor mailboxes:

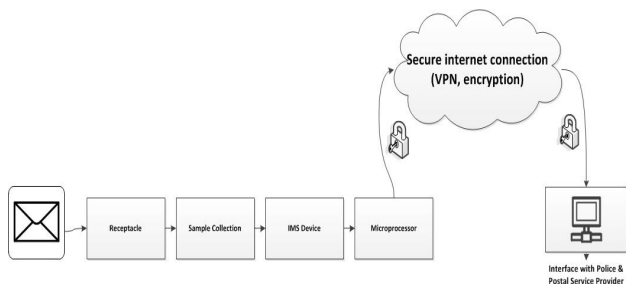


Diagram 1: General diagram of proposed layout.

The postal items enter the outdoor mailboxes through a slot, quite wide, located on the front of the

mailboxes. In order to check for the presence of traces of explosives inside or on the surface of postal items, they are initially placed in an antechamber, specially formed inside the mailbox and fixed to the height of the slot. From this antechamber, the postal items enter serially in an empty box, where the sampling process takes place. The box is vacuum-free to prevent any contaminants with other molecules in the surrounding area and thus enhance the purity of the sample. A clear air supply is provided inside this box to release molecules located inside or on the surface of the postal object. The amount of clean air along with the released molecules enters the pre-concentrator by means of a pump, where the process of binding molecules of explosives, as described above, is now taking place. Finally, a satisfactory percentage of pure samples enter the ionization region of the IMS device and its analysis and identification process is followed.

## 4.4 IMS Sensor

The IMS sensor device studied belongs to the Drift Time Ion Mobility Spectrometer (DTIMS) class.

The modern development of nano-technology has helped in the compact design and construction of such IMS devices. Today, these devices have a very high sensitivity and fast response, tracing traces of ppb-ppt explosive within msec interval, operating under atmospheric pressure, and being able to separate isomeric compounds.

Tiny, easy-to-assemble, low-cost nano-ions are made of Low Temperature Co-Fire Ceramic (LTCC) and include a Integral Resistor Network). Essentially, the design and construction of such a tube results in the removal of up to 150 individual components, drastically reducing the size of their formerly equivalent explosive detection devices. Additionally, the combination of these materials has led to the production of an internal, chemically inert surface, thus helping to improve the performance of the device.

The results of the device's controls and measurements can be analyzed using digital signal processing technology and determine the type and concentration of the explosive. For this purpose, the calibration of the device is required [5].

## 4.5 IMS Device Calibration Procedure

Basic and necessary step before analyzing real samples is the calibration of a device. The calibration of a device is how it is set up, it takes place before measurements of real samples are taken and is intended to ensure the accuracy of the results



of the measurements to follow. The standard in the calibration process of a device is to precede the measurement of a standard substance, called a calibrant [3].

The calibration of an IMS device is based on the determination of the relationship between a standard solution (reference value) and the substance under analysis. Proper calibration of the IMS device targets both qualitative (detection) and quantitative (quantitative) analysis of the explosive. The composition of the standard solution (calibrator, calibrant) is as similar as possible to the composition of the explosive substance under analysis. The use of this kind of chemical standard solutions aims at calibrating IMS devices, while avoiding interference from other, foreign materials. Therefore, a series of such external standard solutions, including the explosive substance under investigation, are prepared at known, quantified concentrations. Each time a specific sample is inserted into the device, the signal is output at its output, and a series of matches between the composition of the standard solution and the known quantified concentration of the explosive substance are obtained. A basic output signal is the blank signal, which is the response of the device to a sample that does not contain the explosive substance at all. From the results recorded, a calibration curve shows either their graphical design or their appropriate adaptation to a mathematical equation [6]. Measurements and recording of a device's responses during its calibration process are always performed under specific, fixed and predetermined conditions [7].

The measured, proportional size at the output of the device studied is a current, which requires amplification by means of a suitable electronic amplifier. Subsequently, the amplified signal is passed through an A/D converter (A/D converter). From the resulting calibration curve, a Lookup Table is created, which is then used as the basis for the microprocessor programming.

## **5. The Raspberry PI 3 model B+ microprocessor**

The microprocessor tested for explosives detection device in postal items thrown in outdoor mailboxes is the Raspberry PI 3 model B+. It is a powerful, small and lightweight computer, based on ARM technology. More specifically, it has a four-core processor company ARM (Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53, ARM v8), 64-bit SoC (System on Chip) at 1.4GHz. The advantage of this tiny component is that it has a much better heat output,

making it able to operate almost at the 1.4GHz maximum of the 4 core processor [8]. Another useful feature of this particular microprocessor model is the extensive 40-pin pins that function as General Purpose Inputs / Outputs (GPIO). The low-power microprocessor memory is 1GB of LPDDR2-900 SDRAM. The feature that is a novelty of the series in the connectivity segment is the presence of dual-band wireless LAN, operating at 2.4GHz and 5GHz and covering all IEEE (802.11.b / g / n / ac), as well as Bluetooth (version 4.2 BLE). In addition, there is a Gigabit Ethernet port via USB2.0, with a maximum transmission rate of 300Mbps. Finally, the connectivity capabilities provided by the microprocessor include four USB 2.0 ports [9]. The microprocessor requirements for power supply are low (5V / 2.5A DC) and there are many possibilities, depending on the application. The microprocessor can be powered either via a micro USB connector or via the GPIO terminal [9] [11]. Finally, this series model provides PoE (Power over Ethernet) power, but requires a separate PoE HAT [10].

## **6. Power Supply Requirements of the proposed layout**

The feed requirements of the proposed layout are easily covered, since most outdoor mailboxes are located very close to the front of the company's designated universal service provider and its agents. This is an advantage for the supplying needs of the proposed device, since its power supply can be done by means of a cable coming underground from the shop premises.

With respect to the device's autonomy system, this may consist of rechargeable battery systems which will be used and suitably adapted to the interior of the outdoor mailboxes in order to provide the necessary autonomy of the device and ensure its continuous, uninterrupted operation for a large time interval [12].

## **7. Telecommunication System of the device**

The current, rapid development in the telecommunications sector provides enormous speed capabilities, which are supported by the proposed microprocessor model for this layout. At the same time, unbelievable and cost-effective data storage and storage solutions provided by Cloud Computing services make the design and development of the telecommunication system for

the proposed layout a relatively easy and fast process.

Due to the nature of the data generated by the proposed explosive detection device that will need to be stored for some time, a good and efficient solution would be to design and develop a computational model based on a Community Cloud development model and will take advantage of the Infrastructure as a Service. Members of the community will be all competent police authorities and the universal postal service provider. Storage data that will belong to the Cloud infrastructure will be able to store the data that will be obtained from the proposed layout that will be installed in the outdoor mailboxes. Through a specific interface point and specific access rights, competent officers, certified police officers and the universal service provider will be able to manage and process the specific data.

## 8. Operation Script

The combination of high telecommunication speeds and cost-effective storage solutions meets one of the key requirements of the proposed provision. However, timely notification and notification of the police officers and officers of the universal postal service, in case of explosive detection in an open mailbox, is a top priority issue.

Data resulting from device metrics is sent via real-time wireless communication to a central server in the Cloud computing, where they are stored for a certain amount of time in order to undergo some form of processing at a later time. In the event that explosive matter is detected on a postal item, along with the sending of data to the central server, an e-mail will be automatically sent to predefined e-mail addresses or a text message to mobile phones from the heads of the competent police authorities and the company's officers universal postal service.

This message includes information about the results of the explosive detection process and its location, i.e. the coordinates (latitude and longitude) of the location of the outdoor mailbox. Immediately after being informed of the detection of a postal item containing explosive, all such actions shall be taken by the competent police authorities in accordance with the formal procedure followed in such cases.

## 9. Indicative cost of the proposed device

The cost of the proposed layout can be essentially broken down into three separate key components: the cost of the explosive detection device, including

the pre-concentrator, the cost of the telecommunications system, including the microprocessor and the GPS module, and the cost of power supply and autonomy (battery assembly). After an Internet search, a very affordable price for the proposed provision amounts to € 11,000 [12], [13], [14], [15], [16] as shown in Table 1 below:

Section	Price (€ / pcs)
<b>IMS Section (+battery autonomy system)</b>	11.000
<b>Raspberry PI 3 model B+ microprocessor</b>	40 ~ 56
<b>GPS module</b>	23 ~ 30
<b>Total</b>	11.063 ~ 11.086

Table 1: Indicative cost of the proposed device

The total cost should also be added to the cost of using the Cloud Computing infrastructure that will be required to store the data and implement the corresponding processing application. For this purpose and in order to reduce the total cost of the project, the Cloud Services provided by the Information Society (IS) [17] to the Greek State could be an excellent solution.

## 10. Expected Results – Improvements

The use of the explosive detection device to fit properly inside the outdoor mailbox can greatly increase the chances of avoiding a possible explosion and all its negative consequences. Primarily, human life is avoided and serious injuries to innocent civilians are sustained. Material disasters are prevented and are definitely confined to a single point: in the open mailbox where the postal item containing the explosive was placed. A very large and important role is also expected to have the use of the device in the timely and immediate notification and notification of the competent police authorities. In such cases, the sample of the explosive will remain unchanged, thus allowing for more accurate examination, analysis and identification, while at the same time receiving other very useful information about how it is manufactured. In addition, other useful data such as fingerprints that may be on the postal item will not be destroyed and will lead to the identification of potential terrorists. Detecting traces of explosives is now a challenge for the scientific world. Scientific teams around the world analyze and study the chemical behavior of these materials in order to design and construct new-based devices to achieve even more reliable and sensitive explosive detection instruments. Other new and promising explosive

detection methods that are in the research phase include the use of chemical fluorescence sensors [18], the creation of a sampling device for the detection of explosive materials, which can operate remotely and without contact, by exploiting the desorption of sources laser on the scale of picoseconds and nanoseconds [19], the simultaneous detection and discrimination of five different kinds of explosives with a special quantum dots [20], while the promise and construction of an integrated circuit [21], which is an extremely sensitive and highly selective platform, capable of detecting, distinguishing and identifying explosive chemical substances. The operation of the platform is based on the use of large-scale electric dwarf-sensors, which are highly efficient. The research list is constantly increasing and enriched, leaving the impression that in the future the ion mobility sector will bring many more positive results to the detection of traces of explosives.

#### References:

- [1] <https://athens.indymedia.org/post/800375/>
- [2] Zbigniew Bielecki, Jacek Janucki, Adam Kawalec, Janusz Mikolajczyk, Norbert Palka, Mateusz Pasternak, Tadeusz Pustelny, Tadeusz Stacewicz, Jacek Wojtas, "Sensors and Systems for the Detection of Explosive Devices-An Overview", Metrology and Measurement Systems, Index 330930, ISSN 0860-8229, Vol. XIX (2012), No. 1, pp3-28.
- [3] R. Cumeras, E. Figueras, C.E. Davis, J.I. Baumbach, I. Gracia, "Review on Ion Mobility Spectrometry. Part 1: Current Instrumentation", HHS Public Access, 2015 March 7;140(5): 1376-1390. doi:10.1039/c4an01100g.
- [4] Larry Senesac & Thomas G. Thundat, "Nano sensors for trace explosive detection", Materials Today, March 2008, vol. 11, number 3.
- [5] [http://www.sandia.gov/research/research\\_foundations/bioscience/\\_assets/documents/Fact\\_Sheets/2IMS-17.pdf](http://www.sandia.gov/research/research_foundations/bioscience/_assets/documents/Fact_Sheets/2IMS-17.pdf)
- [6] [http://www.eln.teiste.gr/sites/default/files/HL\\_D IAT\\_FASM.pdf](http://www.eln.teiste.gr/sites/default/files/HL_D IAT_FASM.pdf).
- [7] Roberto Fernández-Maestre, "Ion Mobility Spectrometry: History, Characteristics and Applications", Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 15(2): 467 - 479, 2012.
- [8] <https://www.raspberrypi.org/blog/raspberry-pi-3-model-bplus-sale-now-35/>
- [9] <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>
- [10] <https://www.raspberrypi.org/products/poe-hat/>
- [11] <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-universal-power-supply/>
- [12] U.S Department of Homeland Security, "Portable Ion Mobility Spectrometry (IMS), Chemical Agent Detectors, Market Survey Report", December 2013.
- [13] <https://nettop.gr/index.php/raspberry-pi/kit-plaketes/raspberry-pi-3-modelb-plus.html?src=raspberrypi>
- [14] <http://export.farnell.com/raspberry-pi/rpi3-modbp-starter/raspberry-pi-3-model-b-starter/dp/2848199>
- [15] [www.gearbest.com/raspberry-pi/pp\\_436481.html](http://www.gearbest.com/raspberry-pi/pp_436481.html)
- [16] [www.seeedstudio.com/Raspberry-PI-GPS-Module-p-2731.html](http://www.seeedstudio.com/Raspberry-PI-GPS-Module-p-2731.html)
- [17] <http://www.gcloud.ktpae.gr>
- [18] Damien Rembelski, Jeremy Bordet, Quentin Brouard, Benoit Minot, Christelle Barthet, Celine Frenois, "Fluorescent sensing for nitrated compounds: Study of the sensor microstructure for on explosive detection", Science Direct, Eurosensors 2015, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.680.
- [19] A.A. Chistyakov, G.E. Kotkovskii, I.P. Odulo, E.M. Spitsyn, A.V. Shestakov, "A method of highly sensitive detecting of explosives on the basis of FAIMS analyzer with laser ion source", Science Direct, Elsevier B.V., doi: 10.1016/j.phpro.2015.08.329.
- [20] William J. Peveler, Alberto Roldan, Nathan Hollingsworth, Michael J. Porter, Ivan P. Parkin, "Multichannel Detection and Differentiation of Explosives with a Quantum Dot Array", DOI: 10.1021/acsnano.5b06433, ACS Nano 2016, 10, 1139-1146.
- [21] Amir Lichtenstein, Ehud Havivi, Ronen Shacham, Ehud Hahamy, Ronit Leibovich, Alexander Pevzner, Vadim Krivitsky, Guy Davivi, Igor Presman, Roey Elnathan, Yoni Engel, Eli Flaxer, Fernando Patolsky, "Supersensitive fingerprinting of explosives by chemically modified nanosensors arrays", Nature Communications, Macmillan Publishers Limited, DOI: 10.1038/ncomms5195, 2014.



## Πρόταση Μεταπτυχιακής Διατριβής

1. Όνομα Φοιτήτριας: Σπυροπούλου Μαρία

2. Όνομα Επιβλέποντα Καθηγητή: Παπουτσιδάκης Μιχάλης

3. Τίτλος Διατριβής:

Συσκευή Ανίχνευσης Εκρηκτικής Ύλης σε Ταχυδρομικά Αντικείμενα  
στα Υπαίθρια Γραμματοκιβώτια για την Προστασία των Πολιτών

A Device for Explosive Materials Detection on Postal Objects in Outdoor  
Mailboxes for Citizen Protection

4. Περίληψη Διατριβής:

Η αύξηση των τρομοκρατικών επιθέσεων σε παγκόσμιο επίπεδο έχει αλλάξει δραματικά τον τρόπο ζωής του ανθρώπου. Καινούριες μορφές τρομοκρατίας έχουν εμφανιστεί, αλλάζοντας την καθημερινότητα απλών πολιτών, οι οποίοι πολλές φορές αποτελούν τις «παράπλευρες απώλειες» αυτών των πράξεων. Ιδιαίτερα, η αποστολή «τρομο-δεμάτων» σε πρόσωπα-στόχους έχει αναδείξει το κενό ασφαλείας που υπάρχει στη διαδικασία παροχής ταχυδρομικών υπηρεσιών και πιο συγκεκριμένα τον κίνδυνο που διατρέχουν τόσο στο σύνολό τους οι υπάλληλοι του φορέα παροχής καθολικής υπηρεσίας όσο και απλοί, διερχόμενοι πολίτες, δεδομένου ότι η συμπεριφορά ενός εκρηκτικού μηχανισμού είναι απρόβλεπτη ακόμα και κατά την απλή μετακίνηση ή τοποθέτησή του. Επιπλέον, η αδυναμία ταυτοποίησης του αποστολέα και ιχνηλάτησης των απλών ταχυδρομικών αντικειμένων που ρίπτονται σε υπαίθρια γραμματοκιβώτια αποτελούν ένα ακόμα όπλο στα χέρια των τρομοκρατών.

Στην παρούσα διατριβή θα παρουσιαστεί η μελέτη σχεδιασμού ενός συστήματος ανίχνευσης εκρηκτικής ύλης που περιέχεται σε ταχυδρομικό αντικείμενο που ρίπτεται σε υπαίθριο γραμματοκιβώτιο. Επιπλέον, περιγράφεται ο τρόπος λειτουργίας της διάταξης και της έγκαιρης ειδοποίησης των αρμόδιων αρχών και υπηρεσιών για την άμεση επέμβασή τους, ώστε να αποφεύγεται η επέκταση των ζημιών. Η χρήση του προτεινόμενου συστήματος, που εμπίπτει με τις απαιτήσεις του Π.Μ.Σ., δεδομένου ότι πραγματεύεται σύγχρονες εφαρμογές τεχνολογιών αυτοματισμού και τηλεπικοινωνιών, θα αυξήσει το επίπεδο ασφαλείας κατά την διαδικασία περισυλλογής απλών ταχυδρομικών αντικειμένων. Η μόνιμη εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος στα υπαίθρια γραμματοκιβώτια θα μπορέσει να εστιάσει πρωτίστως στην προστασία της ανθρώπινης ζωής και δευτερευόντως στην έγκαιρη και άμεση κινητοποίηση των αρμόδιων αρχών και υπηρεσιών, σε περίπτωση ανίχνευσης ύποπτου ταχυδρομικού αντικειμένου, γεγονός που θα συμβεί για πρώτη φορά στη Ελλάδα. Τα δύο αυτά σημεία αποτελούν και τον σκοπό αυτής της διατριβής, σε μια προσπάθεια η χρήση τεχνολογικά εξελιγμένων εφαρμογών να συμβάλει στην ασφάλεια και την αποφυγή ανθρώπινων απωλειών και υλικών ζημιών. Στο κυρίως μέρος της διατριβής αναλύονται τα κριτήρια σχεδιασμού του προτεινόμενου συστήματος, οι διατάξεις αισθητηρίων, ο μικροελεγκτής, οι διατάξεις τροφοδοσίας και αυτονομίας και η διάταξη επικοινωνίας. Ο τρόπος λειτουργίας και το περιβάλλον επικοινωνίας με τις αρμόδιες αρχές και υπηρεσίες, παρουσιάζονται λεπτομερώς μέσα από την περιγραφή του σεναρίου λειτουργίας. Επιπλέον, η διατριβή θα περιλαμβάνει οικονομοτεχνικά στοιχεία που αφορούν στο κόστος λειτουργίας και τοποθέτησης του προτεινόμενου συστήματος στα υπαίθρια γραμματοκιβώτια. Η μελέτη ολοκληρώνεται με την καταγραφή των συμπερασμάτων που αναμένεται να έχει η χρήση του συγκεκριμένου συστήματος.

Υπολογίζεται ότι η μελέτη θα ολοκληρωθεί εντός 4 μηνών. Τους δύο πρώτους μήνες θα γίνει η συλλογή σχετικής βιβλιογραφίας και πληροφοριών από το Διαδίκτυο και θα λάβουν χώρα συναντήσεις με εκπροσώπους των αρμόδιων αρχών και υπηρεσιών, προκειμένου να ληφθούν χρήσιμες πληροφορίες για τις διαδικασίες που ακολουθούνται σε περιπτώσεις ανίχνευσης ύποπτων ταχυδρομικών αντικειμένων. Κατά τη διάρκεια του τρίτου μήνα θα πραγματοποιηθεί η μελέτη σχεδίασης του προτεινόμενου συστήματος και θα εξεταστούν όλες οι παράμετροι του σεναρίου λειτουργίας του. Κατά τον τελευταίο (τέταρτο) μήνα θα πραγματοποιηθεί η συγγραφή της διατριβής και οι διορθώσεις αυτής σε συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή.

## 5. Σχέδιο Βαθμολόγησης (με ενδεικτική ποσόστωση)

• Εισαγωγή	5%
• Βιβλιογραφική Έρευνα	15%
• Σχεδιασμός Ερευνητικής Μεθοδολογίας	10%
• Σχεδίαση Συστήματος	20%
• Ανάπτυξη Συστήματος	15%
• Έλεγχος Λειτουργίας (testing)	5%
• Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	15%
• Συμπεράσματα	5%
• Αυτοαξιολόγηση	5%
• Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	5%

## 6. Επιτροπή Έγκρισης & Βαθμολόγησης

**Δρ.Δ.Τσελές**  
Καθηγητής  
Διευθυντής Π.Μ.Σ

**Δρ.Κ.Αλαφοδήμος**  
Καθηγητής  
Πρόεδρος Τμ.Μηχ.  
Αυτοματισμού

**Δρ. Μ. Παπουτσιδάκης**  
Επιβλέπων-Εισηγητής