



**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ**  
**ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»**

---

**Διπλωματική Εργασία**

**Μελέτη anti-UAV τεχνολογιών μέσω EMP / πυροβόλων ιόντων**

**Συγγραφέας:**

**Καρπέτας Βασίλειος**

**ΑΜ: 8096634**

**Επιβλέπων: Παπακίτσος Ευάγγελος**

**Αθήνα, Σεπτέμβριος 2024**



**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ**  
**ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»**

---

**Diploma Thesis**

**Study of anti-UAV technologies via EMP / Ion guns**

**Student name and surname: Vasileios Karpetas**

**Registration Number: 8096634**

**Supervisor name and surname: Papakitsos Evangelos**

**Athens, September 2024**

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ...Καρπέτας Βασίλειος..... του ...Αθανασίου....., με αριθμό μητρώου ...8096634..... φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Μη Επανδρωμένα Αυτόνομα και Τηλεκατευθυνόμενα Συστήματα» του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, πριν αναλάβω την εκπόνηση της Διπλωματικής εργασίας μου, δηλώνω ότι ενημερώθηκα για τα παρακάτω:

•Η Διπλωματική Εργασία (Δ.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 Δ.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 του έχει απονεμίσει ο μεταπτυχιακός τίτλος, αυτός 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 Δ.Ε. με άλλο θέμα και διαφορετικό επιβλέποντα καθηγητή. Η εκπόνηση της εν λόγω Δ.Ε. πρέπει να ολοκληρωθεί εντός τουλάχιστον ενός ημερολογιακού βμήνου από την ημερομηνία ανάθεσης της. Κατά τα λοιπά εφαρμόζονται τα προβλεπόμενα στον Κανονισμό Λειτουργίας του Π.Μ.Σ..

Ο Δηλών

Ημερομηνία



10/09/2024



**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**Τμ. ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**Π.Μ.Σ. «ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΥΤΟΝΟΜΑ ΚΑΙ**  
**ΤΗΛΕΚΑΤΕΥΘΥΝΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»**

---

**Μελέτη anti-UAV τεχνολογιών μέσω EMP / πυροβόλων ιόντων**

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>A/a</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΑΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΣ	ΕΔΠΙ Α΄	
2	ΜΙΧΑΗΛ ΠΑΠΟΥΤΣΙΔΑΚΗΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	ΑΒΡΑΑΜ ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΣ	ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Παπακίτσο Ευάγγελο αλλά και τον καθηγητή μου κύριο Παπουτσιδάκη Μιχαήλ για τη συνεχή υποστήριξη της διπλωματικής μου εργασίας, για την ενθάρρυνση καθώς και τα κίνητρα που μου έδωσαν ώστε να φτάσω σε αυτό το αποτέλεσμα.

Τέλος, θα ήθελα εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....</b>	<b>X</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....</b>	<b>X</b>
<b>ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ .....</b>	<b>XI</b>
<b>ΛΕΞΙΚΟ ΟΡΩΝ .....</b>	<b>XIV</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>XVII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>- 1 -</b>
<b>1. ΠΥΡΟΒΟΛΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΚΑΙ ΙΟΝΤΩΝ.....</b>	<b>- 2 -</b>
1.1 Ορισμός και Εισαγωγή .....	- 2 -
1.1.2 Χαρακτηριστικά και Τύποι.....	- 2 -
1.2 Δομή και Λειτουργία ενός Τυπικού Πυροβόλου Ηλεκτρονίων .....	- 2 -
1.3 Πυροβόλα Ιόντων .....	- 4 -
1.4 Παραγωγή και Έλεγχος Δέσμης Ηλεκτρονίων και Ιόντων .....	- 5 -
1.4.1 Παραγωγή Ηλεκτρονίων.....	- 5 -
1.4.2 Παραγωγή Ιόντων.....	- 9 -
1.5 Μέθοδοι Παρατήρησης της Δέσμης Ηλεκτρονίων ή Ιόντων .....	- 10 -
1.5.1 Οθόνη Φωσφόρου .....	- 10 -
1.5.2 Κύπελλο Faraday .....	- 10 -
1.6 Χαρακτηριστικά Δεσμών .....	- 11 -
1.6.1 Ενέργεια Δέσμης .....	- 11 -
1.6.2 Ρεύμα Δέσμης .....	- 11 -
1.6.3 Μέγεθος Κηλίδας .....	- 11 -
1.6.4 Ομοιομορφία Δέσμης και Πυκνότητα Ρεύματος.....	- 11 -
1.7 Ενεργοποίηση και Απενεργοποίηση της Δέσμης .....	- 12 -
1.7.1 Τερματισμός μέσω Πλέγματος .....	- 12 -
1.7.2 Παλμική Λειτουργία Δέσμης .....	- 12 -
1.7.3 Εκτροπή Δέσμης .....	- 13 -
1.8 Στόχευση Δέσμης.....	- 13 -
1.8.1 Μηχανική Ευθυγράμμιση.....	- 13 -
1.8.2 Εκτροπή .....	- 13 -
1.8.3 Σάρωση.....	- 13 -
1.8.4 Ταλάντωση Δέσμης .....	- 14 -
1.9 Έλεγχος Τροφοδοτικών .....	- 14 -
1.9.1 Χειροκίνητος και Απομακρυσμένος Έλεγχος.....	- 14 -
1.9.2 Έλεγχος Ανάδρασης.....	- 14 -

1.10 Κίνδυνοι .....	- 15 -
1.10.1 Υψηλή Τάση.....	- 15 -
1.10.2 Ακτινοβολία Χ.....	- 15 -
<b>2. ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ .....</b>	<b>- 17 -</b>
2.1 Καινοτόμες Μέθοδοι Παραγωγής Δεσμών Ηλεκτρονίων Υψηλής Πυκνότητας.....	- 17 -
2.2 Ανάλυση της Κίνησης Ιόντων σε Φωτοκαθοδικά Πυροβόλα RF Μακρών Παλμών .....	- 18 -
2.3 Μαθηματικός Μοντελισμός & Αξιοπιστία των Προσομοιώσεων .....	- 20 -
2.4 Συνδυαστικό Πυροβόλο Ηλεκτρονίων/Ιόντων .....	- 22 -
2.5 Εξέλιξη και Βελτιστοποίηση των Μηχανισμών Εκπομπής Ηλεκτρονίων και των Ηλεκτρονικών Πυροβόλων.....	- 23 -
2.6 Εξέλιξη και Σύγκριση Πυροβόλων Ηλεκτρονίων για Επιταχυντές Υψηλής Ενέργειας .....	- 25 -
2.7 Καινοτόμος Σχεδιασμός Ηλεκτρονικών Πυροβόλων με Χρήση Εξειδικευμένου Γενετικού Αλγορίθμου.....	- 26 -
2.8 Αξιολόγηση και Βελτιστοποίηση του Ηλεκτρονικού Πυροβόλου για το Σύστημα REXEBIS....	- 28 -
<b>3. ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΑΛΜΩΝ .....</b>	<b>- 32 -</b>
3.1 Ορισμός και Δημιουργία των Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών.....	- 32 -
3.2 Ιστορικά Συμβάντα Φυσικών Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών .....	- 33 -
3.2.1 Το Συμβάν Carrington.....	- 33 -
3.2.2 Το Συμβάν της Hydro-Québec .....	- 34 -
3.3 Ανάλυση των Συνιστωσών E1, E2 και E3 .....	- 35 -
3.4 Κατηγορίες Παλμών .....	- 37 -
3.5 Ιστορική Αντίληψη και Επιπτώσεις στα Διάφορα Συστήματα .....	- 40 -
3.6 Ενέργειες για την Προστασία των Συστημάτων .....	- 43 -
<b>4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΟΠΛΑ .....</b>	<b>- 46 -</b>
4.1 Οι Ηλεκτρομαγνητικοί Παλμοί ως Επιθετικό Όπλο.....	- 46 -
4.2 Χρήση και Σημασία των EMP στο Σύγχρονο Στρατιωτικό Σχεδιασμό και στην Πολεμική Στρατηγική .....	- 47 -
4.3 Οι Ηλεκτρομαγνητικοί Παλμοί ως Αμυντικό Όπλο .....	- 48 -
4.4 Η Συμβολή του Ηλεκτρομαγνητικού Φάσματος στη Σύγχρονη Στρατιωτική Τεχνολογία.....	- 49 -
4.5 Θεωρήσεις Διεθνούς Δικαίου στο Πλαίσιο του Πολέμου EMP.....	- 51 -
<b>5. ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ.....</b>	<b>- 53 -</b>
5.1 Ορισμός .....	- 53 -
5.2 Βασικές Απαιτήσεις Αντίμετρων .....	- 53 -
5.3 Συστήματα Παρακολούθησης.....	- 55 -
5.4 Συστήματα Αντιμετώπισης των μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων .....	- 57 -

5.5 Κατηγοριοποίηση & Προτεινόμενες Τοποθεσίες των Anti-UAV Συστημάτων .....	- 58 -
<b>6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ EMP ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΕ ANTI-UAV ΛΥΣΕΙΣ.....</b>	<b>- 61 -</b>
6.1 Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή .....	- 62 -
6.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	- 64 -
6.3 Μεθοδολογίες Αξιολόγησης των Ηλεκτρομαγνητικών Επιδράσεων .....	- 67 -
6.3.1 Δοκιμές Ακτινοβολίας.....	- 67 -
6.3.2 Δοκιμές Έγχυσης.....	- 68 -
6.3.3 Προσομοιωτική Έρευνα.....	- 68 -
6.3.4 Συνδυαστική Προσέγγιση.....	- 69 -
6.3.5 Εξειδικευμένες μέθοδοι δοκιμών.....	- 69 -
6.3 Μέθοδοι Ηλεκτρομαγνητικής Προσομοίωσης.....	- 69 -
6.3.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων .....	- 70 -
6.3.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου.....	- 70 -
6.3.3 Μέθοδος των Ροπών .....	- 70 -
6.3.4 Υβριδικές Μέθοδοι Προσομοίωσης .....	- 71 -
6.3.5 Προσομοίωση σε Επίπεδο Συστήματος .....	- 71 -
6.3.6 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης και Μηχανική Μάθηση.....	- 71 -
6.4 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα .....	- 72 -
6.4.2 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα έναντι των USP Παλμών.....	- 73 -
6.4.3 Ανάλυση Ευρημάτων.....	- 76 -
6.5 Επίδραση της EMP στα μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα .....	- 78 -
6.5.1 Ανάλυση της Ευπάθειας των Κρίσιμων Συστημάτων των UAV έναντι των Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών .....	- 78 -
6.5.2 Επιπτώσεις των Ισχυρών Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών.....	- 79 -
6.5.3 Επίδραση των Υπερ-Ευρυζωνικών Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών .....	- 86 -
6.6 Μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικής προστασίας.....	- 88 -
6.6.1 Προστασία έναντι των Ισχυρών Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών .....	- 88 -
6.6.2 Προστασία έναντι των Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών Υπερ-Ευρείας Ζώνης.....	- 90 -
6.6.3 Νέες Τεχνολογίες Ισχυρής Ηλεκτρομαγνητικής Προστασίας .....	- 92 -
6.7 Εναλλακτικές Μέθοδοι Παρεμβολής σε Συστήματα UAV: Ακουστικές και Οπτικές Τεχνικές -	95 -
6.7.1 Ακουστικές Μέθοδοι Παρεμβολής.....	- 95 -
6.7.2 Οπτικές Μέθοδοι Παρεμβολής .....	- 96 -
<b>7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....</b>	<b>- 97 -</b>
7.1 Συμπεράσματα .....	- 97 -
7.2 Περιορισμοί.....	- 97 -
7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα .....	- 98 -
<b>BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....</b>	<b>- 100 -</b>
Ελληνική .....	- 100 -



Ξένη .....	- 100 -
Ιστοσελίδες.....	- 105 -

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1:</b> Τυπικό ηλεκτρονικό πυροβόλο.....	- 3 -
<b>Εικόνα 2:</b> Πυροβόλα ιόντων .....	- 5 -
<b>Εικόνα 3:</b> Επιφάνεια μεταλλικού κρυσταλλικού δικτύου.....	- 7 -
<b>Εικόνα 4:</b> Το πιστόλι συνδυασμού ηλεκτρονίων/ιόντων FG01 .....	- 22 -
<b>Εικόνα 5:</b> Φωτογραφία του νέου αδιαβατικού ηλεκτρονικού πυροβόλου.....	- 28 -
<b>Εικόνα 6:</b> Απεικόνιση μιας επίθεσης με ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς μεγάλου ύψους..	- 33 -
<b>Εικόνα 7:</b> Οι παλμοί / φάσεις ενός HEMP σήματος .....	- 37 -
<b>Εικόνα 8:</b> Εκπομπή ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μια ευρεία περιοχή από μια επίθεση τύπου HEMP .....	- 37 -
<b>Εικόνα 9:</b> Κατηγοριοποίηση ηλεκτρομαγνητικών παλμών .....	- 39 -
<b>Εικόνα 10:</b> Κλωβός προστασίας αντικειμένου από τους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς..	- 43 -
<b>Εικόνα 11:</b> Πόλεμος Φάσματος .....	- 49 -
<b>Εικόνα 12:</b> Κατηγοριοποίηση μη επανδρωμένων αεροσκαφών .....	- 53 -
<b>Εικόνα 13:</b> Βασικά στοιχεία ενός anti-UAV συστήματος .....	- 55 -
<b>Εικόνα 14:</b> Φάσμα ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών παλμών .....	- 80 -
<b>Εικόνα 15:</b> Βρόχος σήματος και βρόχος κυκλώματος σε ένα UAV.....	- 81 -
<b>Εικόνα 16:</b> Πρότυπο διάγραμμα των επιμέρους στοιχείων του ηλεκτρονικού συστήματος ενός UAV.....	- 81 -
<b>Εικόνα 17:</b> Σύστημα μετάδοσης δεδομένων ενός UAV .....	- 83 -
<b>Εικόνα 18:</b> Σύστημα πτήσης και πλοήγησης ενός UAV.....	- 84 -
<b>Εικόνα 19:</b> Σύστημα ισχύος ενός UAV.....	- 86 -

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1:</b> Το έργο εξόδου διαφόρων υλικών .....	- 7 -
<b>Πίνακας 2:</b> Πηγές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών για μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα. -	79 -

## AKΡΩΝΥΜΙΑ

BER: Bit Error Rate

CHAMP: Counter-electronics High-power Microwave Advanced Missile Project

CME: Coronal Mass Ejection

Counter-UAS ή C-UAS: Counter - Unmanned Aerial Vehicle

CST: Computer Simulation Technology

CW: Continuous Wave

DSP: Digital Signal Processor

DVM: Digital Voltage Meter

EBIS/T: Electron Beam Ion Source/Trap

ECC: Emission Current Control

EMC: ElectroMagnetic Compatibility

EMI: ElectroMagnetic Interference

EMP: ElectroMagnetic Pulse

ESC: Electronic Stability Control

ESS: Energy Storage System

EUT: Equipment Under Test

FDTD: Finite-Difference Time-Domain

FEM: Finite Element Method

FSS: Frequency Selective Surface

FWHM: Full-Width Half-Max (measurement)

GICs: Geomagnetically Induced Currents

GMD: Geomagnetic Disturbances

GPS: Global Positioning System

HEMP: High-altitude ElectroMagnetic Pulse

HPEM: High-Power Electromagnetic Pulse

HPM: High Power Microwave

IC: Integrated Circuit

ICAO: International Civil Aviation Organization

IEC: International Electrotechnical Commission

IEMI: Intentional ElectroMagnetic Interference  
IMU: Inertial Measurement Unit  
IoT: Internet of Things  
LEMP: Lightning Electromagnetic Pulse  
LiDAR: Light Detection and Ranging  
LNA: Low Noise Amplifier  
MCE: Mission Critical Equipment  
MEM: Micro-Electro-Mechanical System  
MF: Modal Filtering  
MIL-STD: Military Standard  
MoMs: Method of Moments  
MPG: Micro-Pulse electron Gun  
MR: Modal Reservation  
NA: NonAdiabatic  
NEMP: Nuclear ElectroMagnetic Pulse  
PCB: Printed Circuit Board  
PIC: Particle-In-Cell  
PS: PicoSecond  
PW: Pulsed Wave  
PWM: Pulse Width Modulation  
REE: Radio-Electronic Equipment  
RF: Radio Frequency  
SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition  
SIGINT: SIGnals INTelligence  
SNR: Signal-to-Noise Ratio  
SVM: Support Vector Machine  
TEM: Transverse ElectroMagnetic  
TLM: Transmission Line Method  
TRIZ: Theory of Inventive Problem Solving  
TTL: Transistor-Transistor Logic

UAV: Unmanned Aerial Vehicle

USP: Ultra-Short Pulse

UWB EMP: Ultra-WideBand Electromagnetic Pulse

XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy

BaO: Οξειδίου του βαρίου

LaB6: Εξαβορίδιο του λανθανίου

ThO<sub>2</sub>: Οξείδιο του θορίου

ΜΕΑ: Μη Επανδρωμένα Αεροχήματα ή Αεροσκάφη

## ΛΕΞΙΚΟ ΟΡΩΝ

- Anti-UAV / Anti-Drone & Counter-UAS / Counter-Drone: Αντίμετρα κατά των μη επανδρωμένων αεροσκαφών
- Back-door coupling: Σύζευξη «πίσω πόρτας»
- Bit Error Rate: Ρυθμός σφαλμάτων bit
- Cable Shielding: Θωράκιση των καλωδίων
- Computer Simulation Technology: Τεχνολογία υπολογιστικής προσομοίωσης
- Conduction Protection: Προστασία από αγωγιμότητα
- Continuous Wave: Συνεχές κύμα
- Coronal Mass Ejection: Εκτίναξη στεμματικής μάζας
- Cyber Takeover Systems: Συστήματα κυβερνοκατάληψης
- Datalink System: Σύστημα μετάδοσης δεδομένων
- Digital Signal Processor: Ψηφιακός επεξεργαστής σήματος
- Digital Voltage Meter: Ψηφιακό βολτόμετρο
- Drones: Μη επανδρωμένα αεροσκάφη
- Early-Time Pulse: Πρώιμος χρονικός παλμός
- ElectroMagnetic Compatibility: Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα
- ElectroMagnetic Interference: Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές
- ElectroMagnetic Pulse: Ηλεκτρομαγνητικός παλμός
- Electron Beam Ion Source/Trap: Προηγμένες πηγές ιόντων και συσκευών
- Electron gun: Πυροβόλο ηλεκτρονίων
- Electronic Stability Control: Ηλεκτρονικός έλεγχος ευστάθειας
- Emission Current Control: Έλεγχος Ρεύματος Εκπομπής
- Energy Storage System: Σύστημα αποθήκευσης ενέργειας
- Equipment Under Test: Υπό δοκιμή εξοπλισμός
- Finite-Difference Time-Domain: Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου
- Finite Element Method: Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων
- Fixed-wing UAVs: Σταθερά UAVs
- Frequency Selective Surface: Επιφάνειες επιλεκτικής συχνότητας
- Front-door coupling: Σύζευξη «μπροστινής πόρτας»
- Full-Width Half-Max measurement: Πλήρες εύρος στο ήμισυ του μέγιστου

Geofencing: Γεωπερίφραξη

Geomagnetic Disturbances: Γεωμαγνητικές διαταραχές

Geomagnetically Induced Currents: Γεωμαγνητικά επαγόμενα ρεύματα

High-altitude ElectroMagnetic Pulse: Ηλεκτρομαγνητικός παλμός μεγάλου ύψους

High-Power Electromagnetic Pulse: Ηλεκτρομαγνητικός παλμός υψηλής ισχύος

High Power Microwave: Μικροκύματα υψηλής ισχύος

Hijacking: Ανάληψη του ελέγχου του drone από τον αμυντικό χειριστή

Inertial Measurement Unit: Μονάδα μέτρησης αδρανειακής κίνησης

Integrated Circuit: Ολοκληρωμένο κύκλωμα

Intentional Electromagnetic Interference: Σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή

International Civil Aviation Organization: Διεθνής Οργανισμός Πολιτικής Αεροπορίας

International Electrotechnical Commission: Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή

Ion gun: Πυροβόλο ιόντων

Jamming: Παρεμβολή

Lightning Electromagnetic Pulses: Ηλεκτρομαγνητικός παλμός αστραπής

Lost lock: Απώλεια κλειδώματος

Low Noise Amplifier: Ενισχυτής χαμηλού θορύβου

Method of Moments: Μέθοδος των ροπών

Micro-Electro-Mechanical System: Μικροηλεκτρομηχανικό σύστημα

Micro-pulse Electron Gun: Μικροπαλμικό πυροβόλο ηλεκτρονίων

Military Standard: Στρατιωτικά πρότυπα

Mission Critical Equipment: Κρίσιμος εξοπλισμός αποστολής

Modal Filtering: Μοδαλική διήθηση

Modal Reservation: Μοδαλική εφεδρεία

Non-nuclear EMP: Μη πυρηνικοί ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί

Non-RF Interference: Μη Ραδιοσυχνοτική Παρεμβολή

Nuclear Electromagnetic Pulse: Ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί πυρηνικών εκρήξεων

PicoSecond: Πικοδευτερόλεπτο

Port Aligner: Ευθυγραμμιστής θύρας

Printed Circuit Board: Πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος

Pulsed Wave: Παλμικό κύμα

Pulse Width Modulation: Διαμόρφωση εύρους παλμών

Radio-Electronic Equipment: Ραδιοηλεκτρονικός εξοπλισμός

Radio Frequency: Ραδιοσυχνότητα

Rotary-wing UAVs: Περιστροφικά UAVs

Shielding Protection: Ηλεκτρομαγνητική θωράκιση

Signal-to-Noise Ratio: Λόγος σήματος προς θόρυβο

Signals Intelligence: Υποκλοπές σημάτων

Spoofing: Παραπλάνηση των συστημάτων του drone

Support Vector Machine: Μηχανή διανυσματικής υποστήριξης

Theory of Inventive Problem Solving: Θεωρία Εφευρετικής Επίλυσης Προβλημάτων

Transistor-Transistor Logic: Λογική τρανζίστορ-τρανζίστορ

Transmission Line Method: Πλέγμα/μέθοδος γραμμών μετάδοσης

Transverse ElectroMagnetic: Θάλαμος εγκάρσιου ηλεκτρομαγνητικού κύματος

Ultra-Short Pulse: Εξαιρετικά σύντομος παλμός

Ultra-WideBand Electromagnetic Pulse: Παλμός ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υπερ-ευρείας ζώνης

Unmanned Aerial Vehicle: Μη επανδρωμένο αεροσκάφος

Wave Mode: Μόδα διάδοσης

X-ray Photoelectron Spectroscopy: Φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτίνων-X



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αρχικά στο **1ο Κεφάλαιο** αναλύεται το θέμα των πυροβόλων ηλεκτρονίων και ιόντων, παρέχοντας βασικές πληροφορίες για τη δομή, λειτουργία και τα χαρακτηριστικά τους.

Στο **2ο Κεφάλαιο** επιχειρείται η παρουσίαση εξειδικευμένων μελετών σχετικά με τις εκπομπές ηλεκτρονίων και ιόντων, συμπεριλαμβανομένων καινοτόμων μεθόδων και προσομοιώσεων.

Στο **3ο Κεφάλαιο** παρατίθενται οι βασικές έννοιες και πληροφορίες σχετικά με τους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς, την ιστορία τους και τις επιπτώσεις τους.

Στο **4ο Κεφάλαιο** γίνεται η διερεύνηση των ηλεκτρομαγνητικών όπλων και της χρήσης τους στη σύγχρονη στρατιωτική στρατηγική.

Στο **5ο Κεφάλαιο** γίνεται μια σύντομη παράθεση πληροφοριών σχετικά με τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη και τα συστήματα αντιμετώπισής τους.

Στο **6ο Κεφάλαιο** παρατίθενται εκτενώς οι εφαρμογές των τεχνολογιών ηλεκτρομαγνητικών παλμών σε λύσεις κατά των μη επανδρωμένων αεροσκαφών, συμπεριλαμβανομένων μεθόδων αξιολόγησης, προσομοίωσης και προστασίας.

Τέλος στο **7ο Κεφάλαιο** αναφέρονται τα συμπεράσματα, οι περιορισμοί της έρευνας και προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο πεδίο.

**Λέξεις κλειδιά:** Πυροβόλα ηλεκτρονίων, Πυροβόλα ιόντων, Ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί (EMP), Μη επανδρωμένα αεροσκάφη (UAV), Ηλεκτρομαγνητικά όπλα, Αντίμετρα UAV, Ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, Ηλεκτρομαγνητική προστασία, Υπερ-ευρυζωνικοί παλμοί, Ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, Ακουστικές και οπτικές τεχνικές παρεμβολής.

## ABSTRACT

Initially, **Chapter 1** analyses the topic of electron and ion guns, providing basic information about their structure, function, and their characteristics.

**Chapter 2** presents specialized studies on electron and ion emissions, including innovative methods and simulations.

**Chapter 3** outlines the fundamental concepts and information about electromagnetic pulses, their history, and their effects.

**Chapter 4** investigates electromagnetic weapons and their use in modern military strategy.

**Chapter 5** provides a brief overview of unmanned aerial vehicles and their countermeasure systems.

**Chapter 6** extensively discusses the applications of electromagnetic pulse technologies in anti-unmanned aircraft solutions, including methods of evaluation, simulation, and protection.

Finally, **Chapter 7** presents the conclusions, research limitations, and suggestions for future research in the field.

**Key Words:** Electron guns, Ion guns, Electromagnetic pulses (EMP), Unmanned aerial vehicles (UAV), Electromagnetic weapons, UAV countermeasures, Electromagnetic compatibility, Electromagnetic protection, Ultra-wideband pulses, Electromagnetic interference, Acoustic and optical jamming techniques

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στη σύγχρονη εποχή, η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας έχει επιφέρει σημαντικές αλλαγές στον τομέα της άμυνας και της στρατιωτικής στρατηγικής. Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται σε δύο καίριες πτυχές αυτής της τεχνολογικής προόδου: τα πυροβόλα ηλεκτρονίων και ιόντων, καθώς και τους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς (EMP: ElectroMagnetic Pulse), με ιδιαίτερη έμφαση στις εφαρμογές τους στην αντιμετώπιση των μη επανδρωμένων αεροχημάτων/ αεροσκαφών (MEA - UAV: Unmanned Aerial Vehicle).

Αρχικά, η μελέτη εξετάζει σε βάθος τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των πυροβόλων ηλεκτρονίων και ιόντων, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη ανάλυση των τεχνικών παραμέτρων και των εξελίξεων στον τομέα αυτό. Εξετάζεται η κατασκευή, η ενεργειακή απόδοση, καθώς και οι στρατηγικές εφαρμογές αυτών των όπλων, αναδεικνύοντας τις προκλήσεις που σχετίζονται με την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των δεσμών των ηλεκτρονίων και των ιόντων. Στη συνέχεια, η έρευνα επεκτείνεται στο πεδίο των ηλεκτρομαγνητικών παλμών, διερευνώντας τόσο τις ιστορικές πτυχές όσο και τις σύγχρονες εφαρμογές τους στη στρατιωτική τεχνολογία.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μελέτη των μη επανδρωμένων αεροσκαφών και των συστημάτων αντιμετώπισής τους, με εκτενή ανάλυση των τεχνολογιών ηλεκτρομαγνητικών παλμών ως μέσο αντιμετώπισης των UAV. Η έρευνα καλύπτει ένα ευρύ φάσμα θεμάτων, από τις μεθόδους αξιολόγησης και προσομοίωσης μέχρι τις τεχνικές προστασίας και παρεμβολής. Σημαντική είναι η αναφορά στις καινοτόμες στρατηγικές που προκύπτουν από τη συνδυασμένη χρήση τεχνολογιών EMP με συστήματα παρακολούθησης και παρεμβολής, γεγονός που αναδεικνύει τη συνεχή εξέλιξη των στρατηγικών ασφαλείας.

Η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα των ηλεκτρομαγνητικών παλμών ενδέχεται να έχει σημαντικές συνέπειες για την παγκόσμια ασφάλεια και την ισορροπία δυνάμεων. Μέσω της ανάλυσης των επιδράσεων των EMP σε σύγχρονα συστήματα αεράμυνας και την πιθανή ανάπτυξη νέων στρατηγικών αντίμετρων, η διατριβή αποσκοπεί στο να παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των προκλήσεων και των ευκαιριών που παρουσιάζονται στον τομέα της ηλεκτρονικής πολεμικής και στρατηγικής του 21ου αιώνα.

# **1. ΠΥΡΟΒΟΛΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΚΑΙ ΙΟΝΤΩΝ**

## **1.1 Ορισμός και Εισαγωγή**

Μια επιστημονική συσκευή που παράγει ηλεκτρόνια ή ιόντα και τα διαμορφώνει σε χρήσιμη δέσμη ονομάζεται πυροβόλο ηλεκτρονίων ή ιόντων (Electron & Ion Guns). Τα πυροβόλα ηλεκτρονίων και ιόντων χρησιμοποιούνται σε πολυάριθμες εφαρμογές βασικής έρευνας και βιομηχανίας, από την κατασκευή ημιαγωγών και τις δοκιμές μεγάλων δορυφόρων έως τις μικροσκοπικές μελέτες φυσικής επιφανειών. Επίσης, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως οι οθόνες καθοδικών ακτίνων, οι επιταχυντές σωματιδίων, οι μαζικοί φασματογράφοι, και οι διαδικασίες επεξεργασίας υλικών. Παρόλο που και οι δύο τύποι εκτοξευτών / πυροβόλων χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία δεσμών σωματιδίων, η βασική διαφορά τους έγκειται στο είδος των σωματιδίων που εκπέμπουν (ηλεκτρόνια ή ιόντα) και στις συγκεκριμένες εφαρμογές και τεχνικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν (Acharjee, n.d.)

### **1.1.2 Χαρακτηριστικά και Τύποι**

Το μήκος των πυροβόλων κυμαίνεται από ένα εκατοστό έως περισσότερο από μισό μέτρο. Η ενέργεια των παραγόμενων σωματιδίων ποικίλλει με τα μοντέλα χαμηλής ενέργειας να έχουν εύρος ενέργειας από 5 eV έως 1000 eV, ενώ τα μοντέλα υψηλής ενέργειας μπορούν να φτάσουν έως τα 100 keV.

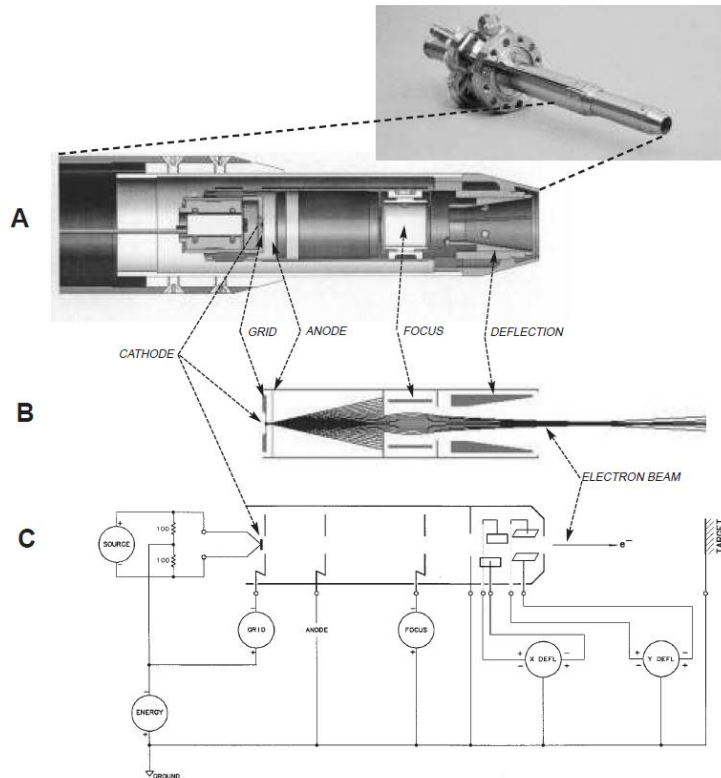
Ανάλογα με το πυροβόλο, μπορεί να δημιουργηθεί ένα ευρύ φάσμα ιόντων, όπως δραστικά ιόντα, ιόντα αλκαλικών μετάλλων και θετικά ιόντα των περισσότερων αερίων. Ορισμένα πυροβόλα είναι εστίασιμα και παράγουν μια μικρή περιοχή δέσμης, ενώ άλλα είναι πυροβόλα πλημμύρας και παράγουν μια δέσμη ευρείας γωνίας (Acharjee, n.d.).

## **1.2 Δομή και Λειτουργία ενός Τυπικού Πυροβόλου Ηλεκτρονίων**

Ένα τυπικό πυροβόλο ηλεκτρονίων αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη (Acharjee, n.d.):

1. Κάθοδος
2. Πλέγμα
3. Άνοδος
4. Φακοί εστίασης
5. Σύστημα εκτροπής (προαιρετικό)

Τα παραπάνω βασικά μέρη απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα:



**Εικόνα 1:** Τυπικό ηλεκτρονικό πυροβόλο  
 (Α) Τρισδιάστατη τομή του ηλεκτρονικού πυροβόλου,  
 (Β) Διάγραμμα των διαδρομών που θα ακολουθήσουν τα ηλεκτρόνια στο πυροβόλο όταν εφαρμόζεται ένα συγκεκριμένο σύνολο τάσεων και  
 (C) Μπλοκ διάγραμμα που δείχνει πώς τα εξαρτήματα του πυροβόλου και η παροχή ρεύματος συνδέονται ηλεκτρικά.

**Πηγή:** Acharjee, M. (n.d.)

Η κάθοδος θερμαίνεται σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, προκαλώντας την απελευθέρωση ηλεκτρονίων από την επιφάνειά της. Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ καθόδου και ανόδου. Η τελική ενέργεια των ηλεκτρονίων καθορίζεται από τη διαφορά μεταξύ του αρχικού δυναμικού και του τελικού δυναμικού όταν εξέρχονται από το πυροβόλο.

Το πλέγμα ελέγχου, ένα κρίσιμο εξάρτημα του πυροβόλου ηλεκτρονίων, ρυθμίζει αρχικά τη δέσμη με ακρίβεια. Συνήθως, εστιάζει τη δέσμη σε ένα συγκεκριμένο σημείο διασταύρωσης, βελτιστοποιώντας τη συγκέντρωση και την ενέργεια των ηλεκτρονίων. Επιπλέον, το πλέγμα έχει τη δυνατότητα να διακόψει ή να σταματήσει εντελώς τη δέσμη εάν εφαρμοστεί επαρκώς αρνητικό δυναμικό, παρέχοντας έτσι ένα μηχανισμό ασφαλείας και ελέγχου της ροής ηλεκτρονίων (Acharjee, n.d.).

- **Συστήματα Εστίασης**

Εξελιγμένα πρόσθετα εξαρτήματα επιτρέπουν ακόμη μεγαλύτερο έλεγχο του μεγέθους και της συγκέντρωσης της δέσμης ηλεκτρονίων. Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο σύστημα εστίασης

είναι ο φακός Einzel, γνωστός και ως μονός φακός, ο οποίος αποτελείται από τρία διαδοχικά ηλεκτρόδια. Αυτός ο φακός λειτουργεί εφαρμόζοντας κατάλληλα ηλεκτρικά πεδία για να συγκεντρώσει τη δέσμη. Πιο σύνθετα συστήματα, όπως οι φακοί ζουμ, προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη ευελιξία, επιτρέποντας όχι μόνο την εστίαση αλλά και την ταυτόχρονη επιτάχυνση ή επιβράδυνση των ηλεκτρονίων, προσαρμόζοντας έτσι την ενέργεια της δέσμης ανάλογα με τις απαιτήσεις του πειράματος ή της εφαρμογής (Acharjee, n.d.).

- **Συστήματα Εκτροπής**

Πολλά σύγχρονα πυροβόλα ηλεκτρονίων είναι εξοπλισμένα με εξελιγμένα συστήματα εκτροπής, τα οποία επιτρέπουν τη δυναμική μετατόπιση της δέσμης. Αυτά τα συστήματα καθιστούν δυνατή τη σάρωση μιας επιφάνειας ή την ακριβή εκτροπή της δέσμης προς συγκεκριμένους στόχους. Η εκτροπή μπορεί να επιτευχθεί με δύο κύριες μεθόδους: μέσω ηλεκτροστατικών πεδίων που δημιουργούνται από κατάλληλα διαμορφωμένα ηλεκτρόδια, ή με τη χρήση μαγνητικών πηνίων που παράγουν ελεγχόμενα μαγνητικά πεδία. Η επιλογή μεταξύ ηλεκτροστατικής και μαγνητικής εκτροπής εξαρτάται από παράγοντες όπως η ενέργεια της δέσμης και οι απαιτήσεις ακρίβειας της εκάστοτε εφαρμογής (Acharjee, n.d.).

### **1.3 Πυροβόλα Ιόντων**

Τα πυροβόλα ιόντων, που συχνά αναφέρονται και ως πηγές ιόντων, βασίζονται σε παρόμοιες θεωρητικές αρχές με τα πυροβόλα ηλεκτρονίων. Η γενική αρχιτεκτονική και τα βασικά εξαρτήματα ελέγχου παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες. Ωστόσο, υπάρχουν κρίσιμες διαφορές στον τρόπο παραγωγής και χειρισμού των σωματιδίων, καθώς τα ιόντα έχουν διαφορετικές ιδιότητες από τα ηλεκτρόνια, όπως μεγαλύτερη μάζα και θετικό φορτίο στην περίπτωση των κατιόντων.

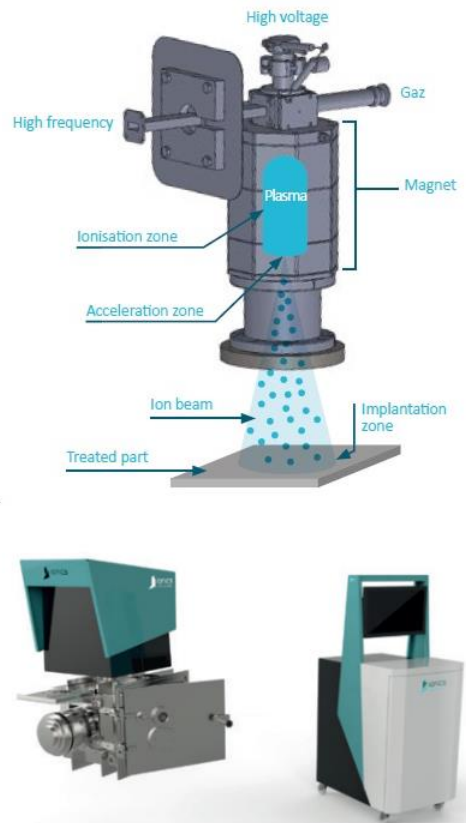
Σε αντίθεση με τα πυροβόλα ηλεκτρονίων που χρησιμοποιούν κάθοδο, τα πυροβόλα ιόντων βασίζονται σε εξειδικευμένες πηγές ιόντων για την παραγωγή των φορτισμένων σωματιδίων. Υπάρχουν δύο κύριες μέθοδοι παραγωγής ιόντων:

1. **Άμεση μέθοδος:** Χρησιμοποιείται συνήθως ένα αλκαλικό μέταλλο (όπως καίσιο ή ρουβίδιο) το οποίο θερμαίνεται για να εκπέμψει απευθείας θετικά ιόντα.
2. **Έμμεση μέθοδος:** Αρχικά παράγονται ηλεκτρόνια, τα οποία στη συνέχεια χρησιμοποιούνται για να ιονίσουν ένα αέριο (όπως αργό ή ξένο) μέσω κρούσεων, δημιουργώντας έτσι ιόντα.

Παρόλο που οι βασικές αρχές λειτουργίας για την εστίαση και τον έλεγχο της δέσμης παραμένουν παρόμοιες με αυτές των πυροβόλων ηλεκτρονίων, οι τάσεις που εφαρμόζονται στα διάφορα στοιχεία του πυροβόλου για τη διαχείριση θετικών ιόντων διαφέρουν σημαντικά.

Για παράδειγμα, τα ηλεκτρόδια επιτάχυνσης πρέπει να έχουν αρνητικό δυναμικό σε σχέση με την πηγή ιόντων, ενώ τα συστήματα εστίασης και εκτροπής πρέπει να προσαρμοστούν για να λάβουν υπόψη τη μεγαλύτερη μάζα και το διαφορετικό φορτίο των ιόντων. Επιπλέον, λόγω της μεγαλύτερης μάζας των ιόντων, συχνά απαιτούνται ισχυρότερα ηλεκτρικά ή μαγνητικά πεδία για την αποτελεσματική εκτροπή και εστίαση της δέσμης ιόντων σε σύγκριση με μια δέσμη ηλεκτρονίων αντίστοιχης ενέργειας (Acharjee, n.d.).

Μια συσκευή εκπομπής ιόντων απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



*Εικόνα 2: Πυροβόλα ιόντων*  
Πηγή: IONICS SA, 2022

## 1.4 Παραγωγή και Έλεγχος Δέσμης Ηλεκτρονίων και Ιόντων

### 1.4.1 Παραγωγή Ηλεκτρονίων

#### 1.4.1.1 Τυπική Κάθοδος

Η τυπική κάθοδος σε πολλά πυροβόλα ηλεκτρονίων αποτελείται από έναν θερμοϊονικό εκπομπό πυρίμαχου μετάλλου. Αυτή η διάταξη περιλαμβάνει ένα σύρμα λυγισμένο σε σχήμα φουρκέτας, το οποίο όταν θερμαίνεται σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες, εκπέμπει θερμότητα, φως και ηλεκτρόνια. Η επιλογή του υλικού για την κάθοδο είναι κρίσιμη, καθώς πρέπει να αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες και να έχει χαμηλό έργο εξόδου προκειμένου να καταστεί αποτελεσματική η εκπομπή των ηλεκτρονίων.

Σε πολλές προηγμένες σχεδιάσεις καθόδων, το σύρμα θερμαίνει έναν δίσκο που είναι προσαρτημένος στο καμπύλο σύρμα. Αυτός ο δίσκος, κατασκευασμένος από υλικό με ειδικές ιδιότητες εκπομπής, είναι η κύρια πηγή των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων. Η γεωμετρία του δίσκου επιτρέπει μια πιο ομοιόμορφη και ελεγχόμενη εκπομπή σε σύγκριση με το απλό σύρμα (Acharjee, n.d.).

- **Θερμιονική Εκπομπή**

Η θερμιονική εκπομπή είναι η θεμελιώδης διαδικασία πίσω από τη λειτουργία των καθόδων. Όταν η κάθοδος θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες, τα ηλεκτρόνια στην επιφάνεια του μετάλλου αποκτούν επαρκή θερμική ενέργεια για να υπερνικήσουν το έργο εξόδου του υλικού. Αυτό επιτρέπει στα ηλεκτρόνια να αποδεσμευτούν από τα γειτονικά άτομα μετάλλου και να εισέλθουν στην περιοχή κοντά στον δίσκο (Acharjee, n.d.; Dowell, n.d.).

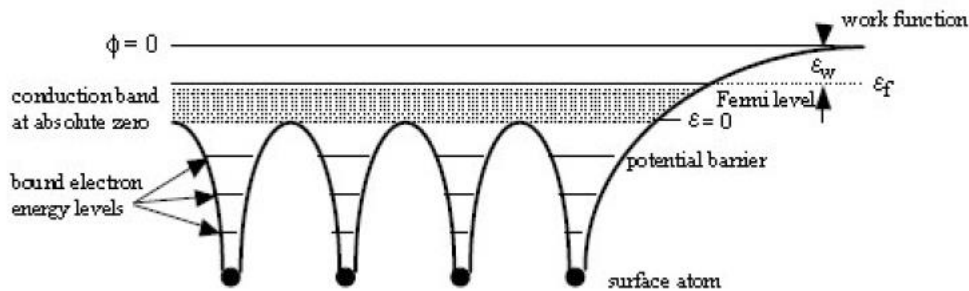
Η ποσότητα των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων εξαρτάται από τη θερμοκρασία της καθόδου και το έργο εξόδου του υλικού. Η σχέση αυτή περιγράφεται από την εξίσωση Richardson-Dushman, η οποία δείχνει ότι η πυκνότητα ρεύματος εκπομπής αυξάνεται εκθετικά με τη θερμοκρασία (Acharjee, n.d.).

Πιο αναλυτικά, σε μια μεταλλική κρυσταλλική δομή, τα εξωτερικά ηλεκτρόνια, γνωστά και ως ηλεκτρόνια σθένους, έχουν τροχιές που επικαλύπτονται, επιτρέποντας τους να μοιράζονται από όλα τα άτομα στο στερεό υλικό. Αυτά τα ηλεκτρόνια δεν είναι προσδεμένα σε συγκεκριμένα άτομα, καθιστώντας τα ικανά να αγωγίσουν ηλεκτρικό ρεύμα. Συνήθως, η συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε ένα μέταλλο είναι περίπου  $10^{23} \text{ cm}^{-3}$ , γεγονός που δημιουργεί μια κατάσταση πλάσματος. Μέσα στη δομή, το διάγραμμα της δυναμικής ενέργειας διαμορφώνεται από το συνδυασμένο αποτέλεσμα των παρακείμενων πυρήνων. Τα ηλεκτρόνια στις εσωτερικές στιβάδες παραμένουν δεσμευμένα σε μεμονωμένα άτομα, ενώ τα ηλεκτρόνια σθένους εξωτερικής στιβάδας μοιράζονται μεταξύ πολλών ατόμων στο πλέγμα.

Η κβαντομηχανική αλληλεπίδραση μεταξύ των εξωτερικών ηλεκτρονίων προκαλεί τη δημιουργία ενεργειακών ζωνών. Στα μέταλλα, η ζώνη με τη χαμηλότερη ενέργεια, που είναι πλήρως κατειλημμένη, επικαλύπτει τη ζώνη αγωγιμότητας. Ως αποτέλεσμα, τα κοινά ηλεκτρόνια μπορούν να μετακινούνται ελεύθερα υπό την επίδραση ενός ηλεκτρικού πεδίου. Στα όρια του κρυσταλλικού πλέγματος, απουσιάζει μια επιπλέον σειρά πυρήνων για τη διατήρηση του χαμηλού επιπέδου δυναμικής ενέργειας. Η διαφορά στο δυναμικό μεταξύ μιας περιοχής που βρίσκεται μακριά από την επιφάνεια και του πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας ορίζεται ως ύψος φραγμού ( $\Phi_B$ ). Η διαφορά δυναμικού μεταξύ μιας απομακρυσμένης περιοχής και της κορυφής της ζώνης αγωγιμότητας ονομάζεται επίπεδο Fermi ( $\Phi_F$ ). Το έργο εξαγωγής ( $W$ ) είναι η διαφορά μεταξύ του ύψους φραγμού και του επιπέδου Fermi. Για να αποβληθούν



ηλεκτρόνια από την επιφάνεια ενός μετάλλου, πρέπει να παρέχεται πρόσθετη ενέργεια στα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας, τέτοια ώστε  $\Phi > W$  (Roy, 2010). Τα παραπάνω απεικονίζονται στην εικόνα:



Εικόνα 3: Επιφάνεια μεταλλικού κρυσταλλικού δικτύου

Πηγή: Roy, 2010

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές της ενέργειας εξαγωγής σε ηλεκτρονιοβόλτ και των σημείων τήξης σε βαθμούς Κελσίου διαφόρων υλικών:

Metal	$\epsilon_w$ (eV)*	Melting Point (°C)
Aluminum	3.7	660
Barium	2.3	725
Carbon	4.4	~3550
Cesium	1.9	28
Copper	4.5	1083
Gold	4.6	1064
Iridium	5.2	2410
Iron	4.4	1535
Molybdenum	4.3	2620
Osmium	5.4	3045
Rhenium	5.1	3180
Thorium	3.4	1750
Tungsten	4.5	3410

Πίνακας 1: Το έργο εξόδου διαφόρων υλικών

Πηγή: Roy, 2010

- **Ρεύμα Εκπομπής και Δέσμης**

Μετά την απελευθέρωσή τους από την κάθοδο, η πορεία των ηλεκτρονίων καθορίζεται από την αρχική τους ενέργεια και τα ηλεκτρικά πεδία που τα περιβάλλουν. Το συνολικό ρεύμα ηλεκτρονίων που εγκαταλείπει την κάθοδο και κατευθύνεται προς τη γείωση ονομάζεται ρεύμα εκπομπής. Αυτό το ρεύμα μετριέται συνήθως σε microamperes ( $\mu A$ ) ή milliamperes (mA).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το τελικό ρεύμα δέσμης που φτάνει στον στόχο μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερο από το αρχικό ρεύμα εκπομπής. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες:

- α. Απώλειες λόγω συγκρούσεων με τα εσωτερικά μέρη του πυροβόλου.

- β. Απόκλιση της δέσμης λόγω ηλεκτροστατικών ή μαγνητικών πεδίων.
- γ. Επανασύνδεση ηλεκτρονίων με ιόντα στο περιβάλλον του πυροβόλου.
- δ. Απορρόφηση ηλεκτρονίων από διάφορα εξαρτήματα του συστήματος.

Η μέτρηση τόσο του ρεύματος εκπομπής όσο και του τελικού ρεύματος δέσμης είναι κρίσιμη για την αξιολόγηση της απόδοσης και της αποτελεσματικότητας του πυροβόλου ηλεκτρονίων (Acharjee, n.d.).

#### 1.4.1.2 Ειδικές Κάθοδοι

- **Κάθοδος Χαμηλού Φωτισμού**

Σε εφαρμογές όπου το έντονο φως που εκπέμπεται από την τυπική κάθοδο αποτελεί πρόβλημα, χρησιμοποιούνται κάθοδοι χαμηλού φωτισμού. Μια συχνά χρησιμοποιούμενη επιλογή είναι η κάθοδος οξειδίου του βαρίου (BaO). Αυτές οι κάθοδοι λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, μειώνοντας έτσι την εκπομπή φωτός, ενώ εξακολουθούν να παρέχουν επαρκή εκπομπή ηλεκτρονίων (Acharjee, n.d.).

Ωστόσο, οι κάθοδοι BaO έχουν ορισμένους περιορισμούς:

- α. Απαιτούν ισχυρότερο κενό για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά.
- β. Είναι πιο ευαίσθητες στη μόλυνση, γεγονός που μπορεί να μειώσει τη διάρκεια ζωής τους.
- γ. Έχουν χαμηλότερη μέγιστη πυκνότητα ρεύματος εκπομπής σε σύγκριση με τις τυπικές μεταλλικές καθόδους.

- **Κάθοδος Οξειδίου του Θορίου**

Οι κάθοδοι που χρησιμοποιούν οξείδιο του θορίου ( $\text{ThO}_2$ ) ως υλικό επικάλυψης προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα. Το  $\text{ThO}_2$  έχει χαμηλότερο έργο εξόδου από τα μη επικαλυμμένα πυρίμαχα μέταλλα, επιτρέποντας την εκπομπή περισσότερων ηλεκτρονίων σε δεδομένη θερμοκρασία. Αυτό οδηγεί σε:

- α. Υψηλότερη απόδοση εκπομπής.
- β. Χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας, που συμβάλλουν στην παράταση της διάρκειας ζωής της καθόδου.
- γ. Βελτιωμένη σταθερότητα εκπομπής με την πάροδο του χρόνου.

Μια ειδική παραλλαγή είναι η κάθοδος ιριδίου επικαλυμμένη με οξείδιο του θορίου. Το ιρίδιο, ως υπόστρωμα, προσφέρει εξαιρετική χημική αδράνεια και αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες, καθιστώντας αυτόν τον τύπο καθόδου ιδιαίτερα ανθεκτικό και κατάλληλο για απαιτητικές εφαρμογές (Acharjee, n.d.).

- **Κάθοδος Εξαβορίδιου του Λανθανίου**

Το εξαβορίδιο του λανθανίου (LaB6) αντιπροσωπεύει μια σημαντική εξέλιξη στην τεχνολογία καθόδων. Αυτές οι κάθοδοι κατασκευάζονται κόβοντας έναν μονοκρυστάλλο LaB6 σε σχήμα κώνου και επιπεδώνοντας την άκρη του. Τα κύρια πλεονεκτήματά τους είναι:

- α. Παραγωγή λεπτής δέσμης ηλεκτρονίων που μπορεί να εστιαστεί σε μια εξαιρετικά μικρή περιοχή (περίπου 10 μικρόμετρα).
- β. Υψηλή λαμπρότητα, που τις καθιστά ιδανικές για εφαρμογές ηλεκτρονικής μικροσκοπίας.
- γ. Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής σε σύγκριση με τις συμβατικές κάθοδους βολφραμίου.
- δ. Χαμηλότερο έργο εξόδου, επιτρέποντας υψηλότερη εκπομπή σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Ωστόσο, οι κάθοδοι LaB6 απαιτούν καλύτερο κενό και είναι πιο ευαίσθητες στις συνθήκες λειτουργίας, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη χρήση τους σε ορισμένες εφαρμογές (Acharjee, n.d.).

#### **1.4.2 Παραγωγή Ιόντων**

Υπάρχουν τρεις κύριες μέθοδοι παραγωγής ιόντων: ιονισμός αερίου μετάλλων, ιονισμός αερίου με μικροκύματα (πλάσμα) και ιονισμός στερεού.

##### *1.4.2.1 Ιονισμός Αερίου*

Στις πηγές ιόντων, το νήμα θερμαίνεται από το τροφοδοτικό της πηγής και εκπέμπει ηλεκτρόνια. Ένα αέριο, όπως οξυγόνο ή αργό, εισάγεται κοντά στο νήμα και τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και συγκρούονται με τα μόρια του αερίου. Αν η ενέργεια είναι επαρκής, παράγονται θετικά ιόντα. Ο αριθμός των παραγόμενων ιόντων εξαρτάται από την ποσότητα των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων, την ενέργειά τους, το είδος του αερίου και την ποσότητα του αερίου (Acharjee, n.d.).

##### *1.4.2.2 Πλάσμα*

Η πηγή ιόντων μικροκυμάτων παράγει ιόντα θερμαίνοντας το αέριο με μικροκύματα, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο το πλάσμα - μια κατάσταση όπου τα μόρια του αερίου διαχωρίζονται σε ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα ιόντα διέρχονται από ένα φίλτρο, που τα διαχωρίζει ανάλογα με τη μάζα τους, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο τη διαλογή και την τελική επιλογή των επιθυμητών εξ αυτών. Πρόσθετοι φακοί ρυθμίζουν την ενέργεια και την εστίαση των επιλεγμένων ιόντων (Acharjee, n.d.).

#### *1.4.2.3 Ιονισμός Στερεού*

Ο ιονισμός στερεάς επιφάνειας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ιόντων αλκαλικών μετάλλων όπως Cs<sup>+</sup>, Li<sup>+</sup> ή K<sup>+</sup>. Οι στερεές ενώσεις αλκαλικών μετάλλων θερμαίνονται και απελευθερώνουν ιόντα στην επιφάνεια, τα οποία επιταχύνονται και εστιάζονται σε δέσμη. Τα παραγόμενα ιόντα επιταχύνονται και εξάγονται από την περιοχή ιονισμού. Η τάση του ανοίγματος εξαγωγής είναι αρνητική σε σχέση με την ενέργεια των ιόντων, συμβάλλοντας στην εξαγωγή και στη συγκέντρωσή τους. Επιπλέον εξαρτήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη ρύθμιση της δέσμης (Acharjee, n.d.; Vukanić & Terzić, 1973).

### **1.5 Μέθοδοι Παρατήρησης της Δέσμης Ηλεκτρονίων ή Ιόντων**

Δεδομένου ότι μια δέσμη ηλεκτρονίων ή ιόντων είναι αόρατη, θα πρέπει αυτή να παρατηρείται μέσω των επιδράσεών της, κάτι που μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας κάποιου είδους ανιχνευτή. Οι οθόνες φωσφόρου, οι οποίες εκπέμπουν φως όταν έρχονται σε επαφή με ηλεκτρόνια ή ιόντα και τα κύπελλα Faraday, τα οποία συλλέγουν τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα και επιτρέπουν τη μέτρηση του ρεύματος, είναι δύο δημοφιλείς τύποι ανιχνευτών.

#### **1.5.1 Οθόνη Φωσφόρου**

Η οθόνη φωσφόρου επιτρέπει την παρατήρηση της δέσμης ηλεκτρονίων ή ιόντων σε πραγματικό χρόνο. Όταν τα σωματίδια υψηλής ενέργειας προσπίπτουν στην οθόνη, αυτή εκπέμπει φως, συνήθως μπλε ή πράσινο, ανάλογα με το υλικό του φωσφόρου. Η δέσμη εμφανίζεται ως ένας μικρός, συμπαγής κύκλος, γνωστός ως «κηλίδα». Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ευθυγράμμιση της δέσμης και τον καθορισμό των βέλτιστων παραμέτρων λειτουργίας του πυροβόλου, επιτρέποντας την παρατήρηση της θέσης, του μεγέθους και του σχήματος της κηλίδας (Acharjee, n.d.).

#### **1.5.2 Κύπελλο Faraday**

Το κύπελλο Faraday χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του πραγματικού ρεύματος της δέσμης των ηλεκτρονίων ή των ιόντων. Αποτελείται από ένα καλώδιο εξόδου συνδεδεμένο με ένα αμπερόμετρο και ένα θωρακισμένο κύπελλο με άνοιγμα που συλλαμβάνει τα σωματίδια. Μπορεί να λειτουργεί εξ αποστάσεως ή να τοποθετείται στο άκρο του πυροβόλου. Ορισμένα κύπελλα Faraday περιλαμβάνουν και οθόνες φωσφόρου για την ταυτόχρονη παρατήρηση και μέτρηση της δέσμης. Η κατανομή του ρεύματος στην κηλίδα μπορεί να μετρηθεί χρησιμοποιώντας ένα σύνολο μικροσκοπικών κυπέλλων ή ένα κύπελλο τοποθετημένο σε ένα χειριστήριο, το οποίο υποδεικνύει και την ομοιομορφία της δέσμης (Acharjee, n.d.; Vukanić & Terzić, 1973).

## **1.6 Χαρακτηριστικά Δεσμών**

### **1.6.1 Ενέργεια Δέσμης**

Η ενέργεια της δέσμης καθορίζεται από τη συνολική διαφορά δυναμικού που επιταχύνει τα ηλεκτρόνια ή τα ιόντα από την κάθοδο ή την πηγή των ιόντων προς το τελικό άνοιγμα του πυροβόλου. Αυτή η ενέργεια, ελεγχόμενη από το τροφοδοτικό ενέργειας εκφράζεται σε ηλεκτρονιοβόλτ (eV ή keV) και κυμαίνεται από 5 eV έως 100 keV, ανάλογα με το πυροβόλο. Η ενεργειακή διασπορά, είναι συνήθως μικρότερη από μισό eV και οφείλεται στο γεγονός ότι κανένα ζεύγος σωματιδίων δεν εξέρχεται από το σύστημα με ακριβώς την ίδια ενέργεια (Acharjee, n.d.; Vukanić & Terzić, 1973).

### **1.6.2 Ρεύμα Δέσμης**

Το ρεύμα της δέσμης, μετρημένο σε mA,  $\mu$ A ή nA, είναι το συνολικό ρεύμα ηλεκτρονίων ή ιόντων που εξέρχεται από το πυροβόλο. Αυτό διαφέρει από το ρεύμα εκπομπής, το οποίο είναι το συνολικό ρεύμα που εξέρχεται από την κάθοδο ή την πηγή των ιόντων και κατευθύνεται προς τη γείωση. Μέρος των σωματιδίων χάνεται κατά τη διέλευση από το πυροβόλο, με αποτέλεσμα το τελικό ρεύμα της δέσμης στον στόχο να είναι χαμηλότερο από το αρχικό ρεύμα εκπομπής (Acharjee, n.d.; Vukanić & Terzić, 1973).

### **1.6.3 Μέγεθος Κηλίδας**

Το μέγεθος της κηλίδας ορίζεται ως η διάμετρος της δέσμης σε μια συγκεκριμένη απόσταση λειτουργίας από το πυροβόλο, κυμαινόμενο από 10  $\mu$ m έως αρκετές εκατοντάδες mm. Η μέτρηση της κηλίδας περιγράφεται ως το πλήρες εύρος στο ήμισυ του μέγιστου (FWHM: Full-Width Half-Max measurement), που είναι το πλάτος της κηλίδας που περιέχει όλες τις πυκνότητες ρεύματος δέσμης μεγαλύτερες από το ήμισυ της μέγιστης πυκνότητας. Μπορεί να πραγματοποιηθεί οπτικά σε μια οθόνη φωσφόρου ή μέσω συστοιχίας κυπέλλων Faraday. Σε πυροβόλα πλημμύρας, που στερούνται οπτικών εστίασης, το μέγεθος της κηλίδας καθορίζεται από την απόσταση εργασίας, ενώ άλλοι παράγοντες λειτουργίας επίσης επηρεάζουν το μέγεθός της (Acharjee, n.d.).

### **1.6.4 Ομοιομορφία Δέσμης και Πυκνότητα Ρεύματος**

Η ομοιομορφία της δέσμης περιγράφει την κατανομή του ρεύματος εντός της κηλίδας. Η πυκνότητα ρεύματος δέσμης αναφέρεται στο ρεύμα ανά μονάδα επιφάνειας στον στόχο, εκφραζόμενη σε  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>. Η κατανομή του ρεύματος δέσμης συνήθως ακολουθεί μια κανονική καμπύλη (καμπύλη Gauss), με μεγαλύτερη ένταση στο κέντρο και εξασθένιση προς την

περιφέρεια. Ορισμένα πυροβόλα περιέχουν εξαρτήματα σχεδιασμένα για τη δημιουργία πιο ομοιόμορφης κατανομής σε όλη την περιοχή της δέσμης (Acharjee, n.d.).

## **1.7 Ενεργοποίηση και Απενεργοποίηση της Δέσμης**

### **1.7.1 Τερματισμός μέσω Πλέγματος**

Το πλέγμα, γνωστό και ως Wehnelt ή G-1, είναι το πρώτο ηλεκτρικό στοιχείο με το οποίο έρχονται σε επαφή τα ηλεκτρόνια ή τα ιόντα μετά την εκπομπή τους από την κάθοδο ή την πηγή ιόντων. Το στοιχείο αυτό ελέγχει και μπορεί να διακόψει τη δέσμη. Σε ένα πυροβόλο ηλεκτρονίων, όταν η τάση του πλέγματος είναι αρκετά αρνητική σε σχέση με την κάθοδο, τα ηλεκτρόνια δεν απελευθερώνονται. Παρομοίως, σε πυροβόλα ιόντων, τα θετικά ιόντα μπορούν να καταστέλλονται από μια θετική τάση πλέγματος. Η αποκοπή του πλέγματος είναι η χαμηλότερη τάση που απαιτείται για την πλήρη διακοπή της διέλευσης ηλεκτρονίων ή ιόντων προς τον στόχο. Η τάση του πλέγματος ελέγχεται χειροκίνητα από ένα ποτενσιόμετρο στο τροφοδοτικό, επιτρέποντας την απενεργοποίηση της δέσμης κατά τη λειτουργία του πυροβόλου (Acharjee, n.d.).

### **1.7.2 Παλμική Λειτουργία Δέσμης**

Η παλμική λειτουργία αναφέρεται στον ταχύ κύκλο διακοπής και επανεκκίνησης της ροής ηλεκτρονίων ή ιόντων. Για τη διακοπή της δέσμης, η παλμική λειτουργία επιτυγχάνεται μέσω της ταχείας μεταβολής της τάσης πλέγματος στο δυναμικό αποκοπής της. Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της τάσης πλέγματος περιλαμβάνουν (Acharjee, n.d.):

1. **Χειροκίνητο έλεγχο με ποτενσιόμετρο:** Η χρήση του περιστροφικού διακόπτη στην πρόσοψη του τροφοδοτικού για τη χειροκίνητη εναλλαγή της τάσης πλέγματος αποτελεί τον απλούστερο τρόπο ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της δέσμης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η μέθοδος διακοπής και ενεργοποίησης της δέσμης είναι σχετικά αργή.
2. **Απομακρυσμένο έλεγχο μέσω υπολογιστή:** Αποστολή σήματος εισόδου στους απομακρυσμένους ακροδέκτες που βρίσκονται στο πίσω μέρος του τροφοδοτικού. Αυτή η μέθοδος προσφέρει μεγαλύτερη ταχύτητα αλλά μπορεί να μην παρέχει αρκετά γρήγορη παλμική λειτουργία.
3. **Διπλά τροφοδοτικά πλέγματος με είσοδο σήματος TTL:** Η δέσμη παλμοδοτείται μέσω ενός παλλόμενου σήματος λογικής τρανζίστορ-τρανζίστορ (TTL: Transistor-Transistor Logic ) που εναλλάσσεται γρήγορα μεταξύ των δύο τροφοδοτικών.

4. **Χωρητική παλμοδότηση με εξωτερική γεννήτρια παλμών:** Προσφέρει το μικρότερο μήκος παλμού και τον ταχύτερο χρόνο ανόδου/πτώσης. Δεν είναι κατάλληλη για μεγάλης διάρκειας παλμούς ή για συνεχή λειτουργία.

### ***1.7.3 Εκτροπή Δέσμης***

Η εκτροπή δέσμης επιτυγχάνεται μέσω της εκτροπής της δέσμης ηλεκτρονίων ώστε να σταματήσει η άφιξη των ηλεκτρονίων στον στόχο. Τα ηλεκτρόνια απορροφώνται από πλάκες στα πλευρικά τοιχώματα του πυροβόλου αντί να φτάσουν στον στόχο. Η εκτροπή ελέγχεται από ένα παλλόμενο σήμα TTL ή από εξωτερική γεννήτρια TTL, με χρόνο ανόδου/πτώσης περίπου τα 500 ns. Αυτή η μέθοδος είναι ταχύτερη από την κανονική παλμοδότηση, καθώς δεν χρησιμοποιεί το πλέγμα και δεν απενεργοποιεί πραγματικά τη δέσμη ηλεκτρονίων (Acharjee, n.d.).

## **1.8 Στόχευση Δέσμης**

### ***1.8.1 Μηχανική Ευθυγράμμιση***

Η θέση του πυροβόλου μπορεί να ρυθμιστεί μηχανικά για την υποβοήθηση της εστίασης της δέσμης ηλεκτρονίων ή ιόντων στον στόχο. Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας μια περιστρεφόμενη φλάντζα ή μια συσκευή που ονομάζεται ευθυγραμμιστής θύρας (Port Aligner), η οποία αποτελείται από δύο περιστρεφόμενους υπό γωνία δίσκους (Acharjee, n.d.).

### ***1.8.2 Εκτροπή***

Ένας ηλεκτροστατικός μηχανισμός εκτροπής είναι διαθέσιμος σε αρκετά από τα πυροβόλα ηλεκτρονίων και ιόντων. Υπάρχουν δύο ζεύγη πλακών (X+, X- και Y+, Y-) τοποθετημένα κατά μήκος της διαδρομής της δέσμης στη στήλη του πυροβόλου, μετά τους φακούς εστίασης. Η πορεία της δέσμης κάμπτεται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται όταν τα χειροκίνητα ελεγχόμενα τροφοδοτικά X και Y εφαρμόζουν τάσεις σε αυτές τις πλάκες. Η δέσμη τοποθετείται μετακινώντας την γύρω από το επίπεδο του στόχου (Acharjee, n.d.).

### ***1.8.3 Σάρωση***

Η σάρωση είναι η διαδικασία συνεχούς κίνησης της δέσμης ηλεκτρονίων ή ιόντων πάνω από έναν στόχο για την ομοιόμορφη κάλυψη μιας περιοχής με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η σάρωση είναι συγκρίσιμη με τη λειτουργία μιας οθόνης καθοδικών ακτίνων ή τηλεόρασης. Οι πλάκες εκτροπής X και Y λαμβάνουν δύο συγχρονισμένες, κυκλικά μεταβαλλόμενες τάσεις, επιτρέποντας στη δέσμη να κινείται σε ένα συγχρονισμένο μοτίβο. Από οπτική άποψη, η δέσμη

φαίνεται να καλύπτει ένα μεγάλο τετράγωνο αντί για μία μικρή περιοχή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η σάρωση πραγματοποιείται με μη συγχρονισμένο τρόπο (Acharjee, n.d.).

#### **1.8.4 Ταλάντωση Δέσμης**

Η μαγνητική ταλάντωση δέσμης, που απαντάται σε αρκετά πυροβόλα υψηλής ενέργειας, κινεί τη δέσμη ηλεκτρονίων πάνω από την περιοχή του στόχου σε ένα ασύγχρονο μοτίβο μέσω ρευμάτων σε ηλεκτρομαγνητικά πηνία. Ο στόχος είναι να καλύψει, όπως και η σάρωση, μια μεγαλύτερη περιοχή όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφα (Acharjee, n.d.).

### **1.9 Έλεγχος Τροφοδοτικών**

Η μονάδα τροφοδοσίας του συστήματος πυροβόλου ηλεκτρονίων ή ιόντων είναι μια ολοκληρωμένη μονάδα με ηλεκτρονικά κυκλώματα, μετρητές και χειριστήρια που μετατρέπει την εξωτερική ηλεκτρική ισχύ στις απαραίτητες τάσεις και ρεύματα για τη λειτουργία του πυροβόλου. Διαφορετικά τμήματα του πυροβόλου τροφοδοτούνται με διαφορετικές τάσεις από ξεχωριστά τροφοδοτικά εντός της μονάδας τροφοδοσίας. Η παρακολούθηση της εξόδου ενός τροφοδοτικού γίνεται μέσω ψηφιακού βολτόμετρου (DVM: Digital Voltage Meter) ή αναλογικού μετρητή (με δείκτη και κλίμακα) (Acharjee, n.d.).

#### **1.9.1 Χειροκίνητος και Απομακρυσμένος Έλεγχος**

Ο έλεγχος αυτών των ανεξάρτητων τροφοδοτικών μπορεί να γίνει χειροκίνητα μέσω των ποτενσιόμετρων στην πρόσοψη της μονάδας τροφοδοσίας ή απομακρυσμένα μέσω ενός σήματος στους ακροδέκτες ελέγχου. Το χειροκίνητο ποτενσιόμετρο ρυθμίζει ένα σήμα μεταξύ 0 και 10 V, ελέγχοντας άμεσα και αναλογικά την έξοδο κάθε μεμονωμένου τροφοδοτικού. Οι ακροδέκτες απομακρυσμένου ελέγχου επιτρέπουν τον προγραμματισμό των τροφοδοτικών μέσω τάσης ή αντίστασης. Το σήμα τάσης μπορεί να προέρχεται από οποιαδήποτε πηγή, είτε αναλογικό τροφοδοτικό, είτε υπολογιστή εξοπλισμένο με μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό σήμα. Για τον προγραμματισμό μέσω αντίστασης, απαιτείται η σύνδεση αντιστάτη στους απομακρυσμένους ακροδέκτες (Acharjee, n.d.).

#### **1.9.2 Έλεγχος Ανάδρασης**

Εκτός από τις τυπικές επιλογές χειροκίνητου ή απομακρυσμένου ελέγχου, υπάρχει επίσης μια λειτουργία ελέγχου με ανάδραση για το τροφοδοτικό της πηγής, γνωστή ως Έλεγχος Ρεύματος Εκπομπής (ECC: Emission Current Control). Στα πυροβόλα ηλεκτρονίων, αυτό το κύκλωμα ανάδρασης ελέγχει το τροφοδοτικό θέρμανσης του νήματος για τη διατήρηση σταθερού ρεύματος εκπομπής της καθόδου. Παρομοίως, στα πυροβόλα ιόντων αλκαλικών μετάλλων, το



ECC ελέγχει τη θέρμανση της κάψουλας ιόντων, εξασφαλίζοντας σταθερό ρεύμα εκπομπής ιόντων. Στα πυροβόλα ιόντων αερίου, το κύκλωμα ανάδρασης ECC ρυθμίζει τα ηλεκτρόνια που χρησιμοποιούνται για ιονισμό. Ωστόσο, επειδή ο ιονισμός εξαρτάται επίσης από την πίεση του αερίου και άλλες παραμέτρους, αυτός ο έλεγχος δεν ρυθμίζει πλήρως την εκπομπή ιόντων από την πηγή ιόντων (Acharjee, n.d.).

## **1.10 Κίνδυνοι**

Η ασφαλής λειτουργία των πυροβόλων ηλεκτρονίων και ιόντων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή λόγω των εγγενών κινδύνων που σχετίζονται με την υψηλή τάση και την πιθανή παραγωγή ακτινοβολίας X. Στην παρούσα ενότητα, αναλύονται οι βασικές προφυλάξεις και τα πρωτόκολλα ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται κατά τη χρήση αυτών των συσκευών.

### **1.10.1 Υψηλή Τάση**

Η λειτουργία πυροβόλων ηλεκτρονίων/ιόντων προϋποθέτει την εφαρμογή υψηλών τάσεων, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την αυστηρή τήρηση των διαδικασιών γείωσης και των σχετικών μέτρων ασφαλείας. Είναι κρίσιμο η ενεργοποίηση της τροφοδοσίας να πραγματοποιείται μόνο όταν η συσκευή είναι εγκατεστημένη σε κατάλληλα εκκενωμένο θάλαμο υψηλού κενού. Συγκεκριμένα, για καθόδους/πηγές ιόντων από πυρίμαχα μέταλλα, απαιτείται κενό μεγαλύτερο από  $1 \times 10^{-5}$  torr, ενώ για καθόδους από LaB<sub>6</sub> και BaO, το κενό πρέπει να υπερβαίνει το  $1 \times 10^{-7}$  torr. Η μη τήρηση αυτών των προδιαγραφών ενδέχεται να οδηγήσει σε σχηματισμό ηλεκτρικών τόξων, με πιθανές συνέπειες την καταστροφή του εξοπλισμού και τον σοβαρό κίνδυνο ηλεκτροπληξίας για τον χειριστή.

Επιπλέον, είναι απαραίτητο να διατηρούνται άθικτες όλες οι ασφαλιστικές διατάξεις της τροφοδοσίας και του καλωδίου υψηλής τάσης. Η αποσύνδεση ή παράκαμψη αυτών των μηχανισμών ασφαλείας αντενδείκνυται ρητά. Τέλος, λόγω των σοβαρών κινδύνων που ενέχει η υψηλή τάση, δεν συνιστάται η κατασκευή αυτοσχέδιων τροφοδοτικών (Acharjee, n.d.).

### **1.10.2 Ακτινοβολία X**

Η λειτουργία πυροβόλων ηλεκτρονίων υψηλής ισχύος (>10 keV) συνοδεύεται από τον κίνδυνο παραγωγής ακτινοβολίας X. Αυτή η ακτινοβολία προκύπτει όταν ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας προσκρούουν σε στόχους ή άλλες επιφάνειες εντός του θαλάμου κενού. Για την αντιμετώπιση αυτού του κινδύνου, είναι απαραίτητη η ενσωμάτωση κατάλληλης ασπίδας ακτινοβολίας X στο σύστημα κενού υποδοχής.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στα παράθυρα θέασης. Συνιστάται η χρήση μολυβδωμένου γυαλιού και η κάλυψή τους κατά τη λειτουργία πυροβόλων υψηλής ισχύος. Η

άμεση παρατήρηση της καθόδου ή της περιοχής στόχου μέσω συμβατικών παραθύρων θέασης ενέχει σοβαρούς κινδύνους για την υγεία, καθώς τα κοινά παράθυρα δεν παρέχουν προστασία από τις ακτίνες X.

Η συμμόρφωση με τα παραπάνω μέτρα ασφαλείας είναι ζωτικής σημασίας για την προστασία τόσο του προσωπικού όσο και του εξοπλισμού κατά τη χρήση και τη διεξαγωγή πειραμάτων με πυροβόλα ηλεκτρονίων/ιόντων (Acharjee, n.d.).

## **2. ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ**

Η μελέτη των εκπομπών των πυροβόλων ιόντων και ηλεκτρονίων αποτελεί ένα πεδίο έρευνας που διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην εξέλιξη της σύγχρονης Φυσικής και Τεχνολογίας. Τα πυροβόλα αυτά, τα οποία χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές, βασίζονται σε πολύπλοκες αρχές λειτουργίας και απαιτούν εξειδικευμένη κατανόηση των μηχανισμών εκπομπής και αλληλεπίδρασης των σωματιδίων.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις πρωτοποριακές μελέτες του παρελθόντος, οι οποίες, παρά τους τεχνολογικούς τους περιορισμούς, προώθησαν σημαντικά τη γνώση και έθεσαν τα θεμέλια για μελλοντικές εξελίξεις. Εξερευνώντας τόσο τις ιστορικές όσο και τις σύγχρονες μελέτες, αναδεικνύονται οι συνεχείς προκλήσεις και τα επιτεύγματα που έχουν διαμορφώσει το πεδίο των εκπομπών ιόντων και ηλεκτρονίων. Αυτό το κεφάλαιο προσφέρει μια ολοκληρωμένη κατανόηση των θεμελιωδών αρχών, μεθόδων έρευνας και τεχνολογικών εφαρμογών που σχετίζονται με τα πυροβόλα ιόντων και ηλεκτρονίων, προσφέροντας πολύτιμες γνώσεις για ερευνητές, φοιτητές και επαγγελματίες του χώρου.

### **2.1 Καινοτόμες Μέθοδοι Παραγωγής Δεσμών Ηλεκτρονίων Υψηλής Πυκνότητας**

Μια σημαντική έρευνα που διεξήχθη το 1999 στον τομέα των επιταχυντών σωματιδίων και των πηγών μικροκυμάτων ανέδειξε καινοτόμες μεθόδους για τη δημιουργία δεσμών ηλεκτρονίων υψηλής πυκνότητας και ομαδοποίησης. Οι ερευνητές Len και Mako παρουσίασαν πρωτοποριακές τεχνικές που θεωρήθηκαν ιδιαίτερα υποσχόμενες: την εξωτερική εκπομπή πεδίου, τη φωτοεκπομπή, την εκπομπή από σιδηροηλεκτρικά υλικά και την αυτο-ομαδοποίηση μέσω δευτερογενούς εκπομπής, γνωστή και ως Μικροπαλμικό Πυροβόλο Ηλεκτρονίων (MPG: Micro-pulse Electron Gun).

Το MPG αποτέλεσε μια σημαντική καινοτομία για την εποχή, χρησιμοποιώντας μικροκυματικά πεδία για τη δημιουργία φυσικά ομαδοποιημένων δεσμών ηλεκτρονίων. Η τεχνολογία αυτή πέτυχε υψηλά φορτία ομάδων, σύντομους παλμούς και υψηλές πυκνότητες ρεύματος σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από 1 έως 12 GHz. Τα πειραματικά δεδομένα της εποχής επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα της αυτο-ομαδοποίησης, της ψυχρής εκπομπής ηλεκτρονίων και της αντοχής στη μόλυνση.

Η χρήση σιδηροηλεκτρικών υλικών για την παραγωγή ηλεκτρονίων αποτέλεσε επίσης μια σημαντική πρόοδο. Η μέθοδος αυτή εκμεταλλευόταν τη μετατροπή φάσης και την ταχεία αλλαγή πεδίου για να επιτευχθούν υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Ωστόσο, η πλήρης κατανόηση της Φυσικής πίσω από αυτόν τον μηχανισμό εκπομπής παρέμενε τότε ένα ανοιχτό πεδίο έρευνας. Τα πλεονεκτήματα αυτών των νέων τεχνολογιών ήταν πολλαπλά. Προσέφεραν

υψηλή απόδοση, ενώ η δυνατότητα άμεσης διαμόρφωσης της εκπεμπόμενης δέσμης άνοιγε νέους ορίζοντες στον έλεγχο και την προσαρμογή των παραγόμενων δεσμών. Ιδιαίτερα το MPG ξεχώρισε για τη μεγάλη διάρκεια ζωής του και την ευελιξία του στην παραγωγή διαφόρων τύπων παλμών.

Παρά τις σημαντικές προόδους, υπήρχαν ακόμη προκλήσεις που έπρεπε να αντιμετωπιστούν. Η άμεση διαμόρφωση της εκπομπής παρέμενε τεχνικά απαιτητική λόγω της υψηλής χωρητικότητας των συστημάτων. Επιπλέον, απαιτούνταν περαιτέρω έρευνα για τη βελτιστοποίηση της διάρκειας ζωής των πηγών σε συνθήκες υψηλού ρεύματος και υψηλού ρυθμού επανάληψης.

Οι εφαρμογές αυτών των τεχνολογιών θεωρήθηκαν πολυάριθμες και ποικίλες. Από την ακτινογραφία και την ακτινοθεραπεία μέχρι την παραγωγή ραδιοσυχνοτήτων και τη χρήση τους στους επιταχυντές υψηλής ενέργειας, οι δυνατότητες φαίνονταν εκτενείς.

Συμπερασματικά, η έρευνα των Len & Mako το 1999 αντιπροσώπευε ένα σημαντικό άλμα στην τεχνολογία παραγωγής δεσμών ηλεκτρονίων. Ενώ είχαν ήδη αποδείξει την αξία τους σε πειραματικό επίπεδο, η πλήρης αξιοποίηση του δυναμικού τους σε πρακτικές εφαρμογές απαιτούσε συνεχή έρευνα και ανάπτυξη. Η μελέτη αυτή έθεσε τα θεμέλια για μελλοντικές εξελίξεις στον τομέα των επιταχυντών σωματιδίων και των συναφών πεδίων (Len & Mako, 1999).

## **2.2 Ανάλυση της Κίνησης Ιόντων σε Φωτοκαθοδικά Πυροβόλα RF Μακρών Παλμών**

Η μελέτη του Lewellen, που διεξήχθη το 2002 αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα στην κατανόηση της συμπεριφοράς των ιόντων σε φωτοκαθοδικά πυροβόλα RF (Radio Frequency) μακρών παλμών, με ιδιαίτερη έμφαση στις πηγές φωτός επόμενης γενιάς. Η έρευνα αυτή κάλυψε ένα κρίσιμο κενό στην κατανόηση των προκλήσεων που αντιμετώπιζαν τα προηγμένα συστήματα πυροβόλων ηλεκτρονίων, ειδικά όσον αφορά τον βομβαρδισμό ιόντων.

Η μεθοδολογία της έρευνας χαρακτηρίστηκε από καινοτόμες προσεγγίσεις στην προσομοίωση και στη μοντελοποίηση. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν το λογισμικό PARMELA για την προσομοίωση της κίνησης ιόντων σε πυροβόλα συνεχούς κύματος, ένα σενάριο που προσέγγιζε τις συνθήκες λειτουργίας των πηγών φωτός επόμενης γενιάς. Μια σημαντική καινοτομία της μελέτης ήταν η μοντελοποίηση του πεδίου της δέσμης ηλεκτρονίων ως ομοιόμορφα φορτισμένος κύλινδρος, εστιάζοντας στη μηδενική αρμονική των ηλεκτρικών πεδίων της δέσμης. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε μια πιο ρεαλιστική

αναπαράσταση των συνθηκών εντός του πυροβόλου, παρέχοντας έτσι πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα της έρευνας προσέφεραν σημαντικές γνώσεις σχετικά με την επίδραση των πεδίων των ραδιοσυχνοτήτων στην κίνηση των ιόντων. Η ανάλυση κατέδειξε τον τρόπο με τον οποίο τα πεδία RF συνεχούς κύματος επηρέαζαν την τροχιά και την ενέργεια των ιόντων, παρέχοντας εκτιμήσεις για την ενέργεια πρόσκρουσης και την κατανομή των ιόντων στην περιοχή της καθόδου. Επιπλέον, η σύγκριση της συμπεριφοράς διαφορετικών ειδών ιόντων, συγκεκριμένα των  $H^+$  και  $H_2O^+$ , προσέφερε πολύτιμες πληροφορίες για το πώς η σύνθεση των υπολειμματικών αερίων μπορούσε να επηρεάσει τη λειτουργία του πυροβόλου.

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα ευρήματα ήταν ο ρόλος του υψηλού ρεύματος δέσμης ως ισχυρού υπερσυγκεντρωτικού φακού. Αυτό το φαινόμενο οδηγούσε σε διασκορπισμό του ρεύματος ιόντων σε ευρύτερη περιοχή της καθόδου, μειώνοντας έτσι την τοπική συγκέντρωση της ενέργειας πρόσκρουσης. Η επίδραση αυτή αποδείχθηκε ιδιαίτερα σημαντική για τη διατήρηση της ακεραιότητας της καθόδου και την παράταση της διάρκειας ζωής της.

Η έρευνα αποκάλυψε επίσης μια σημαντική διαφορά στην επίδραση της φόρτισης της δέσμης μεταξύ ελαφρών και βαρέων ιόντων. Συγκεκριμένα, τα βαρύτερα ιόντα, όπως το  $H_2O^+$ , επηραζόνταν πιο έντονα από τη φόρτιση δέσμης σε σύγκριση με τα ελαφρύτερα ιόντα  $H^+$ . Αυτή η διαφοροποίηση υπογράμμισε τη σημασία της λεπτομερούς κατανόησης της σύνθεσης των υπολειμματικών αερίων στο σύστημα για τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του πυροβόλου.

Για την ποσοτικοποίηση των επιδράσεων των ιόντων, πραγματοποιήθηκαν λεπτομερείς υπολογισμοί του ρυθμού παραγωγής ιόντων και του ρεύματος ιόντων που προσέκρουε στην κάθοδο. Υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, η μέση κινητική ενέργεια πρόσκρουσης των ιόντων υδρογόνου βρέθηκε να είναι περίπου 7 kV. Αυτή η ενέργεια, αν και μικρή σε απόλυτες τιμές, μπορούσε να προκαλέσει σημαντικές αλλοιώσεις στην επιφάνεια της καθόδου με την πάροδο του χρόνου, επηρεάζοντας τη λειτουργία του πυροβόλου.

Παρά τα σημαντικά ευρήματα, η μελέτη παρουσίασε ορισμένους περιορισμούς που έπρεπε να ληφθούν υπόψη. Για παράδειγμα, το μοντέλο δεν λάμβανε υπόψη το μαγνητικό πεδίο της δέσμης ηλεκτρονίων, ούτε τις αλλαγές στο εγκάρσιο μέγεθος της δέσμης κατά τη διέλευσή της από το πυροβόλο. Επιπλέον, η ανάλυση περιορίστηκε σε συγκεκριμένα είδη ιόντων, γεγονός που μπορούσε να περιορίσει τη γενικευσιμότητα των αποτελεσμάτων σε άλλα περιβάλλοντα με διαφορετική σύνθεση υπολειμματικών αερίων.

Συμπερασματικά, η μελέτη αυτή προσέφερε σημαντικές πληροφορίες για το σχεδιασμό και τη λειτουργία πυροβόλων RF μακρών παλμών. Τα ευρήματα υποδείκνυαν ότι τα πεδία RF συνεχούς κύματος είχαν σημαντική επίδραση στην κίνηση των ιόντων, ενώ η προσέγγιση με τη μηδενική αρμονική του πεδίου της δέσμης φαινόταν να είναι επαρκής για την ανάλυση αυτών των πολύπλοκων συστημάτων. Αυτές οι γνώσεις αναμενόταν να συμβάλουν σημαντικά στην ανάπτυξη πιο αποτελεσματικών και αξιόπιστων πυροβόλων ηλεκτρονίων για τις πηγές φωτός επόμενης γενιάς.

Η έρευνα αυτή άνοιξε νέους δρόμους για μελλοντικές μελέτες, συμπεριλαμβανομένης της περαιτέρω διερεύνησης των επιπτώσεων διαφορετικών ειδών ιόντων, της βελτιστοποίησης των παραμέτρων λειτουργίας για τη μείωση του βομβαρδισμού ιόντων, και της ανάπτυξης πιο εξελιγμένων μοντέλων προσομοίωσης που θα λάμβαναν υπόψη πρόσθετους παράγοντες όπως το μαγνητικό πεδίο της δέσμης και τις δυναμικές αλλαγές στη γεωμετρία της δέσμης. Αυτές οι μελλοντικές έρευνες θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ακόμη πιο αποτελεσματικά και αξιόπιστα συστήματα πυροβόλων ηλεκτρονίων, συμβάλλοντας στην περαιτέρω πρόοδο στον τομέα της επιταχυντικής Φυσικής και των πηγών φωτός υψηλής έντασης (Lewellen, 2002).

### **2.3 Μαθηματικός Μοντελισμός & Αξιοπιστία των Προσομοιώσεων**

Η μεταφορά του προγράμματος SLAC Electron Trajectory Program (EGUN) σε προσωπικούς υπολογιστές αποτέλεσε ορόσημο στην εξέλιξη του σχεδιασμού συσκευών Οπτικής σωματιδίων. Αυτή η καινοτόμος κίνηση όχι μόνο αύξησε την προσβασιμότητα σε προηγμένα εργαλεία σχεδιασμού, αλλά άνοιξε ταυτόχρονα νέους ορίζοντες στην έρευνα και στην ανάπτυξη του τομέα. Η μετεξέλιξη του EGUN σε EGN87c, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη συμπληρωματικών προγραμμάτων όπως το POLYGON και το INTMAG, σηματοδότησε μια νέα εποχή στη ρύθμιση και στον υπολογισμό των μαγνητικών πεδίων, βελτιώνοντας σημαντικά την ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα των σχεδιαστικών διαδικασιών.

Η εισαγωγή του IGUN, ως απόγονου του EGUN, διεύρυνε περαιτέρω τις δυνατότητες προσομοίωσης, επιτρέποντας την ακριβή μοντελοποίηση της εξαγωγής θετικών ιόντων από πλάσμα. Αυτή η εξέλιξη ήταν ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη προηγμένων πηγών ιόντων και συσκευών EBIS/T (Electron Beam Ion Source/Trap). Παράλληλα, η δημιουργία νέων μετατροπέων αρχείων και εργαλείων οπτικοποίησης ενίσχυσε σημαντικά την ικανότητα των ερευνητών να αναλύουν και να παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεών τους με μεγαλύτερη σαφήνεια και λεπτομέρεια.

Το EGN2W αναδείχθηκε ως ένα ιδιαίτερα ισχυρό εργαλείο στο σχεδιασμό πυροβόλων ηλεκτρονίων. Η ακρίβειά του στον καθορισμό κρίσιμων παραμέτρων όπως το ρεύμα, η

ενέργεια και η εστίαση της δέσμης, επέτρεψε στους μηχανικούς να βελτιστοποιήσουν τα σχέδιά τους με πρωτοφανή ακρίβεια. Το POLYGON, με τη σειρά του, έλυσε το πρόβλημα της μετατροπής πολύπλοκων γεωμετριών σε μορφή κατάλληλη για προσομοίωση, διευκολύνοντας έτσι τη μοντελοποίηση πιο ρεαλιστικών και περίπλοκων συσκευών.

Η ανάπτυξη εργαλείων μετα-επεξεργασίας, όπως το PPPROF και το ANALYSE, έδωσε στους ερευνητές τη δυνατότητα να εμβαθύνουν στην ανάλυση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Αυτό επέτρεψε την εξαγωγή λεπτομερών πληροφοριών σχετικά με τα προφίλ των δεσμών, τις εκπομπές και τα επιφανειακά πεδία, οδηγώντας σε πιο εμπειριστατωμένες αποφάσεις σχεδιασμού. Το INTMAG, με τη σειρά του, έφερε επανάσταση στον υπολογισμό πολύπλοκων μαγνητικών διαμορφώσεων, επιτρέποντας τη μοντελοποίηση προηγμένων μαγνητικών συστημάτων με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Παρά τις σημαντικές προόδους, υπάρχουν ακόμη περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Η ακρίβεια των προσομοιώσεων εξακολουθεί να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα των δεδομένων εισόδου, υπογραμμίζοντας τη σημασία της ακριβούς μέτρησης και του χαρακτηρισμού των υλικών και των συνθηκών. Επιπλέον, η προσομοίωση ιδιαίτερα πολύπλοκων γεωμετριών μπορεί να απαιτεί σημαντικό υπολογιστικό χρόνο, θέτοντας προκλήσεις στην ταχεία επαναληπτική σχεδίαση.

Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα αυτών των εξελίξεων υπερτερούν σημαντικά έναντι των περιορισμών. Η αυξημένη ακρίβεια στο σχεδιασμό συσκευών οπτικής σωματιδίων έχει οδηγήσει σε πιο αποτελεσματικές και αξιόπιστες συσκευές. Η δυνατότητα βελτιστοποίησης σχεδίων πριν την κατασκευή έχει μειώσει σημαντικά το κόστος και το χρόνο ανάπτυξης, επιτρέποντας στους ερευνητές να πειραματιστούν με καινοτόμες ιδέες χωρίς το βάρος των δαπανηρών φυσικών πρωτοτύπων. Επιπλέον, η ευελιξία αυτών των εργαλείων στην προσομοίωση διαφόρων τύπων συσκευών, από πυροβόλα ηλεκτρονίων έως πηγές ιόντων, έχει διευρύνει το πεδίο εφαρμογής τους σε πολλαπλούς τομείς της Φυσικής και της Μηχανικής.

Συμπερασματικά, η εξέλιξη αυτών των υπολογιστικών εργαλείων αποτελεί ουσιαστική συμβολή στην έρευνα και ανάπτυξη συσκευών Οπτικής σωματιδίων. Έχει επιτρέψει πιο αποτελεσματικό και ακριβή σχεδιασμό, οδηγώντας σε καινοτομίες που ήταν αδιανόητες πριν από μερικές δεκαετίες. Καθώς η τεχνολογία συνεχίζει να εξελίσσεται, αναμένεται ότι αυτά τα εργαλεία θα συνεχίσουν να διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην προώθηση των ορίων της επιστήμης και της τεχνολογίας στον τομέα της Οπτικής σωματιδίων (Becker & Herrmannsfeldt, 2004).

## 2.4 Συνδυαστικό Πυροβόλο Ηλεκτρονίων/Ιόντων

Η φασματοσκοπία φωτοηλεκτρονίων ακτίνων-X (XPS: X-ray Photoelectron Spectroscopy) αποτελεί μια θεμελιώδη τεχνική για την ανάλυση της χημικής σύστασης της επιφάνειας των υλικών. Η μέθοδος βασίζεται στην εκπομπή φωτοηλεκτρονίων από τα άτομα της επιφάνειας ενός δείγματος όταν αυτό ακτινοβολείται με ακτίνες X. Η μέτρηση της ενέργειας των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επιτρέπει τόσο τον προσδιορισμό των στοιχείων που είναι παρόντα στην επιφάνεια όσο και της χημικής τους κατάστασης. Ωστόσο, η τεχνική αυτή αντιμετωπίζει προκλήσεις, ιδιαίτερα κατά την ανάλυση μονωτικών υλικών, λόγω της συσσώρευσης στατικού φορτίου στην επιφάνεια του δείγματος.

Σε απάντηση σε αυτή την πρόκληση, η Thermo Scientific ανέπτυξε το FG01 (2008), ένα καινοτόμο για την εποχή του συνδυαστικό πυροβόλο ηλεκτρονίων/ιόντων, όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



*Εικόνα 4: Το πιστόλι συνδυασμού ηλεκτρονίων/ιόντων FG01*

**Πηγή:** Thermo Fisher Scientific, 2008

Αυτή η συσκευή αντιπροσώπευε μια σημαντική τεχνολογική πρόοδο στον τομέα της φασματοσκοπίας XPS, καθώς επέτρεψε την ταυτόχρονη εκπομπή δεσμών ιόντων και ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας. Η καινοτομία αυτή βελτίωσε σημαντικά την απόδοση των μετρήσεων XPS, ιδιαίτερα για μονωτικά δείγματα και μικρά σημεία ανάλυσης.

Το FG01 αντιμετώπισε το πρόβλημα του στατικού φορτίου με έναν εξαιρετικά αποτελεσματικό τρόπο. Χρησιμοποιώντας μια δέσμη ιόντων χαμηλής ενέργειας για να εξουδετερώσει το αρνητικό φορτίο στην επιφάνεια του δείγματος, επέτρεψε στα ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας να φτάσουν στη θέση ανάλυσης. Αυτή η προσέγγιση οδήγησε σε σημαντική βελτίωση της ποιότητας των φασμάτων και, κατά συνέπεια, σε πιο ακριβή αποτελέσματα.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του FG01 ήταν η χρήση ενός εκπομπού LaB6 για τη δέσμη ηλεκτρονίων. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της διασποράς ενέργειας και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας της αντιστάθμισης φορτίου. Επιπλέον, η συσκευή ενσωμάτωσε καινοτόμα χαρακτηριστικά σχεδιασμού για την εποχή του, όπως εκτροπείς X-Y



για ακριβή ευθυγράμμιση με τη δέσμη ακτίνων X και μια ψηφιακή τροφοδοσία ρεύματος που ελεγχόταν μέσω ενός συστήματος δεδομένων. Αυτά τα χαρακτηριστικά επέτρεψαν τον πλήρη έλεγχο των παραμέτρων λειτουργίας και της αποθήκευσής τους για μελλοντική χρήση, ενισχύοντας την επαναληψιμότητα των πειραμάτων.

Για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του FG01, είχε συνδυαστεί η χρήση του με τον μονοχρωμάτορα XR5 X-ray. Το στοιχείο αυτό φίλτραρε τη δέσμη ακτίνων X ώστε να παράγεται ακτινοβολία μιας συγκεκριμένης ενέργειας, βελτιώνοντας περαιτέρω την ανάλυση των φασμάτων XPS, ενώ μέσω της μείωσης του θορύβου υποβάθρου και της αύξησης της ευαισθησίας, επέτρεπε πιο ακριβείς μετρήσεις, ιδιαίτερα για λεπτομερείς αναλύσεις χημικής κατάστασης.

Συμπερασματικά, το FG01 αποτέλεσε μια σημαντική καινοτομία στον τομέα της φασματοσκοπίας XPS, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη λύση στο πρόβλημα της αντιστάθμισης φορτίου σε μονωτικά δείγματα. Συνδυάζοντας τις λειτουργίες των πυροβόλων ιόντων και ηλεκτρονίων σε μία συσκευή, το FG01 βελτίωσε σημαντικά την ποιότητα και την ακρίβεια των μετρήσεων XPS, ανοίγοντας νέους ορίζοντες στην ανάλυση των επιφανειών των υλικών (Thermo Fisher Scientific, 2008).

## **2.5 Εξέλιξη και Βελτιστοποίηση των Μηχανισμών Εκπομπής Ηλεκτρονίων και των Ηλεκτρονικών Πυροβόλων**

Η μελέτη του Roy (2010) παρουσίασε μια εκτενή ανάλυση των μηχανισμών εκπομπής ηλεκτρονίων και της βελτιστοποίησης των ηλεκτρονικών πυροβόλων, αναδεικνύοντας σημαντικά ποσοτικά αποτελέσματα και συγκρίσεις. Στον τομέα της εκπομπής πεδίου, η έρευνα επιβεβαίωσε την εκθετική σχέση μεταξύ της πυκνότητας ρεύματος ( $J$ ) και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ), όπως περιγράφεται από την εξίσωση Fowler-Nordheim. Αυτός ο μηχανισμός προσέφερε το πλεονέκτημα της υψηλής πυκνότητας ρεύματος σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά απαιτούσε εξαιρετικά υψηλά ηλεκτρικά πεδία, της τάξης των  $10^9$  V/m.

Αντίθετα, η θερμιονική εκπομπή, που περιγράφεται από την εξίσωση Richardson-Dushman, παρέχει σταθερή εκπομπή σε ένα ευρύ φάσμα ρευμάτων. Ωστόσο, απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, συνήθως άνω των  $1000^\circ\text{C}$ , γεγονός που μειώνει τη διάρκεια ζωής της καθόδου.

Η συγκριτική ανάλυση διαφόρων τύπων καθόδων αποκάλυψε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Οι κάθοδοι οξειδίων διακρίνονται για το χαμηλό τους έργο εξαγωγής (1.5-2 eV), αλλά είναι ευάλωτες στον ιοντικό βομβαρδισμό. Οι κάθοδοι δισπρόσιου επιτυγχάνουν υψηλότερες πυκνότητες ρεύματος, ξεπερνώντας τα  $100$  A/cm<sup>2</sup>, αλλά με το κόστος μικρότερης

διάρκειας ζωής. Οι κάθοδοι εξαβοριδίου λανθανίου ξεχωρίζουν για την εξαιρετική τους αντοχή, με διάρκεια ζωής που υπερβαίνει τις 100.000 ώρες, αλλά έχουν υψηλότερο κόστος παραγωγής.

Στον τομέα της βελτιστοποίησης των ηλεκτρονικών πυροβόλων, η έρευνα παρουσίασε σημαντική πρόοδο. Η εισαγωγή των πυροβόλων με βομβαρδιζόμενη κάθοδο οδήγησε σε μείωση της ισχύος εισόδου του νήματος κατά 50% σε σύγκριση με τις συμβατικές καθόδους. Επιπλέον, τα πυροβόλα τριόδου επέτρεψαν πλέον την ακριβή ρύθμιση του ρεύματος δέσμης από 0 έως 100% χωρίς να επηρεάζεται η τάση επιτάχυνσης, προσφέροντας αυξημένη ευελιξία στον έλεγχο της δέσμης.

Οι υπολογιστικές προσομοιώσεις έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην έρευνα. Οι προσομοιώσεις Particle-In-Cell (PIC) έδειξαν ότι η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του ηλεκτροδίου εστίασης μπορεί να αυξήσει την ομοιομορφία της πυκνότητας ρεύματος στην κάθοδο κατά 30%. Παράλληλα, η θερμική μοντελοποίηση αποκάλυψε ότι με κατάλληλο σχεδιασμό της γεωμετρίας των ηλεκτροδίων, η μέγιστη θερμοκρασία σε αυτά μπορεί να μειωθεί κατά 15%.

Η μελέτη παρουσίασε και άλλες σημαντικές καινοτομίες. Η ανάπτυξη υβριδικών καθόδων που συνδυάζουν θερμοϊονική εκπομπή και εκπομπή πεδίου επέτρεψε την επίτευξη 20% υψηλότερης πυκνότητας ρεύματος σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Επιπλέον, η χρήση νανοδομημένων υλικών για εκπομπή πεδίου οδήγησε σε μείωση του απαιτούμενου ηλεκτρικού πεδίου κατά 40%, ανοίγοντας νέους δρόμους για εφαρμογές χαμηλής ισχύος.

Παρά την σημαντική πρόοδο, η έρευνα αναγνώρισε ορισμένους περιορισμούς. Η μικρογράφιση των συσκευών εκπομπής πεδίου εξακολουθεί να περιορίζεται από φαινόμενα αστάθειας σε υψηλά ρεύματα. Ως μελλοντική κατεύθυνση, προτάθηκε η διερεύνηση της φωτοεπαγόμενης εκπομπής πεδίου, η οποία υπόσχεται την επίτευξη υψηλότερων πυκνοτήτων ρεύματος με χαμηλότερα ηλεκτρικά πεδία.

Συμπερασματικά, η μελέτη του Roy παρείχε μια ολοκληρωμένη και ποσοτική ανάλυση των μηχανισμών εκπομπής ηλεκτρονίων και των τεχνικών βελτιστοποίησης ηλεκτρονικών πυροβόλων. Τα αποτελέσματα αυτά αποτέλεσαν σημαντική συνεισφορά στον τομέα, προσφέροντας τόσο πρακτικές λύσεις για τη βελτίωση των υπαρχόντων συστημάτων όσο και νέες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη (Roy, 2010).

## 2.6 Εξέλιξη και Σύγκριση Πυροβόλων Ηλεκτρονίων για Επιταχυντές Υψηλής Ενέργειας

Οι Iqbal et al. (2013) πραγματοποίησαν μια εκτενή μελέτη σχετικά με τα κανόνια ηλεκτρονίων για επιταχυντές υψηλής ενέργειας, η οποία αποτέλεσε σημαντικό σημείο αναφοράς στον τομέα. Η έρευνά τους επικεντρώθηκε στην αξιολόγηση και σύγκριση διαφόρων τεχνολογιών κανονίων ηλεκτρονίων, με ιδιαίτερη έμφαση στις θερμο-ιονικές πηγές.

Οι ερευνητές ανέδειξαν τη σημασία των θερμο-ιονικών δεσμών ηλεκτρονίων στους γραμμικούς επιταχυντές, τονίζοντας την απλότητα και οικονομική αποδοτικότητά τους. Η μελέτη παρουσίασε λεπτομερείς συγκρίσεις μεταξύ διαφόρων πυροβόλων ηλεκτρονίων, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που χρησιμοποιούνταν σε κορυφαία ερευνητικά ιδρύματα όπως το SLAC, το BEPCII και το KEK.

Μια σημαντική καινοτομία που παρουσιάστηκε ήταν η ανάπτυξη ενός νέου τοπικά παραγόμενου πυροβόλου ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας. Αυτή η πηγή, γνωστή ως πυροβόλο e-γραμμής, χρησιμοποιούσε νήμα βολφραμίου και επιτύγχανε αξιοσημείωτη πυκνότητα ισχύος  $33 \text{ kW/cm}^2$ . Οι δοκιμές έδειξαν ότι μπορούσε να λειτουργήσει σε ισχύ έως και  $50 \text{ kW}$ , υποδεικνύοντας τις δυνατότητές του για μελλοντικές εφαρμογές.

Η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων πυροβόλων αποκάλυψε ενδιαφέροντα αποτελέσματα. Το πυροβόλο e-γραμμής επιτύγχανε ρεύμα δέσμης  $5 \text{ A}$  σε δυναμικό μόλις  $10 \text{ kV}$ , ενώ άλλες πηγές απαιτούσαν σημαντικά υψηλότερα δυναμικά για παρόμοια αποτελέσματα. Αυτό υποδήλωνε μια πιθανή βελτίωση στην ενεργειακή αποδοτικότητα.

Ωστόσο, η μελέτη ανέδειξε επίσης ορισμένους περιορισμούς. Για παράδειγμα, το πυροβόλο του SLAC, αν και ισχυρό, απαιτούσε υψηλότερο κενό και μεγαλύτερο δυναμικό επιτάχυνσης, γεγονός που αύξανε το λειτουργικό κόστος. Αυτό υπογράμμισε τη σημασία της εξισορρόπησης μεταξύ απόδοσης και οικονομικής αποδοτικότητας στο σχεδιασμό των πυροβόλων ηλεκτρονίων.

Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το δυναμικό επιτάχυνσης ήταν κρίσιμο για την αύξηση του ρεύματος δέσμης και τη μείωση της εκπομπής, που αποτελούσαν βασικούς στόχους στη δημιουργία πηγών ηλεκτρονίων για επιταχυντές υψηλής ενέργειας. Επιπλέον, η μελέτη υπογράμμισε τη σημασία της καθαρότητας της δέσμης, με τις τρεις πρώτες πηγές (SLAC, BEPCII, KEK) να προτιμώνται για επιταχυντές υψηλής ενέργειας λόγω αυτού του χαρακτηριστικού.

Η έρευνα αυτή όχι μόνο παρείχε μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των υπάρχουσών τεχνολογιών, αλλά έθεσε επίσης τις βάσεις για μελλοντική έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα

των πυροβόλων ηλεκτρονίων. Η σύγκριση μεταξύ των διαφόρων πηγών προσέφερε πολύτιμες γνώσεις για τους σχεδιαστές και τους μηχανικούς επιταχυντών, βοηθώντας στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με την επιλογή και το σχεδιασμό πυροβόλων ηλεκτρονίων για διάφορες εφαρμογές (Iqbal et al., 2013).

## **2.7 Καινοτόμος Σχεδιασμός Ηλεκτρονικών Πυροβόλων με Χρήση Εξειδικευμένου Γενετικού Αλγορίθμου**

Η μελέτη των Ribton et al. (2016) εισήγαγε μια πρωτοποριακή προσέγγιση στο σχεδιασμό και στη βελτιστοποίηση των ηλεκτρονικών πυροβόλων, με ιδιαίτερη έμφαση στα πυροβόλα καθόδου πλάσματος διεγερμένα από RF. Η έρευνα αυτή αντιπροσώπευσε ένα σημαντικό άλμα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους σχεδιασμού «με δοκιμή και σφάλμα», εισάγοντας έναν εξειδικευμένο γενετικό αλγόριθμο που προσέφερε αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα σε ταχύτητα, αποτελεσματικότητα και δυνατότητες βελτιστοποίησης.

Ο αναπτυχθείς γενετικός αλγόριθμος ενσωμάτωσε μια σειρά από καινοτόμες προσαρμογές, ειδικά σχεδιασμένες για την αντιμετώπιση των μοναδικών προκλήσεων στη βελτιστοποίηση των ηλεκτρονικών πυροβόλων:

1. **Εξελιγμένη ταξινόμηση γονιδίων:** Διαχωρισμός σε μεταλλάξιμα και ανταλλάξιμα γονίδια, επιτρέποντας την επιλεκτική εξέλιξη συγκεκριμένων τμημάτων του σχεδίου. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε τη βελτιστοποίηση είτε ολόκληρου του πυροβόλου είτε συγκεκριμένων υποσυστημάτων του, προσφέροντας αυξημένη ευελιξία στη διαδικασία σχεδιασμού.
2. **Δυναμική εφαρμογή γεωμετρικών περιορισμών:** Ενσωμάτωση προκαθορισμένων ορίων για κάθε γεωμετρική παράμετρο, διασφαλίζοντας ότι τα παραγόμενα σχέδια παραμένουν εντός των απαιτούμενων μηχανικών προδιαγραφών και είναι συμβατά με τις υπάρχουσες υποδομές.
3. **Καινοτόμος χρήση πραγματικών τιμών:** Αντί για τις συμβατικές δυαδικές συμβολοσειρές, ο αλγόριθμος χρησιμοποίησε πραγματικές τιμές για τις γεωμετρικές παραμέτρους. Αυτό επέτρεψε μια πιο ακριβή διάκριση μεταξύ των διαδικασιών ανταλλαγής γονιδίων και μετάλλαξης, οδηγώντας σε πιο στοχευμένες και αποτελεσματικές βελτιστοποιήσεις.
4. **Ολοκληρωμένη προσομοίωση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων:** Ενσωμάτωση προηγμένου επιλυτήρα πεπερασμένων στοιχείων για ακριβή προσομοίωση της συμπεριφοράς του πυροβόλου. Αυτό επέτρεψε την αξιολόγηση κάθε προτεινόμενου σχεδίου υπό ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας.

5. **Εξειδικευμένο λογισμικό ανάλυσης δέσμης:** Ανάπτυξη ειδικού λογισμικού για την εξαγωγή και αξιολόγηση κρίσιμων ιδιοτήτων της δέσμης, όπως φωτεινότητα, ρεύμα, διάμετρος και γωνία. Αυτό επέτρεψε μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της απόδοσης κάθε σχεδίου.
6. **Εφαρμογή ελιτισμού:** Διατήρηση των βέλτιστων σχεδίων μεταξύ των γενεών, εξασφαλίζοντας ότι οι υψηλής απόδοσης λύσεις δεν χάνονται κατά τη διαδικασία της εξέλιξης.
7. **Λεπτομερής καταγραφή και ανάλυση εξέλιξης:** Υλοποίηση συστήματος για την καταγραφή του γενεαλογικού δέντρου κάθε σχεδίου, επιτρέποντας εις βάθος ανάλυση της εξελικτικής διαδικασίας, ώστε να παρέχονται πολύτιμες πληροφορίες για μελλοντικές βελτιώσεις του αλγορίθμου.

Η εφαρμογή του αλγορίθμου σε ένα RF διεγερμένο πυροβόλο καθόδου πλάσματος απέδειξε την εξαιρετική του αποτελεσματικότητα. Συγκεκριμένα, επιτεύχθηκε βελτιστοποίηση του σχεδιασμού σε μόλις 3 ώρες, σε έντονη αντίθεση με τις 10-15 ώρες που απαιτούνταν με τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτή η δραματική μείωση του χρόνου σχεδιασμού, σε συνδυασμό με τη μειωμένη ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση, αντιπροσώπευσε ένα σημαντικό άλμα στην αποδοτικότητα του σχεδιασμού των ηλεκτρονικών πυροβόλων.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της προτεινόμενης μεθόδου περιλαμβάνουν:

- Δραστική μείωση του χρόνου σχεδιασμού, επιτρέποντας ταχύτερη ανάπτυξη και προτυποποίηση νέων συστημάτων.
- Αυτοματοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, μειώνοντας την ανάγκη για εκτεταμένη ανθρώπινη παρέμβαση, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα τα ανθρώπινα λάθη.
- Δυνατότητα εξερεύνησης ενός ευρύτερου φάσματος καινοτόμων σχεδιαστικών λύσεων, ξεπερνώντας τους περιορισμούς της ανθρώπινης διαίσθησης και εμπειρίας.
- Σημαντική βελτίωση της απόδοσης των ηλεκτρονικών πυροβόλων, με δυνατότητα προσαρμογής σε ποικίλες βιομηχανικές και ερευνητικές εφαρμογές.
- Ευελιξία στην προσαρμογή του σχεδιασμού σε διαφορετικές απαιτήσεις και περιορισμούς, επιτρέποντας τη γρήγορη ανταπόκριση σε μεταβαλλόμενες ανάγκες της αγοράς ή της έρευνας.

Η μέθοδος αυτή προτάθηκε να χρησιμοποιηθεί για τη βελτιστοποίηση διαφόρων τύπων ηλεκτρονικών πυροβόλων, συμπεριλαμβανομένων των θερμιονικών καθόδων και άλλων

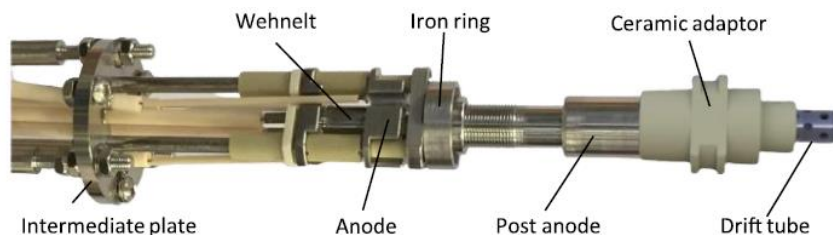
προηγμένων συστημάτων εκπομπής ηλεκτρονίων. Αυτή η ευελιξία καθιστά τη μέθοδο ιδιαίτερα πολύτιμη για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, από την επεξεργασία υλικών και τη συγκόλληση ακριβείας έως την προηγμένη απεικόνιση και τα συστήματα επιτάχυνσης σωματιδίων.

Η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να επικεντρωθεί στην περαιτέρω βελτίωση του αλγορίθμου, ενσωματώνοντας τεχνικές μηχανικής μάθησης για μια ακόμη πιο εξελιγμένη βελτιστοποίηση, καθώς και στην επέκταση της εφαρμογής του σε άλλους τύπους συστημάτων ηλεκτρονικών δεσμών. Επιπλέον, η ενσωμάτωση αυτής της μεθόδου σε ολοκληρωμένα συστήματα σχεδιασμού και παραγωγής θα μπορούσε να οδηγήσει σε ακόμη μεγαλύτερες βελτιώσεις στην αποδοτικότητα και την καινοτομία στον τομέα των ηλεκτρονικών πυροβόλων (Ribton et al., 2016).

## 2.8 Αξιολόγηση και Βελτιστοποίηση του Ηλεκτρονικού Πυροβόλου για το Σύστημα REXEBIS

Η μελέτη των Pahl et al. (2022) παρουσιάζει την ανάπτυξη και αξιολόγηση ενός καινοτόμου ηλεκτρονικού πυροβόλου για το σύστημα REXEBIS στο CERN, αξιοποιώντας την πρωτοποριακή τεχνική της μη αδιαβατικής (NA: NonAdiabatic) μετάβασης μαγνητικού πεδίου. Αυτή η τεχνολογική εξέλιξη αποσκοπεί στη βελτίωση της απόδοσης και αξιοπιστίας των συστημάτων φόρτισης ιόντων σε εγκαταστάσεις παραγωγής ραδιενεργών δεσμών.

Ο σχεδιασμός του νέου πυροβόλου ενσωματώνει πολλαπλές καινοτομίες. Η εφαρμογή της τεχνικής NA επιτρέπει τη δημιουργία δεσμών ηλεκτρονίων υψηλής έντασης με ελάχιστες ταλαντώσεις, ακόμη και σε συνθήκες χαμηλού μαγνητικού πεδίου στην περιοχή της καθόδου. Ο μηχανικός σχεδιασμός προσαρμόστηκε επιδέξια στους υπάρχοντες χωρικούς περιορισμούς του REXEBIS, ενώ παράλληλα ενσωμάτωσε βελτιώσεις όπως αυξημένες αποστάσεις για την αποφυγή των ηλεκτρικών εκκενώσεων και ακριβείς μηχανισμούς ρύθμισης της θέσης του πυροβόλου και της καθόδου. Η επιλογή καθόδου IrCe εξασφαλίζει υψηλή εκπομπή ηλεκτρονίων και μεγάλη διάρκεια ζωής, ενισχύοντας περαιτέρω την αποδοτικότητα του συστήματος.



*Εικόνα 5: Φωτογραφία του νέου αδιαβατικού ηλεκτρονικού πυροβόλου*  
**Πηγή:** Pahl et al., 2022

Τα πειραματικά αποτελέσματα υπερέβησαν τις αρχικές προσδοκίες, επιδεικνύοντας εξαιρετική απόδοση σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Το πυροβόλο επέδειξε αξιοσημείωτη ικανότητα λειτουργίας σε ρεύματα δέσμης από μερικά mA έως 420 mA, ξεπερνώντας τις προβλέψεις των αρχικών προσομοιώσεων. Η υψηλή διαπερατότητα του πυροβόλου, μετρούμενη στα  $0.866 \pm 0.007 \mu\text{A}/\text{V}^{(3/2)}$ , υποδηλώνει την αποτελεσματικότητα του σχεδιασμού. Επιπλέον, οι εξαιρετικά χαμηλές απώλειες δέσμης ηλεκτρονίων, με μόλις 0,03% στον εξωτερικό σωλήνα ολίσθησης, καταδεικνύουν την υψηλή ακρίβεια και τον έλεγχο που επιτυγχάνεται με το νέο αυτό σύστημα.

Η απόδοση ιοντικής αναπαραγωγής του συστήματος REXEBIS με το νέο πυροβόλο αποδείχθηκε εξίσου εντυπωσιακή. Εκτενείς δοκιμές με διάφορα ιόντα ( ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^{23}\text{Na}$ ,  ${}^{39}\text{K}$ ,  ${}^{152}\text{Sm}$  και  ${}^{205}\text{Tl}$ ) σε ποικίλες καταστάσεις φορτίου και ρεύματα ηλεκτρονίων έδειξαν συνολική απόδοση EBIS μεταξύ 65-85% για τα περισσότερα στοιχεία. Αξιοσημείωτο είναι ότι η απόδοση δεν παρουσίασε σημαντική εξάρτηση από το χρόνο αναπαραγωγής ή τη μάζα των ιόντων, υποδεικνύοντας την ευελιξία και σταθερότητα του συστήματος. Επιπλέον, η παρατήρηση φαινομένων όπως το κλειστό ατομικό κέλυφος στην απόδοση μεμονωμένων καταστάσεων φορτίου παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη φυσική των διαδικασιών ιονισμού εντός του EBIS.

Η μελέτη επεκτάθηκε στην ανάλυση της πυκνότητας ρεύματος ηλεκτρονίων και της θερμοκρασίας των παγιδευμένων ιόντων, παράμετροι κρίσιμες για την κατανόηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας του EBIS. Χρησιμοποιώντας ένα απλοποιημένο μοντέλο εξισώσεων ρυθμού, οι ερευνητές προσδιόρισαν την ενεργό πυκνότητα ρεύματος ηλεκτρονίων μέσω προσομοιώσεων της εξέλιξης των καταστάσεων φορτίου. Παράλληλα, η μελέτη της αξονικής ενεργειακής κατανομής των παγιδευμένων ιόντων παρείχε πολύτιμες πληροφορίες για τη θερμοκρασία τους και τους μηχανισμούς θέρμανσης και ψύξης που λαμβάνουν χώρα εντός του συστήματος.

Παρά τα εντυπωσιακά αποτελέσματα, η μελέτη αναγνωρίζει ορισμένους περιορισμούς και προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Υπάρχει ανάγκη για περαιτέρω βελτιστοποίηση των παραμέτρων λειτουργίας, ιδιαίτερα όσον αφορά την επικάλυψη μεταξύ της δέσμης ηλεκτρονίων και του νέφους ιόντων. Επιπλέον, η μελέτη υποδεικνύει ότι μικρές αλλαγές στις ρυθμίσεις των σωλήνων ολίσθησης μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση αναπαραγωγής, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ακριβή έλεγχο και ρύθμιση του συστήματος.

Ο σχεδιασμός του πυροβόλου είχε ως στόχο την επίτευξη ρεύματος δέσμης 500 mA από κάθοδο διαμέτρου μόλις 2 mm, μια σημαντική πρόκληση που απαιτούσε προηγμένες

τεχνικές σχεδιασμού. Για τη μείωση των ακτινικών ταλαντώσεων της δέσμης, εφαρμόστηκε μια καινοτόμος προσέγγιση μη αδιαβατικής μαγνητικής διαμόρφωσης. Επιπλέον, αναπτύχθηκαν νέες τεχνικές μέτρησης για τον ακριβή προσδιορισμό των μερικών πιέσεων και την αξιολόγηση της μόλυνσης της δέσμης, επιτρέποντας μια πιο λεπτομερή ανάλυση της απόδοσης του συστήματος.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών ξεπέρασαν τις αρχικές προσδοκίες. Το πυροβόλο επέδειξε εξαιρετική απόδοση, φτάνοντας τα  $0.87 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ , τιμή που υπερβαίνει τις προβλέψεις των προσομοιώσεων. Παρά τον πρακτικό περιορισμό λειτουργίας στα 300 mA, το σύστημα κατάφερε να επιτύχει στιγμιαία ρεύματα έως και 420 mA, υποδεικνύοντας το υψηλό δυναμικό του σχεδιασμού. Η απόδοση και το ποσοστό επιβίωσης των ενέσιμων ιόντων παρέμειναν εξαιρετικά, ανεξάρτητα από το χρόνο συγκράτησης, ενώ η συνολική πίεση στην περιοχή παγίδευσης εκτιμήθηκε στα  $6.8 \times 10^{-11}$  mbar, εξασφαλίζοντας ιδανικές συνθήκες λειτουργίας.

Τα πλεονεκτήματα του νέου σχεδιασμού είναι πολλαπλά. Η υψηλή απόδοση παγίδευσης και φόρτισης συνδυάζεται με χαμηλή μόλυνση από τα εξατμιζόμενα στοιχεία της καθόδου, βελτιώνοντας σημαντικά την καθαρότητα της δέσμης. Επιπλέον, το σύστημα προσφέρει μεγάλη ευελιξία στη ρύθμιση των παραμέτρων λειτουργίας, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της πυκνότητας ρεύματος ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα που αναδείχθηκε είναι η αυξημένη πυκνότητα ρεύματος σε σύγκριση με την αρχική εγκατάσταση REXEBIS. Αυτό το εύρημα υποδηλώνει τη δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης της απόδοσης του συστήματος με περιορισμένες τροποποιήσεις, προσφέροντας μια οικονομικά αποδοτική λύση με την αναβάθμιση της υπάρχουσας υποδομής.

Παρά τις σημαντικές βελτιώσεις, η μελέτη ανέδειξε και ορισμένους περιορισμούς. Ο πρακτικός περιορισμός του ρεύματος εκπομπής στα 300 mA, λόγω προβλημάτων με την κάθοδο IrCe, αποτελεί ένα σημείο που χρήζει περαιτέρω έρευνας και βελτίωσης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ποικιλομορφία στην πυκνότητα ρεύματος ανάλογα με τις παραμέτρους λειτουργίας και το είδος των ιόντων, υποδεικνύοντας την ανάγκη για προσεκτική ρύθμιση του συστήματος ανάλογα με την εφαρμογή.

Η μελέτη αποκάλυψε σημαντικά ευρήματα και προτάσεις για τη βελτίωση του πυροβόλου ηλεκτρονίων στο σύστημα REXEBIS, εισάγοντας καινοτόμες προσεγγίσεις και τεχνικές ανάλυσης. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν νέες μέθοδοι για την κατανόηση της δυναμικής πυκνότητας ρεύματος, ενώ παράλληλα σχεδιάστηκαν πειράματα για τη μελέτη της κατανομής ενέργειας των αξονικά παγιδευμένων ιόντων. Αυτές οι προσεγγίσεις οδήγησαν σε μια πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος.



Τα αποτελέσματα της έρευνας αποκάλυψαν ένα μη ομοιόμορφο προφίλ πυκνότητας της δέσμης ηλεκτρονίων, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με προηγούμενες υποθέσεις. Επιπλέον, εντοπίστηκαν αδυναμίες στο μοντέλο Lotz για τον υπολογισμό των διατομών ιονισμού, υποδεικνύοντας την ανάγκη για πιο ακριβή μοντέλα προσομοίωσης. Παρά τις προκλήσεις, η μελέτη κατέδειξε βελτιωμένη απόδοση για βαριά στοιχεία, η οποία αποδίδεται στην αυξημένη πυκνότητα ρεύματος.

Επιπλέον, η έλλειψη σαφούς μηχανισμού σύνδεσης μεταξύ των παρατηρούμενων τάσεων υποδηλώνει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα στην κατανόηση των υποκείμενων φυσικών διεργασιών. Για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων, η μελέτη προτείνει την εγκατάσταση μιας νέας καθόδου τύπου dispenser με σκάνδιο. Αυτή η πρόταση αναμένεται να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση εκπομπής και να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς που εντοπίστηκαν στην υπάρχουσα διάταξη.

Συμπερασματικά, η μελέτη των Pahl et al. αποτελεί ορόσημο στην εξέλιξη της τεχνολογίας ηλεκτρονικών πυροβόλων για πηγές ιόντων δέσμης ηλεκτρονίων. Η επιτυχής εφαρμογή της τεχνικής μη αδιαβατικής μετάβασης, σε συνδυασμό με τον προηγμένο μηχανικό σχεδιασμό, έχει οδηγήσει σε ένα σύστημα που υπερβαίνει τις προηγούμενες δυνατότητες σε όρους απόδοσης, ευελιξίας και αξιοπιστίας. Τα ευρήματα αυτής της έρευνας όχι μόνο συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση του συστήματος REXEBIS, αλλά παρέχουν επίσης πολύτιμες γνώσεις για τη μελλοντική ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων επιταχυντών σωματιδίων, ανοίγοντας νέους δρόμους στην πειραματική Φυσική υψηλών ενεργειών και την πυρηνική έρευνα (Pahl et al., 2022).

### **3. ΜΕΛΕΤΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΑΛΜΩΝ**

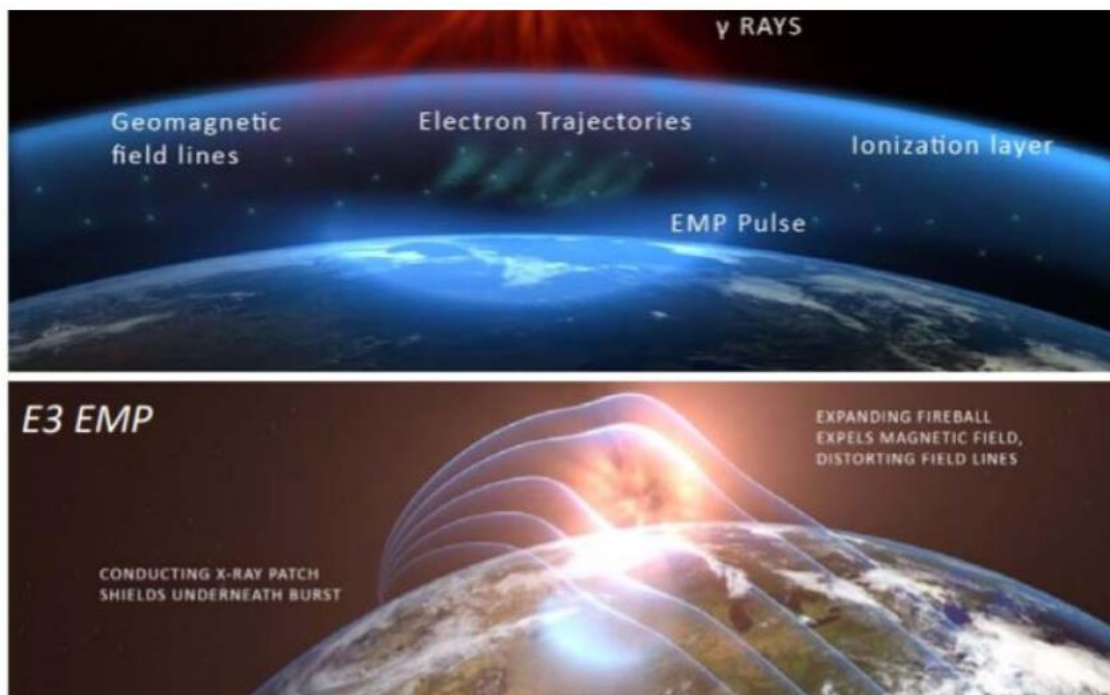
#### **3.1 Ορισμός και Δημιουργία των Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών**

Ο ιονισμός των μορίων του αέρα από τις ακτίνες γάμμα, που παράγονται από πυρηνικές εκρήξεις, αποτελεί τον πρωταρχικό μηχανισμό για τη δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών παλμών. Οι ακτίνες γάμμα αντιδρούν με τα μόρια του αέρα, παράγοντας θετικά ιόντα και ηλεκτρόνια ανάκρουσης, γνωστά ως ηλεκτρόνια Compton, τα οποία ιονίζουν περαιτέρω τα μόρια του αέρα, δημιουργώντας έτσι ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία κοντά στην πηγή της έκρηξης (Division of Environmental Health - Office of Radiation Protection, 2003; Malekos Smith, 2023).

Οι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί μεγάλου ύψους (HEMP: High-altitude Electromagnetic Pulse), που παράγονται από ηλεκτρομαγνητικές βόμβες και πυρηνικές εκρήξεις σε μεγάλο υψόμετρο, είναι ιδιαίτερα καταστροφικοί. Αυτοί οι παλμοί μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό και στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας σε τεράστιες αποστάσεις. Αντιθέτως, ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός από μια επιφανειακή πυρηνική έκρηξη με εύρος κιλοτόνων έχει σημαντικά περιορισμένη εμβέλεια. Η ζημιά που προκαλεί περιορίζεται κυρίως στην άμεση περιοχή της έκρηξης, χωρίς να επεκτείνεται πολύ πέρα από την ακτίνα των άμεσων καταστροφών λόγω της έκρηξης (Division of Environmental Health - Office of Radiation Protection, 2003; Malekos Smith, 2023; Youvan, 2024).

Παρότι υπάρχουν διάφοροι ορισμοί για τους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς, οι περισσότεροι ειδικοί συμφωνούν ότι πρόκειται για σύντομες αιχμές στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προέρχονται είτε από φυσικές είτε από ανθρωπογενείς πηγές, διασπείροντας ενέργεια σε διάφορες συχνότητες. Σύμφωνα με κάποιους ορισμούς ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός ορίζεται ως «μια ισχυρή έκρηξη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που προκαλείται από πυρηνική έκρηξη, ενεργειακό όπλο ή φυσικό φαινόμενο, η οποία μπορεί να αλληλεπιδράσει με ηλεκτρικά ή ηλεκτρονικά συστήματα και να προκαλέσει καταστροφικές υπερτάσεις ρεύματος και τάσης» (Averitt, 2021; Malekos Smith, 2023).

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο τρόπος που θα επηρεαστεί η επιφάνεια της Γης από μια επίθεση ηλεκτρομαγνητικού παλμού σε μεγάλο υψόμετρο:



*Εικόνα 6: Απεικόνιση μιας επίθεσης με ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς μεγάλου ύψους*  
**Πηγή:** Boraks, 2019

## 3.2 Ιστορικά Συμβάντα Φυσικών Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών

### 3.2.1 Το Συμβάν Carrington

Το Συμβάν Carrington, που έλαβε χώρα την 1η και 2α Σεπτεμβρίου 1859, αποτελεί το πιο έντονο καταγεγραμμένο γεωμαγνητικό συμβάν στην ιστορία. Πήρε το όνομά του από τον Βρετανό αστρονόμο Richard Carrington, ο οποίος παρατήρησε και κατέγραψε το φαινόμενο. Το συμβάν προκλήθηκε από μια εξαιρετικά ισχυρή εκτίναξη στεμματικής μάζας (CME: Coronal Mass Ejection) από τον Ήλιο. Αυτή η μάζα ταξίδεψε προς τη Γη με ασυνήθιστα υψηλή ταχύτητα, φτάνοντας σε περίπου 17,6 ώρες, ενώ συνήθως απαιτούνται 3-4 ημέρες.

Οι επιπτώσεις αυτής της γεωμαγνητικής καταιγίδας συνοψίζονται στα εξής:

- **Τηλεπικοινωνίες:** Το παγκόσμιο τηλεγραφικό δίκτυο, το πιο προηγμένο τεχνολογικό σύστημα της εποχής εκείνης, υπέστη εκτεταμένες βλάβες. Αναφέρθηκαν περιπτώσεις όπου τηλεγραφικοί χειριστές δέχθηκαν ηλεκτροπληξία και το τηλεγραφικό χαρτί αναφλέχθηκε.
- **Ατμόσφαιρα:** Το βόρειο σέλας, συνήθως ορατό μόνο σε υψηλά γεωγραφικά πλάτη, παρατηρήθηκε σε τροπικές περιοχές όπως η Κούβα, η Τζαμάικα και η Χαβάη.

Το συμβάν οδήγησε σε αυξημένο ενδιαφέρον για τη μελέτη των ηλιο-γήινων σχέσεων και την επίδραση της ηλιακής δραστηριότητας στη Γη και αποτελεί σημείο αναφοράς για την κατανόηση των πιθανών επιπτώσεων ενός ακραίου γεωμαγνητικού συμβάντος στη σύγχρονη

τεχνολογική υποδομή. Εκτιμάται ότι ένα παρόμοιο συμβάν σήμερα θα μπορούσε να προκαλέσει εκτεταμένες διακοπές στα ηλεκτρικά δίκτυα, στις τηλεπικοινωνίες και στα συστήματα πλοήγησης (Malekos Smith, 2023; Youvan, 2024).

### 3.2.2 Το Συμβάν της Hydro-Québec

Το Συμβάν της Hydro-Québec, γνωστό και ως γεωμαγνητική καταιγίδα του 1989, συνέβη στις 13 Μαρτίου 1989 και αποτελεί το πιο σημαντικό παράδειγμα των επιπτώσεων ενός γεωμαγνητικού συμβάντος στη σύγχρονη τεχνολογική υποδομή. Προκλήθηκε από μια ισχυρή ηλιακή έκλαμψη στις 9 Μαρτίου, η οποία οδήγησε σε μια μεγάλη εκτίναξη στεμματικής μάζας. Αυτή η μάζα ταξίδεψε στο διάστημα για λίγες ημέρες και έφτασε στη Γη στις 13 Μαρτίου, προκαλώντας έντονη γεωμαγνητική δραστηριότητα.

Οι επιπτώσεις αυτής της καταιγίδας συνοψίζονται στα εξής:

- **Ηλεκτρικό δίκτυο:** Το ηλεκτρικό δίκτυο της Hydro-Québec στον Καναδά κατέρρευσε σε λιγότερο από 90 δευτερόλεπτα, αφήνοντας περίπου 6 εκατομμύρια ανθρώπους χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα για έως και 9 ώρες.
- **Εξοπλισμός:** Πολλοί μετασχηματιστές και άλλος ηλεκτρικός εξοπλισμός υπέστησαν ζημιές λόγω των επαγόμενων ρευμάτων.
- **Δορυφορικά συστήματα:** Αναφέρθηκαν προβλήματα σε δορυφόρους και συστήματα επικοινωνιών.
- **Παγκόσμιες επιπτώσεις:** Παρατηρήθηκαν διακυμάνσεις τάσης και άλλα προβλήματα σε ηλεκτρικά δίκτυα σε όλη τη Βόρεια Αμερική, ακόμη και στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Το Συμβάν της Hydro-Québec αποτέλεσε ορόσημο για την κατανόηση της ευπάθειας των σύγχρονων ηλεκτρικών δικτύων σε γεωμαγνητικές διαταραχές. Οδήγησε σε σημαντικές αλλαγές στον σχεδιασμό και τη λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων, καθώς και σε αυξημένη έρευνα για την πρόβλεψη και μετρίαση των επιπτώσεων τέτοιων συμβάντων (Hadhazy, 2009; Phillips, 2021).

Οι δύο αυτές γεωμαγνητικές καταιγίδες υπογραμμίζουν τη σημασία της κατανόησης και προετοιμασίας για φυσικά φαινόμενα ηλεκτρομαγνητικών παλμών. Καθώς η εξάρτησή μας από την τεχνολογία αυξάνεται, η ανάγκη για ανθεκτικά συστήματα και στρατηγικές μετριασμού γίνεται όλο και πιο επιτακτική. Η συνεχής έρευνα στον τομέα αυτό είναι κρίσιμη για την προστασία των κρίσιμων υποδομών και για τη διασφάλιση της κοινωνικής και οικονομικής σταθερότητας σε περίπτωση μελλοντικών γεωμαγνητικών συμβάντων.

### 3.3 Ανάλυση των Συνιστωσών E1, E2 και E3

Τα EMP χαρακτηρίζονται ως καταστάσεις χαμηλής πιθανότητας αλλά υψηλών συνεπειών, δημιουργώντας σημαντικά προβλήματα στην εσωτερική ασφάλεια κάθε προηγμένου κράτους και ανησυχία στους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής. Συχνά παραλείπονται οι λεπτομέρειες για τον τρόπο που οι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί αλληλοεπιδρούν με τα ηλεκτρικά συστήματα και τα διαφορετικά στοιχεία που συνθέτουν ένα συμβάν, όπως οι παλμοί E1, E2 και E3, οι οποίοι έχουν διαφορετικές αλληλεπιδράσεις και επιδράσεις. Επομένως, είναι κρίσιμο να κατανοηθούν αυτές οι συνιστώσες, ειδικά σε σενάρια EMP μεγάλου υψομέτρου, όπως μια πυρηνική έκρηξη σε ύψος 30 χιλιομέτρων πάνω από την επιφάνεια της γης, προκειμένου να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά οι συνέπειες ενός τέτοιου γεγονότος (Averitt, 2021).

Ο παλμός E1, γνωστός και ως πρώιμος χρονικός παλμός (Early-Time Pulse), αποτελεί την πρώτη και ταχύτερη συνιστώσα του ηλεκτρομαγνητικού παλμού που προκαλείται από μια πυρηνική έκρηξη σε μεγάλο υψόμετρο. Χαρακτηρίζεται από την παραγωγή μιας εξαιρετικά ισχυρής και ταχείας αιχμής τάσης, η οποία εκδηλώνεται σχεδόν ακαριαία μετά την έκρηξη, με διάρκεια της τάξης των νανοδευτερολέπτων (Savage et al., 2010). Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από τον παλμό E1 μπορεί να φτάσει τα 50.000 V/m, μια τιμή που υπερβαίνει κατά πολύ τις προδιαγραφές των συνηθισμένων προστατευτικών διατάξεων υπέρτασης. Αυτή η υπερβολική τάση μπορεί να μεταδοθεί με ταχύτητα που προσεγγίζει την ταχύτητα του φωτός, δημιουργώντας διαφορές δυναμικού της τάξης των εκατομμυρίων ή ακόμη και δεκάδων εκατομμυρίων volt ανά χιλιόμετρο στην πληγείσα περιοχή (Foster et al., 2008).

Ο παλμός E1 είναι ιδιαίτερα επικίνδυνος για τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα λόγω τριών βασικών χαρακτηριστικών του (Savage et al., 2018):

- *Ταχύτητα:* Η εξαιρετικά γρήγορη άνοδος του παλμού (rise time) της τάξης των νανοδευτερολέπτων ξεπερνά τις δυνατότητες των περισσότερων προστατευτικών διατάξεων.
- *Ένταση:* Η υψηλή ένταση του ηλεκτρικού πεδίου υπερβαίνει τα όρια αντοχής πολλών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.
- *Ευρύ φάσμα συχνοτήτων:* Ο παλμός E1 καλύπτει ένα εύρος συχνοτήτων από περίπου 100 kHz έως 1 GHz, καθιστώντας δύσκολη την προστασία όλου του φάσματος των ηλεκτρονικών συσκευών.

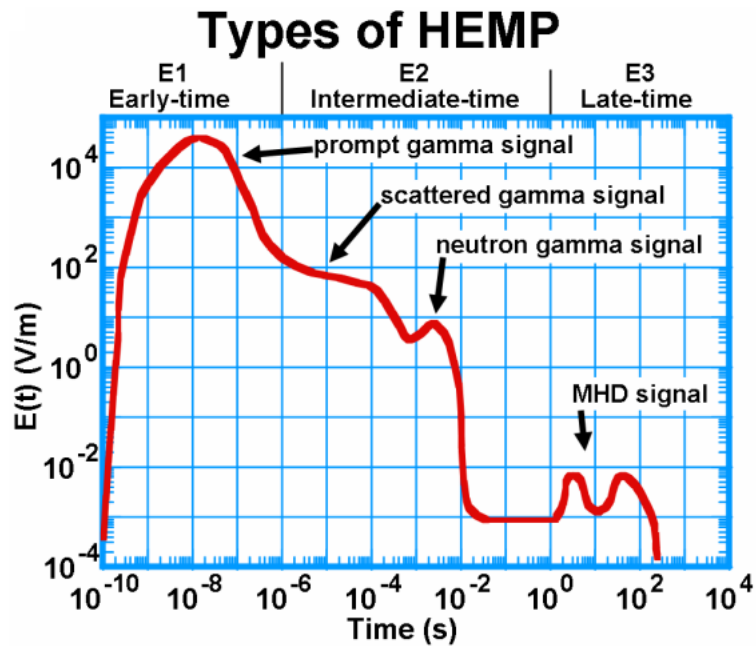
Οι επιπτώσεις στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα μπορεί να κυμαίνονται από προσωρινές δυσλειτουργίες έως και την πλήρη καταστροφή τους. Ιδιαίτερα ευάλωτα είναι τα

συστήματα επικοινωνιών, οι υπολογιστές, τα συστήματα ελέγχου και παρακολούθησης, καθώς και τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μεγάλοι υποσταθμοί ισχύος μπορούν να επηρεαστούν από την ικανότητα του να παράγει υψηλή τάση, η οποία μπορεί να βλάψει μόνιμα κάποια μέρη αλλά και ολόκληρα συστήματα ισχύος. Παρά τις προσπάθειες μετριασμού των επιπτώσεων από κυβερνητικούς οργανισμούς, όπως το Εθνικό Εργαστήριο Sandia, ο παλμός αυτός έχει αποδειχθεί ικανός να προκαλέσει μη αναστρέψιμες ζημιές σε μεγάλα δίκτυα διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο παλμός E2 ενός συμβάντος EMP, γνωστός και ως ενδιάμεσος παλμός, εμφανίζεται χιλιοστά του δευτερολέπτου μετά τον παλμό E1. Ο παλμός αυτός είναι ο πιο εύκολος στην αντιμετώπισή του, καθώς έχει κυματομορφή και ισχύ παρόμοια με αυτή της αστραπής. Ωστόσο, μπορεί να παράγει χιλιάδες βολτ ανά χιλιόμετρο και να βλάψει σοβαρά τα ηλεκτρικά συστήματα, ιδιαίτερα αν αναλογιστεί κανείς ότι ακολουθεί τον ήδη καταστροφικό παλμό E1. Η δυνατότητα του παλμού E2 να καταστρέψει τους μηχανισμούς ελέγχου και προστασίας των σύγχρονων ηλεκτρονικών εντείνει τη ζημιά που προκαλείται από τον προγενέστερό του.

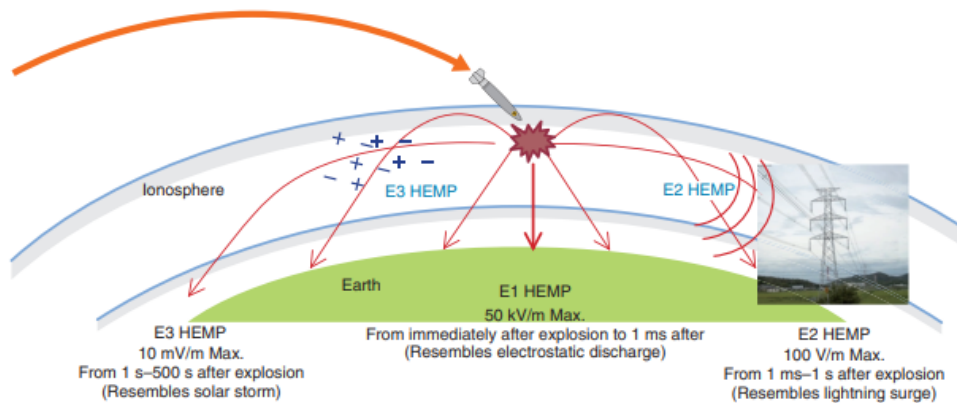
Ο παλμός E3, γνωστός και ως μακροπρόθεσμος παλμός, διαφέρει σημαντικά από τους παλμούς E1 και E2. Παράγει υπερτάσεις ισχύος που μπορεί να διαρκέσουν δευτερόλεπτα έως και μερικά λεπτά μετά το συμβάν, δημιουργώντας ηλεκτρικά πεδία που προκαλούν γεωμαγνητικά επαγόμενα ρεύματα (GICs: Geomagnetically Induced Currents). Αυτά μπορούν να μεταφερθούν από γραμμές ισχύος σε μεγάλους σταθμούς μετασχηματιστών, προκαλώντας σοβαρές ζημιές οι οποίες δυσχεραίνουν την αποκατάσταση των ηλεκτρικών συστημάτων και των δικτύων, οδηγώντας σε εκτεταμένες διακοπές ρεύματος (Averitt, 2021; U.S. Air Force Civil Engineer Center, 2020).

Συνοψίζοντας, ο παλμός E1, ή πρώτη φάση, παράγει έναν πολύ υψηλής έντασης παλμό σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων και με εξαιρετικά σύντομη διάρκεια, που κυμαίνεται από μερικά νανοδευτερόλεπτα έως κάποια μικροδευτερόλεπτα. Ο παλμός E2, ή ενδιάμεση φάση, είναι επίσης προϊόν της αλληλεπίδρασης της ακτινοβολίας με την ατμόσφαιρα και έχει χαρακτηριστικά που μοιάζουν με αυτά των κεραυνών, διαρκώντας από μικροδευτερόλεπτα έως δευτερόλεπτα. Η φάση E3, ή ύστερη φάση, προκαλείται από την αργή κίνηση των φορτισμένων σωματιδίων μέσα στο θερμαινόμενο πλάσμα της πυρηνικής έκρηξης, καθώς αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο της Γης. Οι επιδράσεις αυτής της φάσης διαρκούν από δευτερόλεπτα έως λεπτά. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται μια γενική κυματομορφή για ένα πλήρους σήματος HEMP (Malekos Smith, 2023; Savage et al., 2010; Youvan, 2024):



Εικόνα 7: Οι παλμοί / φάσεις ενός HEMP σήματος  
 Πηγή: Savage et al., 2010

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το εύρος επίδρασης κάθε τύπου παλμού μιας επίθεσης ηλεκτρομαγνητικών παλμών υψηλού υψομέτρου. Οι παλμοί E1 και E2 έχουν περίπου την ίδια εμβέλεια ενώ η ακτίνα δράσης του E3 είναι σαφώς μεγαλύτερη και μπορεί να επηρεάσει περιοχές σε παγκόσμια κλίμακα:



Εικόνα 8: Εκπομπή ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε μια ευρεία περιοχή από μια επίθεση τύπου HEMP  
 Πηγή: Maruyama et al., 2018

### 3.4 Κατηγορίες Παλμών

Ο όρος ηλεκτρομαγνητικός παλμός υψηλής ισχύος (HPEM: High-Power Electromagnetic Pulse) αναφέρεται σε ένα φαινόμενο ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής εξαιρετικά υψηλής έντασης. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκληθεί είτε από πυρηνικές εκρήξεις (NEMP:

Nuclear ElectroMagnetic Pulse) σε μεγάλο υψόμετρο είτε από εξειδικευμένες μη πυρηνικές συσκευές, όπως οι μη πυρηνικοί ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί<sup>1</sup> (non-nuclear EMP).

Στην περίπτωση των πυρηνικών ηλεκτρομαγνητικών παλμών, η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου μπορεί να φτάσει έως και τα 50 kV/m, καλύπτοντας ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα συχνοτήτων που εκτείνεται από μερικά Hz έως αρκετά GHz. Η τιμή των 50 kV/m δεν είναι αυθαίρετη, αλλά καθορίζεται από αυστηρά στρατιωτικά πρότυπα (MIL-STD: Military Standard) και διεθνή πρότυπα που έχουν θεσπιστεί από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC: International Electrotechnical Commission). Για να κατανοηθεί καλύτερα το μέγεθος αυτής της έντασης, αξίζει να σημειωθεί ότι σε απόσταση ενός μέτρου, η διαφορά δυναμικού (τάση) που δημιουργείται φτάνει τα 50.000 V.

Οι επιπτώσεις ενός τόσο ισχυρού παλμού στα ηλεκτρονικά συστήματα είναι καταστροφικές. Το παραγόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο επάγει ισχυρά ηλεκτρικά ρεύματα σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, καθώς και σε συστήματα επικοινωνίας. Αυτά τα ρεύματα μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες στον εξοπλισμό, συμπεριλαμβανομένης της διαρροής ηλεκτρικού φορτίου ή ακόμη και της τήξης των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων.

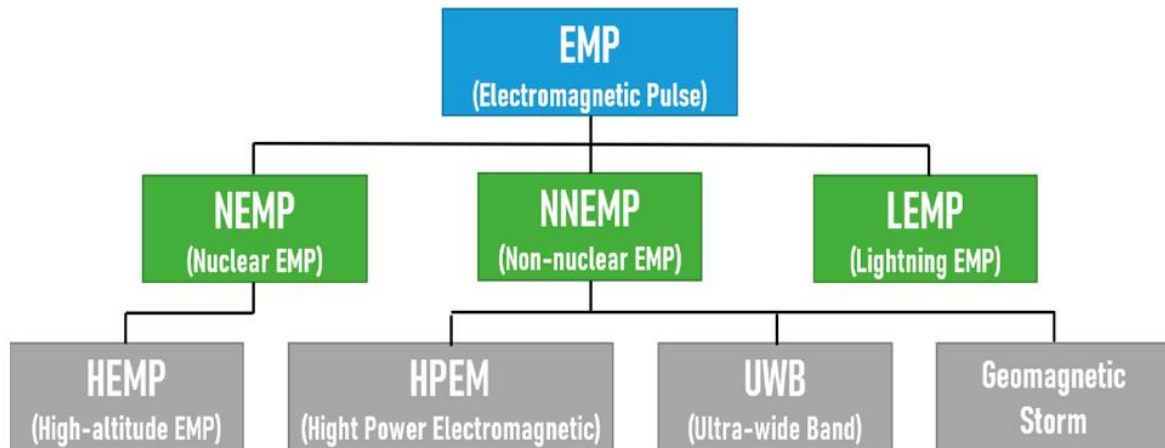
Η κατηγοριοποίηση των EMPs είναι ένα σημαντικό ζήτημα για την κατανόηση και την αντιμετώπιση αυτών των φαινομένων. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί, τα EMPs διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες: τα πυρηνικά EMPs (συμπεριλαμβανομένων των πυρηνικών EMPs υψηλού υψομέτρου) και τα μη πυρηνικά EMPs. Ωστόσο, είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι η κατηγορία των μη πυρηνικών EMPs περιλαμβάνει τόσο τεχνητά όσο και φυσικά φαινόμενα. Στα φυσικά φαινόμενα συγκαταλέγονται τα EMPs που προκαλούνται από αστραπές (LEMPs: Lightning Electromagnetic Pulses) και οι γεωμαγνητικές καταιγίδες. Αυτά τα φυσικά φαινόμενα διαφοροποιούνται σημαντικά από τα τεχνητά παραγόμενα EMPs, τόσο ως προς τη φύση τους όσο και ως προς τις επιπτώσεις τους.

Η μελέτη και κατανόηση των διαφόρων τύπων EMPs είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών προστασίας και μετριασμού των επιπτώσεών τους στις σύγχρονες ηλεκτρονικές υποδομές. Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της αυξανόμενης εξάρτησης της κοινωνίας μας από την τεχνολογία και τα ηλεκτρονικά συστήματα.

---

<sup>1</sup> είναι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί που παράγονται χωρίς τη χρήση πυρηνικών όπλων και που μπορούν να δημιουργηθούν από διάφορες πηγές και τεχνολογίες.





*Εικόνα 9: Κατηγοριοποίηση ηλεκτρομαγνητικών παλμών*

**Πηγή:** Kim et al., 2021

Η ένταση των πυρηνικών ηλεκτρομαγνητικών παλμών είναι εξαιρετικά υψηλή, με τη διάρκειά τους να κυμαίνεται από μερικά δευτερόλεπτα έως λίγα λεπτά μετά την πυρηνική έκρηξη. Αν και δεν έχουν άμεσες θανατηφόρες επιπτώσεις στον ανθρώπινο οργανισμό, οι συνέπειές τους στα ηλεκτρονικά συστήματα είναι καταστροφικές. Προκαλούν στιγμιαία ροή υπερρεύματος σε ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών, συμπεριλαμβανομένων συστημάτων επικοινωνίας, ελέγχου ισχύος, και αεροναυτικών συστημάτων, οδηγώντας στην παράλυση ή την καταστροφή τους (Foster et al., 2008).

Η ζημιά που προκαλείται από τα πυρηνικά EMPs οφείλεται στην εισαγωγή στιγμιαίων ρευμάτων σε κάθε είδους μεταλλικό αγωγό. Αυτά τα ρεύματα μπορούν να διεισδύσουν στον εξοπλισμό ή να προκαλέσουν άμεση βλάβη σε ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, οδηγώντας σε αστοχία των συστημάτων. Η ταχύτητα και η ένταση αυτών των ρευμάτων καθιστούν εξαιρετικά δύσκολη την προστασία των συσκευών με συμβατικές μεθόδους (Savage et al., 2010).

Τα EMPs που παράγονται σε χαμηλότερα υψόμετρα, αν και παρόμοια με τα High-altitude EMPs (HEMPs), παρουσιάζουν διαφορετικά χαρακτηριστικά ακτινοβολίας. Ενώ οι τυπικές ιδιότητες των πυρηνικών EMPs εμφανίζονται σε υψόμετρα άνω των 30 χιλιομέτρων, σε χαμηλότερα υψόμετρα (κάτω των 20 χιλιομέτρων) η παραγωγή υψηλής ισχύος EMP είναι μειωμένη λόγω της υψηλότερης πυκνότητας των μορίων του αέρα. Ωστόσο, σε αυτές τις περιπτώσεις, οι φυσικές επιπτώσεις της ακτινοβολίας μπορεί να είναι πιο σημαντικές από αυτές των υψηλής ισχύος EMPs.

Το παραγόμενο υψηλής ισχύος EMP διαδίδεται ως ένας διευρυνόμενος κυκλικός σχηματισμός με κέντρο το σημείο της έκρηξης. Το πάχος αυτού του κυκλικού μετώπου μπορεί να φτάσει τις δεκάδες μέτρα. Όταν το μέτωπο φτάσει στην επιφάνεια της Γης, παρατηρείται

αρχικά ένας σύντομος παλμός, ακολουθούμενος από μια ραγδαία αύξηση της έντασης του υψηλής ισχύος EMP μετά από μερικά νανοδευτερόλεπτα. Σε διάστημα μερικών εκατομμυρίων νανοδευτερολέπτων, οι περισσότερες ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές στην περιοχή παύουν να λειτουργούν.

Τα υψηλής ισχύος EMPs καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, εκτεινόμενο από δεκάδες MHz έως δεκάδες GHz. Ειδικότερα, το EMP που προκαλείται από μια πυρηνική έκρηξη κατανέμεται σε ένα εξαιρετικά ευρύ φάσμα, από χαμηλές συχνότητες έως εκατοντάδες MHz. Αυτό το ευρύ φάσμα συχνοτήτων συμβάλλει στην ικανότητα των πυρηνικών EMPs να επηρεάζουν ένα μεγάλο εύρος ηλεκτρονικών συστημάτων, καθιστώντας τα ιδιαίτερα επικίνδυνα για τις σύγχρονες τεχνολογικές υποδομές (Kim et al., 2021).

### **3.5 Ιστορική Αντίληψη και Επιπτώσεις στα Διάφορα Συστήματα**

Οι επιστήμονες άρχισαν να κατανοούν τις επιπτώσεις των ηλεκτρομαγνητικών παλμών στα ηλεκτρικά συστήματα κατά τις πυρηνικές δοκιμές που διεξήχθησαν τη δεκαετία του 1960 από τις ΗΠΑ και την ΕΣΣΔ. Κατά τη δοκιμή Starfish των ΗΠΑ, οι επιπτώσεις των EMP έφτασαν μέχρι τη Χαβάη, πάνω από 1400 μίλια μακριά, όπου κατέστρεψαν τη στρατιωτική υποδομή των επικοινωνιών, τους διακόπτες των κυκλωμάτων και προκάλεσαν συσκότιση με τη διακοπή του δημόσιου φωτισμού (Averitt, 2021; Youvan, 2024). Η πυρηνική έκρηξη 1,4 μεγατόνων το 1962, περίπου 250 μίλια πάνω από το νησί Johnston, προκάλεσε διακοπές στην ηλεκτροδότηση και στις τηλεπικοινωνίες στη Χαβάη, 800 μίλια μακριά (Division of Environmental Health - Office of Radiation Protection, 2003; Malekos Smith, 2023).

Οι σοβιετικές δοκιμές το 1962, γνωστές ως δοκιμές K, πυροδότησαν τρεις βόμβες 300 κιλοτόνων σε διαφορετικά υψόμετρα, προκειμένου να μελετήσουν τις επιπτώσεις των EMP στα αντιβαλλιστικά τους συστήματα προκαλώντας ζημιές σε ραντάρ, συστήματα επικοινωνίας και πολιτικές υποδομές μέχρι και 1000 χιλιόμετρα μακριά από τον χώρο της δοκιμής (Averitt, 2021; Malekos Smith, 2023).

Παρά την ανθεκτικότητα των ηλεκτρονικών συσκευών της δεκαετίας του 1960, που χρησιμοποιούσαν τεχνολογία σωλήνων κενού, αυτές υπέστησαν ζημιές και διακοπές στη λειτουργία τους. Τα σύγχρονα ηλεκτρικά συστήματα και δίκτυα είναι ακόμη πιο ευάλωτα στους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς, λόγω της χρήσης της ασύρματης τεχνολογίας και των μικροσίπ, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο καταστροφικών επιπτώσεων από ηλεκτρομαγνητικά συμβάντα (Averitt, 2021).

Ένας ηλεκτρομαγνητικός παλμός που παράγεται από ένα «όπλο ηλεκτρομαγνητικού παλμού», όταν εκτοξευτεί, μπορεί να βραχυκυκλώσει μια ποικιλία ηλεκτρονικών συσκευών,

όπως υπολογιστές, ραδιόφωνα, δορυφόρους, δέκτες ραντάρ, ακόμη και τα κοινά φανάρια σηματοδότησης στους δρόμους. Όλες οι ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές που βρίσκονται εντός της ζώνης επιρροής της έκρηξης θα μπορούσαν να χτυπηθούν ταυτόχρονα επειδή οι παλμοί αυτοί κινούνται με την ταχύτητα του φωτός.

Από την απαρχή της εποχής της βιομηχανικής επανάστασης και ιδιαίτερα στη σύγχρονη ψηφιακή εποχή, η κοινωνία βασίζεται στα ηλεκτρονικά συστήματα, πολλά από τα οποία περιλαμβάνουν μέρη που είναι εξαιρετικά ευάλωτα σε υψηλά ηλεκτρικά ρεύματα και τάσεις. Οι ημιαγωγοί παίζουν σημαντικό ρόλο στον έλεγχο πολλών από αυτά τα ηλεκτρονικά συστήματα. Η τοπική θέρμανση που προκύπτει από έναν EMP παλμό προκαλεί δυσλειτουργία των ημιαγωγών των συσκευών. Η βλάβη του ημιαγωγίμου τσιπ θα μπορούσε να εξαλείψει τα τηλεφωνικά και ηλεκτρικά συστήματα, τα σιδηροδρομικά δίκτυα, τις βιομηχανικές διεργασίες και τις πηγές νερού.

Ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός αποτελεί ένα φαινόμενο με δυνητικά καταστροφικές συνέπειες για τον σύγχρονο ηλεκτρονικό και ηλεκτρικό εξοπλισμό. Η επίδραση ενός τέτοιου παλμού μπορεί να επιφέρει σοβαρές βλάβες σε ένα ευρύ φάσμα εμπορικών και στρατιωτικών συστημάτων, με επιπτώσεις που εκτείνονται από την καταστροφή μεμονωμένων συσκευών έως την πρόκληση εκτεταμένων διακοπών σε κρίσιμες υποδομές.

Στον τομέα της πληροφορικής, ο αντίκτυπος του EMP είναι ιδιαίτερα ανησυχητικός. Τα συστήματα επεξεργασίας δεδομένων, που αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της σύγχρονης ψηφιακής οικονομίας, είναι εξαιρετικά ευάλωτα σε τέτοιους παλμούς. Οι υπερτάσεις που δημιουργούνται μπορούν να προκαλέσουν καταστροφική βλάβη στα ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα των υπολογιστών, συμπεριλαμβανομένων των μικροεπεξεργαστών, των μονάδων μνήμης και των συστημάτων αποθήκευσης, οδηγώντας σε απώλεια δεδομένων και διακοπή λειτουργίας.

Στον τομέα των επικοινωνιών, οι επιπτώσεις μπορεί να είναι εξίσου σοβαρές. Τα συστήματα τηλεπικοινωνιών, συμπεριλαμβανομένων των δικτύων κινητής τηλεφωνίας, των δορυφορικών συστημάτων και των ραδιοηλεκτρονικών εγκαταστάσεων, είναι ιδιαίτερα ευάλωτα λόγω της εγγενούς τους ευαισθησίας στις ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές. Οι δέκτες όλων των τύπων, από τους απλούς ραδιοφωνικούς δέκτες έως τους πολύπλοκους δορυφορικούς δέκτες, κινδυνεύουν από σοβαρές βλάβες ή πλήρη καταστροφή.

Στον βιομηχανικό τομέα, οι επιπτώσεις ενός EMP μπορούν να διαταράξουν κρίσιμα συστήματα ελέγχου. Οι εφαρμογές βιομηχανικού ελέγχου, όπως τα συστήματα SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση των βιομηχανικών διεργασιών, είναι ιδιαίτερα ευάλωτες. Επιπλέον, τα συστήματα οδικής και

σιδηροδρομικής σηματοδότησης, που είναι ζωτικής σημασίας για την ασφάλεια των μεταφορών, μπορεί να υποστούν σοβαρές βλάβες, οδηγώντας σε πιθανές καταστροφικές συνέπειες.

Στον στρατιωτικό τομέα, οι επιπτώσεις ενός EMP μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την εθνική ασφάλεια. Τα ενσωματωμένα υπολογιστικά συστήματα σε στρατιωτικό εξοπλισμό, όπως οι επεξεργαστές σήματος, τα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου πτήσης και τα ψηφιακά συστήματα ελέγχου κινητήρα, είναι κρίσιμα για τη λειτουργία προηγμένων οπλικών συστημάτων και πλατφορμών. Η διαταραχή ή καταστροφή αυτών των συστημάτων θα μπορούσε να έχει σοβαρές επιπτώσεις στις στρατιωτικές επιχειρήσεις και στην αμυντική ετοιμότητα.

Επιπλέον, ο εξοπλισμός ηλεκτρονικού πολέμου, που είναι ζωτικής σημασίας για τις σύγχρονες στρατιωτικές επιχειρήσεις, είναι ιδιαίτερα ευάλωτος στις επιπτώσεις των παλμών αυτών. Αυτό περιλαμβάνει συστήματα ηλεκτρονικών αντιμέτρων, συστήματα παρεμβολής και εξοπλισμό που αφορά στην υποκλοπή σημάτων (SIGINT: Signals intelligence).

Στον τομέα των μεταφορών, τα σύγχρονα οχήματα που είναι εξοπλισμένα με ηλεκτρονικά συστήματα ανάφλεξης και ελέγχου κινητήρα είναι επίσης ευάλωτα στις επιπτώσεις του φαινομένου. Αλυσιδωτά, το φαινόμενο μπορεί να οδηγήσει σε εκτεταμένες διαταραχές στις μεταφορές, επηρεάζοντας τόσο τις εμπορικές όσο και τις ιδιωτικές μετακινήσεις.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι επιπτώσεις ενός ηλεκτρομαγνητικού παλμού δεν περιορίζονται μόνο στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Μεγάλες μεταλλικές κατασκευές, όπως σιδηροδρομικές γραμμές, μεγάλες κεραιές, σωληνώσεις, καλωδιώσεις και μεταλλικές περιφράξεις, μπορούν να λειτουργήσουν ως συλλέκτες του παλμού, συγκεντρώνοντας και μεταδίδοντας την ενέργεια του σε συνδεδεμένες εγκαταστάσεις. Ακόμη και τα υπόγεια υλικά, παρόλο που είναι μερικώς μονωμένα στη γη, μπορούν να λειτουργήσουν ως συλλέκτες EMP. Αυτή η συγκέντρωση και μετάδοση ενέργειας μπορεί να οδηγήσει σε υπερτάσεις σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις, όπως τηλεφωνικές γραμμές μεγάλων αποστάσεων ή γεννήτριες ηλεκτρικού ρεύματος. Οι υπερτάσεις αυτές έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές στις υποδομές της ηλεκτρικής ενέργειας και των τηλεπικοινωνιών, με πιθανές μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στην κοινωνία και στην οικονομία.

Συμπερασματικά, η απειλή του EMP αποτελεί ένα σύνθετο και πολυδιάστατο πρόβλημα που απαιτεί ολοκληρωμένες στρατηγικές μετριασμού και προστασίας. Η κατανόηση των μηχανισμών του φαινομένου και των επιπτώσεών του σε διάφορα συστήματα είναι κρίσιμη για την ανάπτυξη αποτελεσματικών μέτρων προστασίας και την ενίσχυση της

ανθεκτικότητας των κρίσιμων υποδομών (Division of Environmental Health - Office of Radiation Protection, 2003).

### 3.6 Ενέργειες για την Προστασία των Συστημάτων

Η προστασία από τις επιπτώσεις του ηλεκτρομαγνητικού παλμού αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας<sup>2</sup> (EMC: ElectroMagnetic Compatibility) και της ασφάλειας ηλεκτρονικών συστημάτων. Δύο κύριες μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης: η μεταλλική θωράκιση και η προσαρμοσμένη σκλήρυνση.

Η πρώτη μέθοδος, η μεταλλική θωράκιση, βασίζεται στην αρχή του κλωβού Faraday. Αυτή η τεχνική περιλαμβάνει την πλήρη περιβολή του προστατευόμενου αντικειμένου με ένα συνεχές μεταλλικό περίβλημα, συνήθως από υλικά υψηλής αγωγιμότητας όπως ο χαλκός ή ο χάλυβας, όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα:



*Εικόνα 10: Κλωβός προστασίας αντικειμένου από τους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς*

**Πηγή:** Paki et al., 2022

Το πάχος του μεταλλικού στρώματος μπορεί να είναι μόλις ένα κλάσμα του χιλιοστού, αρκεί να παρέχει συνεχή κάλυψη. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου μπορεί να μειωθεί σημαντικά από την παρουσία ακόμη και μικροσκοπικών οπών ή ασυνεχειών στο μεταλλικό περίβλημα. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, συχνά χρησιμοποιούνται πρόσθετα στοιχεία όπως αγωγίμες φλάντζες, πλέγματα και ειδικά

---

<sup>2</sup> Το ζήτημα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας είναι κρίσιμο επειδή αφορά τη διασφάλιση ότι τα ηλεκτρονικά συστήματα και οι συσκευές μπορούν να λειτουργούν σωστά και αποτελεσματικά στο περιβάλλον τους, χωρίς να προκαλούν ή να υφίστανται ανεπιθύμητες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

σχεδιασμένες θύρες και ανοίγματα για να διασφαλιστεί η ακεραιότητα του προστατευτικού φράγματος (Division of Environmental Health - Office of Radiation Protection, 2003; Paki et al., 2022).

Εναλλακτικά, η μεταλλική θωράκιση μπορεί να αφορά σε ολόκληρους χώρους ή κτήρια προστατευμένα από τον ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Η ανάπτυξη κρίσιμου εξοπλισμού αποστολής (MCE: Mission Critical Equipment) αποτελεί μια στρατηγική που, ενώ χαρακτηρίζεται από χαμηλό ρίσκο, παρουσιάζει σημαντικές προκλήσεις στην υλοποίησή της. Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην αρχή της δημιουργίας ενός ολοκληρωμένου προστατευτικού περιβάλλοντος για κρίσιμα συστήματα και εξοπλισμό.

Τα δωμάτια ή οι κατασκευές που είναι ανθεκτικές στο EMP μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές και υλικά, όπως είναι για παράδειγμα (Paki et al., 2022):

- **Μεταλλική Θωράκιση:** Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την κάλυψη των τοίχων, της οροφής και του δαπέδου με συνεχή μεταλλικά φύλλα, συνήθως από χαλκό ή γαλβανισμένο χάλυβα. Η αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου εξαρτάται από τη συνέχεια της θωράκισης και την προσεκτική σφράγιση όλων των ανοιγμάτων και των διεπαφών.
- **Θωράκιση από Αγώγιμο Σκυρόδεμα:** Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί ειδικά σχεδιασμένο σκυρόδεμα που περιέχει αγώγιμα πρόσθετα, όπως μεταλλικές ίνες ή άνθρακα. Το αγώγιμο σκυρόδεμα παρέχει τόσο δομική αντοχή όσο και ηλεκτρομαγνητική θωράκιση.
- **Υβριδική Θωράκιση Σκυροδέματος/Χάλυβα:** Αυτή η μέθοδος συνδυάζει τα πλεονεκτήματα του οπλισμένου σκυροδέματος με πρόσθετη μεταλλική θωράκιση, προσφέροντας ενισχυμένη προστασία και δομική ακεραιότητα.

Η δεύτερη μέθοδος, γνωστή ως προσαρμοσμένη σκλήρυνση, αποτελεί μια πιο στοχευμένη και οικονομικά αποδοτική προσέγγιση. Αυτή η τεχνική επικεντρώνεται στην ενίσχυση των πιο ευάλωτων εξαρτημάτων και κυκλωμάτων ενός συστήματος. Περιλαμβάνει τον επανασχεδιασμό συγκεκριμένων στοιχείων ώστε να είναι πιο ανθεκτικά στις υψηλές τάσεις και στα ρεύματα που προκαλούνται από έναν ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Αυτή η μέθοδος μπορεί να περιλαμβάνει τη χρήση εξαρτημάτων υψηλότερης αντοχής, την προσθήκη κυκλωμάτων προστασίας από υπερτάσεις και τη βελτίωση της μόνωσης κρίσιμων στοιχείων. Παρόλο που η προσαρμοσμένη σκλήρυνση έχει δείξει υποσχόμενα αποτελέσματα στη μείωση της ευπάθειας των σύγχρονων συστημάτων, η πολυπλοκότητα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ

των διαφόρων εξαρτημάτων μπορεί μερικές φορές να οδηγήσει σε απρόβλεπτες αστοχίες, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για εκτενείς δοκιμές και συνεχή βελτίωση (Division of Environmental Health - Office of Radiation Protection, 2003).

Για την επίτευξη μιας ολοκληρωμένης προστασίας από EMP, απαιτείται μια πολυεπίπεδη προσέγγιση που συνδυάζει θωράκιση, γείωση, φιλτράρισμα και εκτενείς δοκιμές. Η θωράκιση, όπως περιγράφηκε παραπάνω, παρέχει την πρώτη γραμμή άμυνας. Η κατάλληλη γείωση είναι κρίσιμη για τη διοχέτευση των επαγόμενων ρευμάτων μακριά από τα ευαίσθητα εξαρτήματα. Το φιλτράρισμα, που περιλαμβάνει τη χρήση εξειδικευμένων κυκλωμάτων για την εξομάλυνση των ηλεκτρικών παλμών, παρέχει πρόσθετη προστασία στα ευαίσθητα ηλεκτρονικά. Τέλος, εκτενείς δοκιμές είναι απαραίτητες για την επαλήθευση της αποτελεσματικότητας αυτών των μέτρων προστασίας υπό διάφορες συνθήκες και τιμές.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι επιπτώσεις των EMP διαφέρουν από εκείνες των γεωμαγνητικών διαταραχών (GMD: Geomagnetic Disturbances). Ενώ τα GMD τείνουν να επηρεάζουν κυρίως μεγάλους μετασχηματιστές μέσω των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, τα EMP μπορούν να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές σε ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών συσκευών, από μικρά καταναλωτικά ηλεκτρονικά έως κρίσιμες υποδομές.

Η μοντελοποίηση των επιπτώσεων του EMP σε σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα παραμένει μια σημαντική πρόκληση. Η ταχεία εξέλιξη της τεχνολογίας και η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ηλεκτρονικών συστημάτων καθιστούν δύσκολη την ακριβή πρόβλεψη της απόκρισης σε ένα γεγονός. Αυτή η αβεβαιότητα υπογραμμίζει την ανάγκη για συνεχή έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της προστασίας.

Ο κίνδυνος που σχετίζεται με τα περιστατικά EMP εκτείνεται πέρα από την άμεση ζημιά στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Η πιθανότητα εκτεταμένης βλάβης στο ηλεκτρικό δίκτυο, σε συνδυασμό με τη δυσλειτουργία πληθώρας μικρότερων ηλεκτρονικών συσκευών, θα μπορούσε να προκαλέσει αλυσιδωτά αρνητικά αποτελέσματα σε διάφορους τομείς της κοινωνίας. Αυτό το σενάριο είναι ιδιαίτερα ανησυχητικό δεδομένης της έλλειψης επαρκούς προειδοποίησης για ένα επερχόμενο γεγονός και ειδικά στην περίπτωση εσκεμμένης χρήσης όπλων EMP.

Συμπερασματικά, η προστασία από τις επιπτώσεις του EMP απαιτεί μια ολοκληρωμένη και πολυεπίπεδη προσέγγιση. Ενώ οι τεχνικές μεταλλικής θωράκισης και προσαρμοσμένης σκλήρυνσης παρέχουν σημαντικές λύσεις, η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη είναι απαραίτητες για την αντιμετώπιση των αναδυόμενων προκλήσεων που θέτει η εξελισσόμενη τεχνολογία και η αυξανόμενη εξάρτηση της κοινωνίας από τα ηλεκτρονικά συστήματα (Averitt, 2021).

## 4. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΟΠΛΑ

Τα ηλεκτρομαγνητικά όπλα είναι μια κατηγορία όπλων που χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια για να προκαλέσουν ζημιά ή να εξουδετερώσουν στόχους. Υπάρχουν διάφοροι τύποι τέτοιων όπλων, όπως:

- *Όπλα ηλεκτρομαγνητικού παλμού (EMP)*: Εκπέμπουν ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό παλμό που μπορεί να καταστρέψει ηλεκτρονικές συσκευές.
- *Όπλα κατευθυνόμενης ενέργειας*: Χρησιμοποιούν εστιασμένη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία για να προκαλέσουν ζημιά σε συγκεκριμένους στόχους.
- *Ραδιοσυχνотικά όπλα*: Εκπέμπουν ισχυρά κύματα ραδιοσυχνοτήτων για να διαταράξουν ηλεκτρονικά συστήματα.

Αυτά τα όπλα έχουν διάφορες εφαρμογές, από την εξουδετέρωση ηλεκτρονικών συστημάτων μέχρι τη δημιουργία μη θανατηφόρων μέσων ελέγχου πλήθους. Ωστόσο, η ανάπτυξη και χρήση τους εγείρει ηθικά και νομικά ζητήματα.

### 4.1 Οι Ηλεκτρομαγνητικοί Παλμοί ως Επιθετικό Όπλο

Η ανάπτυξη και η πιθανή χρήση ηλεκτρομαγνητικών όπλων αποτελεί ένα αναδυόμενο ζήτημα στο πεδίο της στρατιωτικής τεχνολογίας και στρατηγικής. Τα όπλα αυτά, που βασίζονται στην παραγωγή ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών παλμών παρουσιάζουν μια σειρά από μοναδικά χαρακτηριστικά και προκλήσεις που τα διαφοροποιούν από τα συμβατικά οπλικά συστήματα. Συχνά αναφέρονται και ως «ηλεκτρονικές βόμβες» ή “e-bombs” και έχουν αναπτυχθεί ως μη πυρηνικές εναλλακτικές για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών παλμών. Σε αντίθεση με τα πυρηνικά όπλα, τα οποία παράγουν αυτού του είδους τους παλμούς ως παράπλευρο αποτέλεσμα, αυτά τα συστήματα είναι σχεδιασμένα ειδικά για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών παλμών. Η τεχνολογική πρόοδος έχει επιτρέψει την σμίκρυνση αυτών των συσκευών, με αναφορές για συσκευές μεγέθους χαρτοφύλακα ικανές να παράγουν σημαντικά ωστικά κύματα EMP.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στον τομέα αυτό περιλαμβάνουν:

1. Χρήση υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας για την παραγωγή ισχυρών μαγνητικών πεδίων.
2. Ανάπτυξη τεχνολογιών μικροκυμάτων υψηλής ισχύος.
3. Βελτιωμένες τεχνικές παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών παλμών υψηλής ισχύος.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι πολλές από αυτές τις τεχνολογικές εξελίξεις παραμένουν διαβαθμισμένες, καθιστώντας δύσκολη την πλήρη αξιολόγηση των δυνατοτήτων τους στο δημόσιο πεδίο.



## 4.2 Χρήση και Σημασία των EMP στο Σύγχρονο Στρατιωτικό Σχεδιασμό και στην Πολεμική Στρατηγική

Η ανάπτυξη ηλεκτρομαγνητικών όπλων έχει σημαντικές επιπτώσεις στη στρατιωτική στρατηγική και στη διεθνή πολιτική:

- *Μη Θανατηφόρος Χαρακτήρας:* Ο μη θανατηφόρος χαρακτήρας αυτών των όπλων τα καθιστά λιγότερο προβληματικά από πολιτική άποψη σε σύγκριση με τα συμβατικά πυρομαχικά. Αυτό διευρύνει το φάσμα των στρατιωτικών επιλογών σε καταστάσεις όπου η χρήση θανατηφόρας βίας θα ήταν απαγορευτική ή ανεπιθύμητη.
- *Στοχευμένη Καταστροφή Υποδομών:* Τα EMP έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν εκτεταμένες ζημιές σε ηλεκτρονικές και ηλεκτρικές υποδομές χωρίς άμεσες ανθρώπινες απώλειες. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την καταστροφή συστημάτων επικοινωνίας, δικτύων ηλεκτροδότησης και κρίσιμων υπολογιστικών συστημάτων σε μια περιοχή που μπορεί να εκτείνεται σε αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα.
- *Επιπτώσεις στη Στρατιωτική Ετοιμότητα:* Η αυξανόμενη εξάρτηση των στρατιωτικών δυνάμεων από προηγμένα ηλεκτρονικά συστήματα τις καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτες σε επιθέσεις EMP. Αυτό περιλαμβάνει συστήματα διοίκησης και ελέγχου, δορυφορικές επικοινωνίες, και προηγμένα οπλικά συστήματα που βασίζονται σε ηλεκτρονικά.
- *Ασύμμετρος Πόλεμος:* Τα ηλεκτρομαγνητικά όπλα προσφέρουν τη δυνατότητα για ασύμμετρο πόλεμο, επιτρέποντας σε μικρότερες δυνάμεις να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές σε τεχνολογικά προηγμένους αντιπάλους.

Παρά τις δυνατότητές τους, τα ηλεκτρομαγνητικά όπλα εγείρουν σημαντικές ανησυχίες:

- *Διάκριση Στόχων:* Η ευρεία επίδραση των EMP καθιστά δύσκολη τη διάκριση μεταξύ στρατιωτικών και πολιτικών στόχων, εγείροντας ηθικά και νομικά ζητήματα σχετικά με τη χρήση τους.
- *Μακροπρόθεσμες Επιπτώσεις:* Οι πιθανές μακροπρόθεσμες επιπτώσεις στις πολιτικές υποδομές και στην οικονομία μιας περιοχής που έχει πληγεί από EMP δεν είναι πλήρως κατανοητές.
- *Προστασία και Αντίμετρα:* Η ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων προστασίας από EMP παραμένει μια σημαντική πρόκληση, ιδιαίτερα για μεγάλης κλίμακας πολιτικές υποδομές.

Τα όπλα ηλεκτρομαγνητικού παλμού έχουν αναδειχθεί ως κρίσιμο στοιχείο στο σύγχρονο στρατιωτικό σχεδιασμό, εξυπηρετώντας δύο βασικούς στρατηγικούς σκοπούς.

Πρωτίστως, λειτουργούν ως προληπτικό μέτρο για την εξουδετέρωση των συστημάτων διοίκησης και ελέγχου του αντιπάλου. Η ικανότητα τους να διαταράσσουν ή να καταστρέφουν ηλεκτρονικά συστήματα σε μεγάλη κλίμακα τα καθιστά ιδιαίτερα αποτελεσματικά στην παράλυση των επικοινωνιακών δικτύων και των υποδομών Πληροφορικής του εχθρού, προσφέροντας έτσι σημαντικό τακτικό πλεονέκτημα.

Δευτερευόντως, λειτουργούν ως ισχυρό αποτρεπτικό μέσο έναντι παρόμοιων επιθέσεων. Η ύπαρξη και η επίδειξη ικανοτήτων ηλεκτρομαγνητικών παλμών από ένα κράτος μπορεί να αποθαρρύνει πιθανούς αντιπάλους από το να εξαπολύσουν παρόμοιες επιθέσεις, καθώς ο φόβος αντιποίνων λειτουργεί ως ισχυρός αποτρεπτικός παράγοντας. Αυτή η στρατηγική αποτροπής έχει παραλληλιστεί με τη λογική της πυρηνικής αποτροπής κατά τη διάρκεια του Ψυχρού Πολέμου, αν και σε μικρότερη κλίμακα.

Η ενσωμάτωση της ανθεκτικότητας έναντι των EMP στα σχέδια εθνικής ασφάλειας μεγάλων δυνάμεων όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες, η Κίνα και η Ρωσία υπογραμμίζουν τη στρατηγική σημασία αυτής της τεχνολογίας. Για παράδειγμα, η Στρατηγική Εθνικής Ασφάλειας των ΗΠΑ του 2017 αναφέρει ρητά την ανάγκη προστασίας κρίσιμων υποδομών από απειλές EMP. Παρομοίως, η Κίνα έχει επενδύσει σημαντικά στην ανάπτυξη τεχνολογιών EMP και στην προστασία των στρατιωτικών της συστημάτων από τέτοιες επιθέσεις, όπως αναφέρεται σε εκθέσεις του Κογκρέσου των ΗΠΑ (Clark et al., 2021; Defensebridge, 2023; Division of Environmental Health - Office of Radiation Protection, 2003; Youvan, 2024).

### **4.3 Οι Ηλεκτρομαγνητικοί Παλμοί ως Αμυντικό Όπλο**

Η εξέλιξη των μη πυρηνικών όπλων EMP αντιπροσωπεύει μια σημαντική μετατόπιση στη στρατιωτική στρατηγική. Αυτή η εξέλιξη επιτρέπει την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων EMP σε συμβατικές συγκρούσεις, προσφέροντας τη δυνατότητα επίτευξης στρατηγικών στόχων χωρίς τις εκτεταμένες γεωπολιτικές επιπτώσεις που συνδέονται με τη χρήση πυρηνικών όπλων. Για παράδειγμα, το πρόγραμμα Counter-electronics High-power Microwave Advanced Missile Project (CHAMP) των ΗΠΑ στοχεύει στην ανάπτυξη πυραύλων που μπορούν να εκπέμπουν παλμούς μικροκυμάτων για την εξουδετέρωση ηλεκτρονικών στόχων.

Επιπλέον, η ανάπτυξη μη πυρηνικών EMP έχει σημαντικές επιπτώσεις στη διεθνή διπλωματία και τον έλεγχο των εξοπλισμών. Σε αντίθεση με τα πυρηνικά όπλα, τα μη πυρηνικά EMP δεν υπόκεινται στους ίδιους αυστηρούς διεθνείς ελέγχους, γεγονός που δημιουργεί νέες προκλήσεις για τη διεθνή ασφάλεια και τη διαχείριση κρίσεων.

Συμπερασματικά, η στρατηγική σημασία των EMP στο σύγχρονο στρατιωτικό σχεδιασμό είναι πολυδιάστατη, επηρεάζοντας τόσο τις επιθετικές όσο και τις αμυντικές

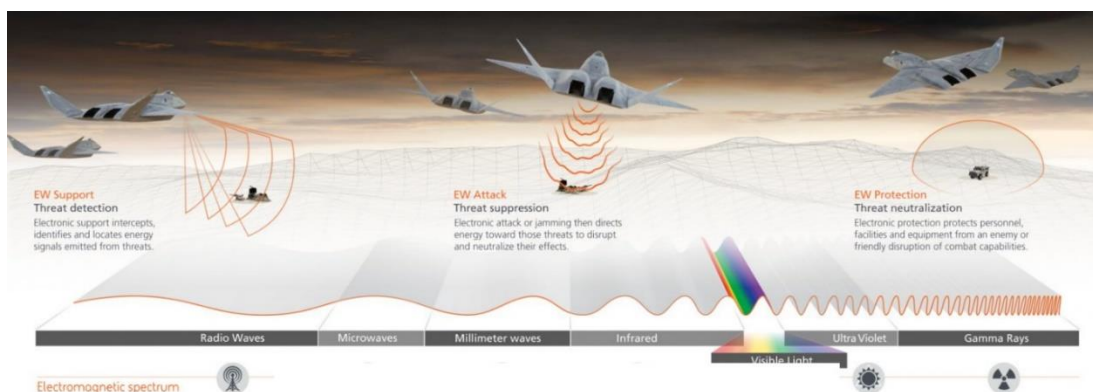
ικανότητες των κρατών. Η συνεχής εξέλιξη αυτών των τεχνολογιών και η ενσωμάτωσή τους στα δόγματα εθνικής ασφάλειας υποδηλώνουν ότι τα EMP θα συνεχίσουν να διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση του μελλοντικού γεωπολιτικού τοπίου και των στρατηγικών ισορροπιών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Η ανάπτυξη και πιθανή χρήση ηλεκτρομαγνητικών όπλων αντιπροσωπεύει μια σημαντική εξέλιξη στη σύγχρονη πολεμική τεχνολογία. Ενώ προσφέρουν νέες στρατηγικές δυνατότητες, εγείρουν επίσης σύνθετα ηθικά, νομικά και στρατηγικά ζητήματα. Η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη, καθώς και η διαμόρφωση κατάλληλων πολιτικών και στρατηγικών αντιμετώπισης, θα είναι κρίσιμες για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτει αυτή η αναδυόμενη τεχνολογία στο μέλλον (Clark et al., 2021; Defensebridge, 2023; Division of Environmental Health - Office of Radiation Protection, 2003; Youvan, 2024).

#### 4.4 Η Συμβολή του Ηλεκτρομαγνητικού Φάσματος στη Σύγχρονη Στρατιωτική Τεχνολογία

Η ανάλυση του Kallberg (2018) αναδεικνύει την κρίσιμη σημασία του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος στο πλαίσιο της σύγχρονης στρατιωτικής τεχνολογίας και στρατηγικής. Η μελέτη αυτή αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα όταν εξετάζεται σε συνάρτηση με την απειλή των ηλεκτρομαγνητικών παλμών, καθώς το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα αποτελεί το μέσο μέσω του οποίου εκδηλώνονται οι EMP.

Αντίθετα με την επικρατούσα αντίληψη που θεωρεί το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ως κατάλοιπο του Ψυχρού Πολέμου, ο Kallberg υποστηρίζει ότι αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για τη λειτουργία των σύγχρονων στρατιωτικών συστημάτων. Η χρήση του φάσματος εκτείνεται από βασικές λειτουργίες όπως η επικοινωνία και η πλοήγηση, έως πιο εξειδικευμένες εφαρμογές όπως η στόχευση και η προστασία από επιθέσεις EMP, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω απεικόνιση:



**Εικόνα 11: Πόλεμος Φάσματος**  
Πηγή: Kallberg, 2018

Η έρευνα υπογραμμίζει την αυξανόμενη εξάρτηση των προηγμένων αμυντικών συστημάτων από το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Αυτή η εξάρτηση αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο των απειλών EMP, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να προκαλέσουν εκτεταμένη διαταραχή ή καταστροφή των ηλεκτρονικών συστημάτων. Η ικανότητα λειτουργίας σε ένα περιβάλλον που έχει υποστεί επίθεση EMP απαιτεί πρόσβαση σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων και την ανάπτυξη ανθεκτικών συστημάτων επικοινωνίας. Είναι επομένως ιδιαίτερα κρίσιμη η πρόσβαση στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα για τη λειτουργικότητα των σύγχρονων οπλικών συστημάτων. Αυτή η παρατήρηση αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα στο πλαίσιο ενός σεναρίου επίθεσης EMP, όπου η αιφνίδια απώλεια ηλεκτρονικών συστημάτων θα μπορούσε να οδηγήσει σε πλήρη αχρήστευση των στρατιωτικών υποδομών.

Η μελέτη εξετάζει κριτικά τις πιέσεις για εμπορευματοποίηση του στρατιωτικού φάσματος, ενώ η διατήρηση επαρκούς φάσματος για στρατιωτική χρήση κρίνεται απαραίτητη όχι μόνο για την καθημερινή λειτουργία, αλλά και για την ανάπτυξη αντιμέτρων και προστατευτικών τεχνολογιών έναντι επιθέσεων EMP. Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα που ελέγχεται από το στρατό μπορεί να λειτουργήσει ως μέσο αποτροπής, παρόμοιο με τους διηπειρωτικούς βαλλιστικούς πυραύλους. Όπως η ύπαρξη πυρηνικών όπλων αποτρέπει άλλες χώρες από το να επιτεθούν, έτσι και η κατοχή προηγμένων ικανοτήτων στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μπορεί να αποτρέψει επιθέσεις.

Στην περίπτωση των ηλεκτρομαγνητικών παλμών, αυτή η λογική επεκτείνεται ως εξής: Εάν μια χώρα έχει την ικανότητα να αντισταθεί σε μια επίθεση EMP και να ανταποδώσει με παρόμοιο τρόπο, αυτό λειτουργεί ως ισχυρό αποτρεπτικό μέσο. Οι πιθανοί εχθροί θα διστάσουν να εξαπολύσουν μια επίθεση EMP, γνωρίζοντας ότι ο στόχος τους μπορεί όχι μόνο να επιβιώσει, αλλά και να ανταποδώσει.

Ο Kallberg τονίζει τη σημασία της ικανότητας των στρατιωτικών δυνάμεων να συνεχίσουν να λειτουργούν ακόμη και όταν το περιβάλλον τους έχει υποστεί σοβαρή ζημιά ή διαταραχή, όπως θα συνέβαινε μετά από μια επίθεση EMP. Για να επιτευχθεί αυτή η ικανότητα, απαιτείται:

- *Εκτεταμένη πρόσβαση στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα:* Οι στρατιωτικές δυνάμεις χρειάζονται ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων για να διατηρήσουν τις επικοινωνίες και τον έλεγχο.
- *Έλεγχος του φάσματος:* Η ικανότητα να διαχειρίζονται και να προστατεύουν αυτές τις συχνότητες από παρεμβολές ή επιθέσεις.

- *Ανθεκτικά συστήματα:* Ανάπτυξη τεχνολογιών επικοινωνίας και ελέγχου που μπορούν να αντέξουν ή να ανακάμψουν γρήγορα από μια επίθεση EMP.

Αυτές οι ικανότητες είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της στρατιωτικής αποτελεσματικότητας σε ένα περιβάλλον όπου οι περισσότερες συμβατικές ηλεκτρονικές συσκευές θα είχαν τεθεί εκτός λειτουργίας. Από όσα αναφέρθηκαν είναι φανερό ότι η πρόσβαση στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα συνδέεται με την προστασία των δημοκρατικών αξιών και της ελευθερίας. Στο πλαίσιο των EMP, αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως η ανάγκη για ισχυρή άμυνα έναντι τέτοιων επιθέσεων, οι οποίες θα μπορούσαν να προκαλέσουν κοινωνική αποσταθεροποίηση (Kallberg, 2018).

#### **4.5 Θεωρήσεις Διεθνούς Δικαίου στο Πλαίσιο του Πολέμου EMP**

Η εξέταση της νομιμότητας του πολέμου των ηλεκτρομαγνητικών παλμών απαιτεί μια πολύπλευρη ανάλυση διαφόρων νομικών πλαισίων του διεθνούς δικαίου. Πρωταρχικής σημασίας είναι η απαγόρευση της «χρήσης βίας» που κατοχυρώνεται στο Άρθρο 2(4) του Χάρτη των Ηνωμένων Εθνών. Αυτή η θεμελιώδης αρχή αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της σύγχρονης διεθνούς έννομης τάξης, στοχεύοντας στη διατήρηση της παγκόσμιας ειρήνης και ασφάλειας.

Ωστόσο, το διεθνές δίκαιο αναγνωρίζει ορισμένες εξαιρέσεις σε αυτόν τον κανόνα. Μία τέτοια εξαίρεση είναι το εγγενές δικαίωμα των κρατών στην αυτοάμυνα έναντι ένοπλης επίθεσης, όπως κατοχυρώνεται στο Άρθρο 51 του Χάρτη των Ηνωμένων Εθνών. Αυτή η διάταξη επιτρέπει στα κράτη να αντιδρούν σε άμεσες απειλές κατά της εδαφικής τους ακεραιότητας ή πολιτικής ανεξαρτησίας.

Επιπλέον, το Άρθρο 39 του Χάρτη παρέχει στο Συμβούλιο Ασφαλείας των Ηνωμένων Εθνών την εξουσία να «προσδιορίζει την ύπαρξη οποιασδήποτε απειλής κατά της ειρήνης, παραβίασης της ειρήνης ή πράξης επιθετικότητας και να προβαίνει σε συστάσεις, ή να αποφασίζει ποια μέτρα θα ληφθούν σύμφωνα με τα Άρθρα 41 και 42, για τη διατήρηση ή αποκατάσταση της διεθνούς ειρήνης και ασφάλειας». Αυτή η διάταξη παρέχει στο Συμβούλιο Ασφαλείας σημαντική διακριτική ευχέρεια στον καθορισμό και την αντιμετώπιση απειλών για την παγκόσμια ειρήνη.

Το Κεφάλαιο VII του Χάρτη των Ηνωμένων Εθνών ενισχύει περαιτέρω την εξουσία του Συμβουλίου Ασφαλείας, επιτρέποντάς του να λαμβάνει δράση σε περιπτώσεις που χαρακτηρίζονται ως «απειλή κατά της ειρήνης» ή «παραβίαση της ειρήνης». Συγκεκριμένα, το Άρθρο 41 εξουσιοδοτεί το Συμβούλιο Ασφαλείας να αποφασίζει «ποια μέτρα που δεν περιλαμβάνουν τη χρήση ένοπλης βίας πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να δοθεί ισχύς στις

αποφάσεις του, και μπορεί να καλέσει τα Μέλη των Ηνωμένων Εθνών να εφαρμόσουν τέτοια μέτρα».

Στο πλαίσιο του πολέμου, η δημιουργία ηλεκτρομαγνητικών παλμών στα πλαίσια μιας έκρηξης μιας πυρηνικής συσκευής θα μπορούσε να θεωρηθεί ένοπλη επίθεση σύμφωνα με το διεθνές δίκαιο, δεδομένου ότι μπορεί να προκαλέσει εκτεταμένη κινητική ζημιά, συμπεριλαμβανομένης της καταστροφής ή της διακοπής των κρίσιμων υποδομών ενός κράτους, και πιθανώς να οδηγήσει σε απώλεια ανθρώπινων ζώων. Επιπρόσθετα, η χρήση πυρηνικών όπλων παραγωγής EMP θα παραβίαζε θεμελιώδεις αρχές του διεθνούς ανθρωπιστικού δικαίου, συμπεριλαμβανομένων των αρχών της αναλογικότητας και της διάκρισης. Αυτές οι αρχές, που κατοχυρώνονται στη Σύμβαση για Ορισμένα Συμβατικά Όπλα και στο δίκαιο των ένοπλων συγκρούσεων, απαιτούν οι στρατιωτικές επιχειρήσεις να διακρίνουν μεταξύ μαχητών και αμάχων και να διασφαλίζουν ότι οποιαδήποτε παράπλευρη ζημιά είναι αναλογική προς το αναμενόμενο στρατιωτικό πλεονέκτημα. Η αδιάκριτη φύση μιας επίθεσης EMP, που επηρεάζει εξίσου στρατιωτικούς και πολιτικούς στόχους, θα παραβίαζε σαφώς αυτές τις αρχές.

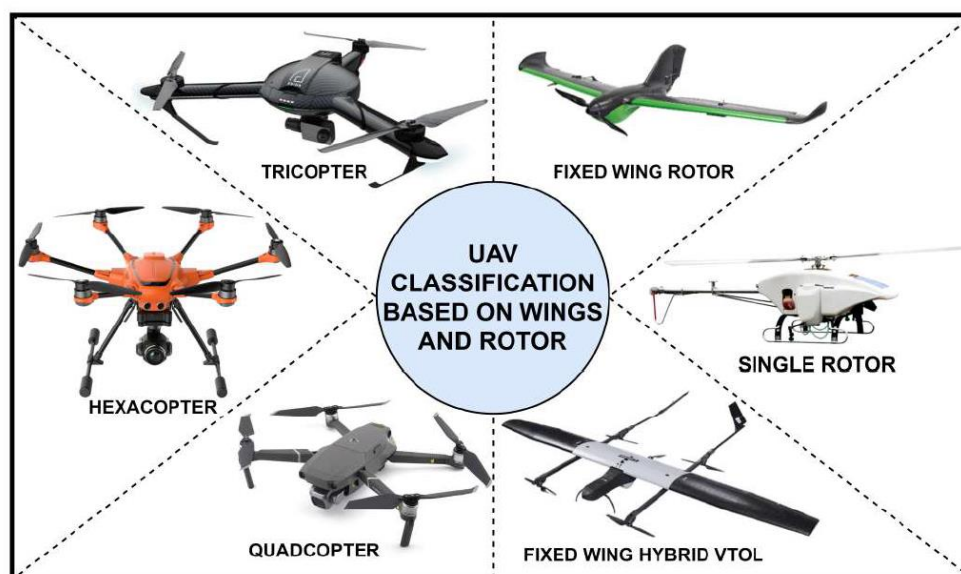
Συμπερασματικά, ενώ το διεθνές δίκαιο προβλέπει ορισμένες εξαιρέσεις στην απαγόρευση της χρήσης βίας, η χρήση ηλεκτρομαγνητικών παλμών από πυρηνικά όπλα θα ήταν πιθανότατα παράνομη λόγω της αδιάκριτης φύσης τους και των δυνητικά καταστροφικών επιπτώσεών τους στις κρίσιμες υποδομές και στον άμαχο πληθυσμό. Αυτό το συμπέρασμα υπογραμμίζει την ανάγκη για συνεχή διεθνή διάλογο και νομική ανάπτυξη για την αντιμετώπιση των προκλήσεων που θέτουν οι αναδυόμενες τεχνολογίες πολέμου στο υπάρχον νομικό πλαίσιο (Malekos Smith, 2023).

## 5. ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΑΕΡΟΣΚΑΦΗ

### 5.1 Ορισμός

Τα μη επανδρωμένα αεροχήματα ή drones όπως έχει επικρατήσει διεθνώς η ορολογία τους, έχουν μετασηματίσει την αεροπορική βιομηχανία, με εφαρμογές όπως η τηλεπισκόπηση, η παρακολούθηση, και η παράδοση δεμάτων. Ο κλάδος αυτός χαρακτηρίζεται από μεγάλη ποικιλομορφία, και η ταξινόμησή αυτών των εναέριων οχημάτων γίνεται με βάση διάφορες παραμέτρους, όπως το βάρος, το ύψος πτήσης, η εμβέλεια, τα πτερύγια, οι έλικες και το πεδίο εφαρμογής τους. Με βάση το βάρος, διακρίνονται σε κατηγορίες από «νάνο» έως «μεγάλα». Ανάλογα με το ύψος πτήσης και την εμβέλεια, κατατάσσονται σε κατηγορίες όπως τα «χειροκίνητα» και τα «υπερηχητικά». Η ταξινόμηση με βάση τα πτερύγια και τους έλικες περιλαμβάνει διάφορους τύπους, όπως τα τύπου «σταθερών πτερυγίων» και τύπου «πολύ-έλικα». Τέλος, ανάλογα με την εφαρμογή, τα UAV χρησιμοποιούνται για προσωπικές, εμπορικές, κυβερνητικές και στρατιωτικές χρήσεις (Chamola et al., 2020).

Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται μια κατηγοριοποίηση βάσει των φτερών και των ελίκων τους:



Εικόνα 12: Κατηγοριοποίηση μη επανδρωμένων αεροσκαφών  
Πηγή: Chamola et al., 2020

### 5.2 Βασικές Απαιτήσεις Αντίμετρων

Τα συστήματα αντιμετώπισης μη επανδρωμένων αεροσκαφών διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τα συστήματα άμεσης καταστροφής και τα συστήματα έμμεσης εξουδετέρωσης. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει μεθόδους που στοχεύουν στην φυσική καταστροφή του drone, όπως η χρήση βλημάτων, διχτυών, λέιζερ ή ακόμα και εκπαιδευμένων πτηνών. Αν και

αποτελεσματικές, αυτές οι μέθοδοι ενέχουν τον κίνδυνο πρόκλησης ανεπιθύμητων ζημιών στο περιβάλλον. Αντίθετα, τα συστήματα έμμεσης εξουδετέρωσης βασίζονται σε ηλεκτρονικές μεθόδους παρεμβολής ή παραπλάνησης των συστημάτων επικοινωνίας του. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν τον έλεγχο ή την απομάκρυνσή του χωρίς να προκαλούν φυσική ζημιά, αλλά απαιτούν εξειδικευμένη γνώση και προσαρμογή για τους διάφορους τύπους των UAV (Rozenbeek, 2020).

Μετά την απελευθέρωση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών για μη στρατιωτικές χρήσεις, η χρήση τους στον γενικό πληθυσμό αυξάνεται σταδιακά. Είναι αυτονόητο ότι είναι ανέφικτο να κατασκευαστεί ένα αντιαεροπορικό σύστημα έμμεσης εξουδετέρωσης για κάθε ιδιωτική ή δημόσια χρήση του, λόγω του κόστους εγκατάστασης και των λειτουργικών εξόδων, καθώς και των πολλών και διαφόρων ρυθμιστικών περιορισμών (Belouson et al., 2022; Park et al., 2021).

Ταυτόχρονα όμως, η ραγδαία ανάπτυξη της εν λόγω βιομηχανίας έχει αυξήσει την αμελή, μη εξουσιοδοτημένη και παράνομη χρήση τους, προκαλώντας σημαντικές κοινωνικές και οικονομικές ζημιές. Από διάφορα σημαντικά περιστατικά που συνέβησαν σε διάφορες χώρες, ανέκυψαν τα βασικά χαρακτηριστικά για τα αναδυόμενα Anti-UAV / Anti-Drone ή Counter-UAS<sup>3</sup> / Counter-Drone συστήματα ή ελληνιστί αντίμετρα κατά των μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Τα περιστατικά αφορούν παράνομες πτήσεις σε αεροδρόμια, επιθέσεις σε δημόσιους οργανισμούς και επιθέσεις σε συγκεκριμένα άτομα, αναδεικνύοντας την επιτακτική ανάγκη για την ανάπτυξη συστημάτων αντιμετώπισής τους, τα οποία θα πρέπει να μπορούν να ανιχνεύουν, να αναγνωρίζουν και να εξουδετερώνουν τα μη εξουσιοδοτημένα αυτόνομα αεροσκάφη σε διάφορες θέσεις και είδη τοποθεσιών. Τα συστήματα αυτά θα πρέπει να είναι προσαρμόσιμα, αποτελεσματικά και να μην χρησιμοποιούν στρατιωτικού τύπου όπλα (Park et al., 2021).

Οι βασικές απαιτήσεις για τα γενικά αντίμετρα εναντίων των μη επανδρωμένων αεροσκαφών συνοψίζονται στα εξής (Kim et al., 2022; Park et al., 2021):

- Εξειδικευμένη ανίχνευση, καθώς τα υπάρχοντα συστήματα ασφαλείας δεν διαθέτουν επαρκή απόδοση για την αναγνώριση πολλών από αυτά.
- Σχεδιασμό της άμυνας έναντι πολλαπλών επιθέσεων, καθώς αναμένεται η αύξηση του πλήθους των ιπτάμενων αντικειμένων στα επόμενα χρόνια, γεγονός που θα δημιουργήσει την ανάγκη ταυτόχρονης ανίχνευσης και αντιμετώπισης μεγάλου πλήθους απειλών.

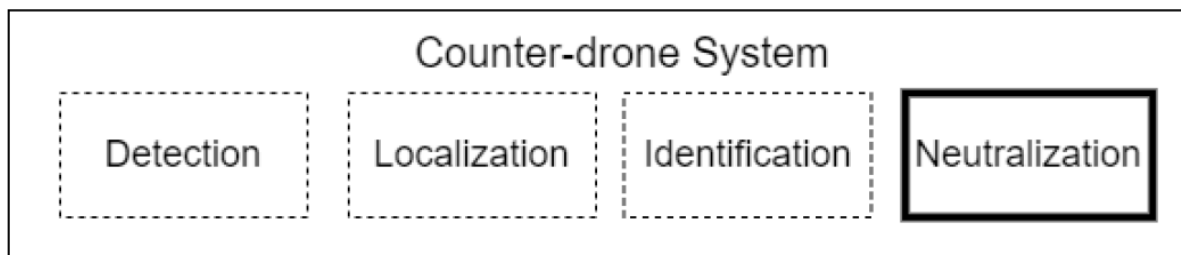
---

<sup>3</sup> Counter - Unmanned Aerial Vehicle



- Συνεργασία εθνικών με δημόσιους φορείς ασφαλείας για την εξουδετέρωση των απειλών και την κατάσχεση του σχετικού υλικού.
- Φορητότητα του συστήματος για την άμεση ανταπόκριση σε διαφορετικές τοποθεσίες.
- Εξουδετέρωση χωρίς στρατιωτικά μέσα, δεδομένου ότι τα υπάρχοντα στρατιωτικά μέσα είναι δαπανηρά και υπόκεινται σε αυστηρούς κανονισμούς.

Ο εντοπισμός, η αναγνώριση και ο προσδιορισμός της θέσης είναι απαραίτητα στοιχεία για την εξουδετέρωσή τους. Ένα πετυχημένο σύστημα θα πρέπει να μεριμνά και για τις τέσσερις αυτές διαστάσεις:



*Εικόνα 13: Βασικά στοιχεία ενός anti-UAV συστήματος*  
 Πηγή: Rozenbeek, 2020

### 5.3 Συστήματα Παρακολούθησης

Η ανίχνευση των UAV αξιοποιεί χαρακτηριστικά όπως η εκπομπή ήχου, θερμότητας, και ραδιοσυχνοτήτων. Για την ανίχνευση της θερμότητας που εκπέμπουν τα εναέρια αυτά οχήματα χρησιμοποιούνται θερμικές κάμερες. Παρότι αυτές είναι ανθεκτικές στις καιρικές συνθήκες και έχουν χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τα συστήματα ραντάρ, η μικρή εμβέλειά τους αποτελεί έναν σημαντικό περιοριστικό παράγοντα στην ευρεία και καθολική υιοθέτησή τους. Οι οπτικοί αισθητήρες / κάμερες συλλέγουν φως σε διάφορα μήκη κύματος για την ανίχνευσή τους τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας, με πρόσφατες βελτιώσεις στην ανάλυση και στην επεξεργαστική ισχύ μέσω της τεχνητής νοημοσύνης. Ωστόσο, έχουν περιορισμούς σε συνθήκες χαμηλού φωτισμού ή ομίχλης, έχουν περιορισμένη εμβέλεια και είναι ευαίσθητες στις καιρικές συνθήκες. Οι ακουστικοί αισθητήρες / μικρόφωνα ανιχνεύουν τον ήχο των drones και προσδιορίζουν την κατεύθυνσή τους. Λειτουργούν καλά σε μικρές αποστάσεις, ακόμη και χωρίς οπτική επαφή, αλλά παρουσιάζουν δυσκολίες σε θορυβώδη περιβάλλοντα.

Από την άλλη οι σαρωτές ραδιοσυχνοτήτων ανιχνεύουν τα UAV μέσω της ανάλυσης των ασύρματων σημάτων, χρησιμοποιώντας κεραιές και επεξεργαστές για την ανίχνευση των επικοινωνιών μεταξύ του μη επανδρωμένου οχήματος και του χειριστή του. Παρά την αποδεκτή ακρίβεια που παρουσιάζουν, εμπεριέχουν δυσκολίες στον εντοπισμό εκείνων των

drones που δεν εκπέμπουν συνεχώς RF σήματα ή χρησιμοποιούν άγνωστα πρωτόκολλα. Ενώ, χρησιμοποιούνται, ευρέως λόγω της μεγάλης εμβέλειας, του χαμηλού κόστους τους και της ικανότητας τριγωνισμού της θέσης του «υπό παρακολούθηση» αντικειμένου, παρουσιάζουν περιορισμούς σε περιοχές με έντονη ραδιοφωνική συμφόρηση και σε περιοχές που καλύπτονται από 5G δίκτυα.

Η ανίχνευση με ραντάρ βασίζεται στην ανάλυση των ανακλώμενων ραδιοσημάτων για τον προσδιορισμό του σχήματος, της απόστασης, της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του drone. Τα ραντάρ προσφέρουν ακριβείς μετρήσεις, χρησιμοποιώντας κυρίως τις ζώνες Ka, K και Ku<sup>4</sup> για επιτήρηση και παρακολούθηση, ενώ σιγά-σιγά, στις μέρες μας, αυτές οι ζώνες αντικαθίστανται από τις X και S. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι ενώ τα ραντάρ προσφέρουν μεγαλύτερη εμβέλεια και σταθερότητα στην παρακολούθηση, αντιμετωπίζουν ρυθμιστικούς περιορισμούς εξαιτίας της απαίτησης για άδειες μετάδοσης, δεν ξεχωρίζουν τα drones που απλώς αιωρούνται σε σχέση με εκείνα που κινούνται αργά, και πολλά από αυτά δεν διακρίνουν τα UAV σε σχέση με τα πουλιά (Park et al., 2021; Robin Radar Systems, 2024).

Για να επιτευχθεί μια αποτελεσματική ανίχνευση, προτείνεται ο συνδυασμός πολλαπλών τεχνολογιών σε ένα υβριδικό σύστημα που να καλύπτει τις ανάγκες ασφάλειας της προστατευόμενης περιοχής. Για παράδειγμα, οι σαρωτές RF είναι κατάλληλοι για μεγάλες περιοχές, ενώ για ευαίσθητα σημεία όπως αεροδιαδρόμους ή πυρηνικές εγκαταστάσεις, είναι απαραίτητη η χρήση επιπλέον τεχνολογιών όπως ραντάρ, οπτικές κάμερες και ακουστικά συστήματα. Τα υβριδικά συστήματα ανίχνευσης των UAV συνδυάζουν πολλαπλές τεχνολογίες για να υπερβούν τα κενά που προκύπτουν από τη χρήση μίας μόνο μεθόδου ανίχνευσης. Τα πιο διαδεδομένα σχήματα περιλαμβάνουν τη συνδυασμένη χρήση ραντάρ με οπτικές ή θερμικές κάμερες, πολλαπλούς σαρωτές RF για τον εντοπισμό της θέσης και τη σύνθεση οπτικών και ακουστικών αισθητήρων για την ενίσχυση της ακρίβειας ανίχνευσης. Ο συνδυασμός αυτών των τεχνολογιών ενισχύει την ακρίβεια, την ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες και τη λειτουργικότητα. Η ταυτοποίηση των UAV είναι κρίσιμης σημασίας ζήτημα για την αποτροπή λανθασμένων εξουδετερώσεων (Park et al., 2021).

---

<sup>4</sup> Οι ζώνες Ka, K και Ku είναι διαφορετικά ραδιοφωνικά φάσματα που χρησιμοποιούνται από τα ραντάρ. Πιο συγκεκριμένα:

- Ζώνη Ka: Συχνότητες από 26.5 GHz έως 40 GHz. Έχει πολύ μικρό μήκος κύματος.
- Ζώνη K: Συχνότητες από 18 GHz έως 27 GHz. Επίσης πολύ μικρό μήκος κύματος.
- Ζώνη Ku: Συχνότητες από 12 GHz έως 18 GHz. Μικρότερο μήκος κύματος σε σχέση με άλλες ζώνες.

Αυτές οι ζώνες υψηλών συχνοτήτων χρησιμοποιούνται κυρίως σε παλαιότερα αεροπορικά ραντάρ. Σήμερα, είναι πιο συνηθισμένη η χρήση άλλων ζωνών συχνοτήτων, όπως η ζώνη X (8-12 GHz) και η ζώνη S (2-4 GHz), για εναέριες εφαρμογές ραντάρ.

Τα ραντάρ στις ζώνες Ka, K και Ku έχουν πλεονεκτήματα όπως μικρότερο μέγεθος και βάρος, αλλά μειονεκτήματα όπως μεγαλύτερη εξασθένιση από τις καιρικές συνθήκες.

## 5.4 Συστήματα Αντιμετώπισης των μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων

Η εξουδετέρωση των drones περιλαμβάνει μεθόδους καταστροφής και μη καταστροφής, με έμφαση στις μη καταστροφικές λόγω των διαφόρων ρυθμιστικών περιορισμών. Οι μέθοδοι "hijacking" και "spoofing" ξεχωρίζουν, με το hijacking να επικεντρώνεται στην ανάληψη του ελέγχου του drone από τον αμυντικό χειριστή, ενώ το spoofing παραπλανά τα συστήματα του drone, παραποιώντας κυρίως τις συντεταγμένες του, προκειμένου να μπορούν οι αρμόδιοι να ελέγξουν τη θέση του (Park et al., 2021; Robin Radar Systems, 2024).

Η τεχνολογία γεωπερίφραξης (geofencing) αποτρέπει τα UAVs από το να προσεγγίσουν συγκεκριμένες περιοχές, με την πιο διαδεδομένη μέθοδο να είναι η αυτοματοποιημένη απόφαση του ίδιου του drone να προσγειωθεί όταν εισέλθει σε απαγορευμένη ζώνη. Υπάρχουν δύο τύποι γεωπερίφραξης: η δυναμική, που ενημερώνει το εναέριο όχημα για τις απαγορευμένες περιοχές σε πραγματικό χρόνο, και η στατική, που βασίζεται σε αποθηκευμένες πληροφορίες για τις ζώνες πτήσης. Η γεωπερίφραξη είναι αποτελεσματική για τα εμπορικά drones, αλλά λιγότερο ικανοποιητική για τα τροποποιημένα που έχουν απενεργοποιήσει τις αυτόματες λειτουργίες προσγείωσης (Park et al., 2021).

Η παρεμβολή (jamming) επικεντρώνεται στην παρεμπόδιση της επικοινωνίας μεταξύ του UAV και του χειριστή του μέσω ισχυρών ραδιοσυχνοτήτων, οδηγώντας το μη επανδρωμένο όχημα σε διάφορα πιθανά σενάρια, όπως ελεγχόμενη προσγείωση ή τυχαία πτώση. Οι τεχνολογίες παρεμβολής διακρίνονται σε κατευθυντικές και παγκατευθυντικές, σταθερές και κινητές, στενής και ευρείας ζώνης, και μπορούν να στοχεύουν είτε στο GPS (Global Positioning System) σύστημα του οχήματος είτε στα συστήματα επικοινωνίας του. Παρά την απλότητά της, η παρεμβολή μπορεί να επηρεάσει άλλες κρίσιμες επικοινωνίες, γι' αυτό και πολλές χώρες απαγορεύουν τη χρήση της, πέραν των στρατιωτικών εφαρμογών. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι ενώ αποτελούν μια μεσαίου κόστους λύση, μπορεί να προκαλέσουν απρόβλεπτες αντιδράσεις στο μη επανδρωμένο εναέριο όχημα (Park et al., 2021; Robin Radar Systems, 2024).

Τα "killer drones" είναι drones που έχουν σχεδιαστεί για να καταστρέφουν άλλα drones μέσω φυσικής επίθεσης. Αυτή η τεχνολογία βρίσκεται σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης και απαιτεί εξελιγμένα συστήματα ανίχνευσης και πτήσης. Παρά τους κανονιστικούς περιορισμούς, τα "killer drones" θα μπορούσαν να προσφέρουν λύσεις σε σύνθετες επιθέσεις στο μέλλον, ειδικά όταν αναπτυχθούν κατάλληλες πολιτικές και τεχνολογίες (Park et al., 2021).

Οι συσκευές μικροκυμάτων υψηλής ισχύος (HPM: High Power Microwave) δημιουργούν EMP ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς που διαταράσσουν ή καταστρέφουν τα

ηλεκτρονικά κυκλώματά τους. Παρόλο που είναι αποτελεσματικές, είναι δαπανηρές και μπορεί να προκαλέσουν παράπλευρες ζημιές. Τα laser υψηλής ενέργειας καταστρέφουν τη δομή ή τα ηλεκτρονικά του UAV μέσω μιας εξαιρετικά συγκεντρωμένης δέσμης φωτός. Αν και είναι μια πειραματική τεχνολογία, προσφέρει μια λύση με χαμηλό κόστος ανά καταστροφή, αλλά ενέχει τον κίνδυνο των παράπλευρων απωλειών. Τα συστήματα κυβερνοκατάληψης (Cyber Takeover Systems) αποτελούν μια νέα τεχνολογία που επιτρέπει την ανάληψη του ελέγχου των drones μέσω κυβερνοεπιθέσεων. Ενώ πλήττουν τους στόχους τους με μεγάλη ακρίβεια, η αποτελεσματικότητά τους περιορίζεται από την ανάγκη ενημερωμένων βιβλιοθηκών για τη διεξαγωγή της κυβερνοεπίθεσης (Robin Radar Systems, 2024).

Η σύλληψή τους βασίζεται τις περισσότερες φορές στη φυσική παγίδευση μέσω διαφόρων εργαλείων, κυρίως, όμως με τη βοήθεια δικτύων. Τα εργαλεία αυτά διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τα επίγεια, που είναι φορητά ή τοποθετημένα σε οχήματα, και τα εναέρια, που εγκαθίστανται σε drones και προσφέρουν μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά περιορίζονται από το βάρος τους. Οι επίγειες λύσεις είναι πιο οικονομικές και ευέλικτες, ενώ οι εναέρια απαιτούν προηγμένα συστήματα ανίχνευσης και ιχνηλάτησης. Η επιτυχής εξουδετέρωση των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων απαιτεί τον συνδυασμό πολλαπλών τεχνολογιών και τη συνδυαστική ανάπτυξη διαφόρων τεχνικών αντιμέτρων (Kim et al., 2022; Park et al., 2021; Robin Radar Systems, 2024).

## **5.5 Κατηγοριοποίηση & Προτεινόμενες Τοποθεσίες των Anti-UAV Συστημάτων**

Τα αντί-drone συστήματα εγκαθίστανται κυρίως σε αεροδρόμια και φυλακές. Σε αεροδρόμια όπως το Gatwick και το Muscat, έχουν τοποθετηθεί στρατιωτικής τεχνολογίας συστήματα για την προστασία από μη εξουσιοδοτημένα UAVs. Σε άλλες εγκαταστάσεις, όπως φυλακές και στάδια, χρησιμοποιούνται ανιχνευτικά συστήματα για την αποτροπή παράνομων δραστηριοτήτων.

Γενικά, τα συστήματα αυτά εγκαθίστανται κυρίως σε περιοχές όπου αναμένονται απειλές, όπως το λαθρεμπόριο ή η τρομοκρατία. Η υψηλή κινητικότητά τους απαιτεί ευρεία κλίμακα εγκαταστάσεων για την επιτυχημένη αποτροπή των περιστατικών. Ωστόσο, τα περισσότερα υπάρχοντα συστήματα είναι στρατιωτικού επιπέδου και εγκαθίστανται σε σημαντικές εγκαταστάσεις, καθιστώντας άλλους χώρους ευάλωτους σε επιθέσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα από αυτά περιορίζονται στην ανίχνευση και ειδοποίηση, με την ταυτοποίηση και εξουδετέρωση να πραγματοποιείται τελικά από το ανθρώπινο δυναμικό.

Η αυτοματοποίηση και η ενσωμάτωση και αυτών των σταδίων στην επιχείρηση θα βελτιώνει σημαντικά την αποτελεσματικότητά των αντίμετρων.

Η προτεραιοποίηση των περιοχών προστασίας, βασίζεται στη χρήση τους καθώς και στη διαβάθμιση των κινδύνων που ενέχουν οι τυχόν επιθέσεις σε αυτές, με έμφαση στην προστασία των πολιτών και των περιουσιακών στοιχείων. Στα αεροδρόμια, για παράδειγμα, η ανίχνευση θα πρέπει να επικεντρώνεται σε περιοχές όπως οι διάδρομοι απογείωσης και προσγείωσης, όπου μια επίθεση θα μπορούσε να προκαλέσει σοβαρά ατυχήματα.

Η προτεινόμενη κατηγοριοποίηση των περιοχών ανίχνευσης μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων χωρίζεται με βάση τον κίνδυνο και τη σημασία τους, σε τέσσερις κατηγορίες. Η Κατηγορία I αφορά περιοχές με υψηλή προτεραιότητα προστασίας, όπως ζώνες προσγείωσης και απογείωσης αεροσκαφών. Η Κατηγορία II περιλαμβάνει πυκνοκατοικημένες περιοχές και εγκαταστάσεις ασφαλείας, ενώ η Κατηγορία III αναφέρεται σε περιοχές που επηρεάζουν τη λειτουργία του αεροδρομίου και την εναέρια κυκλοφορία σε περίπτωση επίθεσης. Η Κατηγορία IV καλύπτει περιοχές προστατευμένες από μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα καθώς και τα περιμετρικά όρια των αεροδρομίων.

Η εγκατάσταση εξοπλισμού ανίχνευσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη το περιβάλλον των ραδιοκυμάτων, τα νομικά πλαίσια λειτουργίας, και τις φυσικές συνθήκες της περιοχής. Η αλληλεπίδραση με άλλα συστήματα, όπως τα ραντάρ και τα δίκτυα 5G, πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά για να διασφαλιστεί η βέλτιστη απόδοση. Μελλοντικές εξελίξεις περιλαμβάνουν την ανάπτυξη αυτόνομων αλγορίθμων για την επιλογή και τοποθέτηση εξοπλισμού ανίχνευσης, βελτιστοποιώντας την ασφάλεια εντός του διαθέσιμου προϋπολογισμού.

Η ταξινόμηση προτεραιότητας του εναέριου χώρου βασίζεται στους κανονισμούς του Διεθνούς Οργανισμού Πολιτικής Αεροπορίας (ICAO: International Civil Aviation Organization) και αποσκοπεί στην προστασία του εθνικού εναέριου χώρου από απειλές τέτοιου είδους. Οι περιοχές υψηλής προτεραιότητας περιλαμβάνουν πολυσύχναστα αεροδρόμια (Κατηγορία I) και ζώνες πτήσεων αεροσκαφών (Κατηγορία II). Η Κατηγορία III αφορά περιοχές με αυξημένο κίνδυνο ατυχημάτων, ενώ η Κατηγορία IV καλύπτει περιοχές όπου απαιτείται προληπτική παρακολούθηση.

Η αξιολόγηση του επιπέδου απειλής ενός UAV πραγματοποιείται μέσω ενός μαθηματικού μοντέλου που συνυπολογίζει τη φυσική απειλή, την πορεία πτήσης και τον διαθέσιμο χρόνο αντίδρασης. Η φυσική απειλή καθορίζεται από χαρακτηριστικά όπως η μάζα και η ταχύτητά του, ενώ η πορεία πτήσης αξιολογείται ανάλογα με την εγγύτητά του σε περιοχές υψηλής προτεραιότητας. Το σύστημα προτείνει να εφαρμόζονται αυστηρότερα μέτρα ασφαλείας σε περιπτώσεις όπου ο κίνδυνος αυξάνεται, όπως σε κρίσιμες εγκαταστάσεις ή

αεροδρόμια. Η ακριβής εκτίμηση των παραμέτρων αυτών είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική αντιμετώπιση απειλών και την αποτροπή πιθανών επιθέσεων (Park et al., 2021).

## **6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ EMP ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΕ ANTI-UAV ΛΥΣΕΙΣ**

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη αποτελούν πλέον αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης τεχνολογικής πραγματικότητας, λειτουργώντας είτε μέσω απομακρυσμένου ελέγχου είτε μέσω προκαθορισμένων αλγορίθμων πλοήγησης. Τα UAVs προσφέρουν πληθώρα πλεονεκτημάτων, συμπεριλαμβανομένων του μικρού μεγέθους, του χαμηλού κόστους λειτουργίας, της ευκολίας στη χρήση και της υψηλής κινητικότητας. Αυτά τα χαρακτηριστικά έχουν οδηγήσει στην ευρεία υιοθέτησή τους σε διάφορους τομείς, όπως οι τηλεπικοινωνίες, η αεροφωτογράφιση, η εφοδιαστική αλυσίδα, η γεωργία ακριβείας, η διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας, η διαχείριση των φυσικών καταστροφών, η περιβαλλοντική παρακολούθηση και η ανίχνευση των πυρκαγιών (Kim et al., 2022; Telli et al., 2023).

Ωστόσο, η ραγδαία εξέλιξη και η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των συστημάτων UAV συνοδεύεται από αυξημένη ευαισθησία σε πολύπλοκα ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα. Ιδιαίτερα κρίσιμη είναι η αντιμετώπιση ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI: ElectroMagnetic Interference), οι οποίες συνιστούν σημαντική απειλή για την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία τους. Σε περιβάλλοντα με υψηλά επίπεδα EMI, η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια δύναται να διεισδύσει στα εσωτερικά συστήματα των UAVs μέσω ποικίλων μηχανισμών σύζευξης, επηρεάζοντας δυσμενώς κρίσιμες λειτουργίες όπως η επικοινωνία και ο έλεγχος πτήσης. Σε ακραίες περιπτώσεις, οι επιπτώσεις μπορεί να είναι καταστροφικές, οδηγώντας ακόμη και σε ανεξέλεγκτες πτώσεις (Belouson et al., 2022).

Παράλληλα, η αυξανόμενη παράνομη χρήση των μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε δραστηριότητες όπως η τρομοκρατία, η κατασκοπεία και η παραβίαση της ιδιωτικότητας έχει εντείνει την ανάγκη για αποτελεσματικές μεθόδους αντιμετώπισής τους. Μεταξύ των διαφόρων προτεινόμενων στρατηγικών, η εφαρμογή σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής (IEMI: Intentional Electromagnetic Interference) με έμφαση στα αισθητήρια συστήματά τους, έχει αναδειχθεί ως μία από τις πλέον υποσχόμενες μεθόδους καταστολής των μη «φιλικών» drones. Το φαινόμενο IEMI χαρακτηρίζεται από την εσκεμμένη παραγωγή και εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας με σκοπό τη διαταραχή ή την καταστροφή των ηλεκτρονικών συστημάτων (Kim et al., 2022).

Η διερεύνηση των επιπτώσεων των ηλεκτρομαγνητικών παλμών στα UAVs αποτελεί ζήτημα αυξανόμενης σημασίας, δεδομένης της εκτεταμένης χρήσης τους για εμπορικούς

σκοπούς και της δυνητικής απειλής που συνιστά ο EMP για τις μηχανοτρονικές συσκευές<sup>5</sup> (Ibeobi & Pan, 2021). Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος στο οποίο επιχειρούν τα UAVs, έχει καταστήσει επιτακτική την ανάγκη για εμπεριστατωμένη μελέτη των ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων και τον σχεδιασμό αποτελεσματικής ηλεκτρομαγνητικής προστασίας (Zhang et al., 2024).

Η ενδελεχής μελέτη των επιπτώσεων των ισχυρών EMI σε αυτού του τύπου τα οχήματα κρίνεται ως καθοριστικής σημασίας για τη διασφάλιση της ασφαλούς πτητικής λειτουργίας τους. Παρά την εκτενή έρευνα που έχει διεξαχθεί σχετικά με τον αντίκτυπο των EMI στα UAVs, παραμένει η ανάγκη για μια ολοκληρωμένη και συστηματική ανασκόπηση αυτού του ερευνητικού πεδίου. Η συνθετική ανάλυση και ενοποίηση των υφιστάμενων ερευνητικών ευρημάτων κρίνεται απαραίτητη για την πληρέστερη κατανόηση των επιπτώσεων διαφορετικών τύπων EMI στα UAVs (Zhang, et al., 2024).

## **6.1 Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή**

Η σταθερή πτήση και ο ακριβής έλεγχος ενός drone εξαρτώνται από τη συντονισμένη λειτουργία πολλαπλών αισθητήρων, τόσο εσωτερικών όσο και εξωτερικών. Συνεπώς, η διατάραξη της λειτουργίας ακόμη και ενός υποσυνόλου αυτών των αισθητήρων μέσω εξωτερικών παρεμβολών μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρή δυσλειτουργία του συνολικού συστήματος. Οι διάφορες ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται στην ανάλυση των χαρακτηριστικών απόκρισης των διαφόρων αισθητήρων σε σήματα παρεμβολής, διεξάγοντας πειράματα σε ποικίλα ελεγχόμενα περιβάλλοντα.

Το φάσμα των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που δύνανται να επηρεάσουν τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα είναι εξαιρετικά ευρύ, εκτεινόμενο από φυσικά φαινόμενα όπως οι κερανοί έως τεχνητά δημιουργούμενους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς μεγάλου ύψους (HEMPs) που προκαλούνται από πυρηνικές εκρήξεις. Η ραγδαία τεχνολογική πρόοδος και η αυξανόμενη προσβασιμότητα σε προηγμένες ηλεκτρονικές συσκευές έχουν καταστήσει τη σκόπιμη ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή ένα ολοένα και πιο συχνό φαινόμενο, με στόχο την κακόβουλη διατάραξη των ηλεκτρονικών συστημάτων.

Οι πρωτοπόρες έρευνες στον τομέα της σκόπιμης ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής εστίαζαν κυρίως στη χρήση ηλεκτρομαγνητικών σημάτων πολύ υψηλής ισχύος. Η αρχική κατηγοριοποίηση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών βασιζόταν σε παραμέτρους όπως το

---

<sup>5</sup> Πρόκειται για συσκευές που συνδυάζουν μηχανικά, ηλεκτρονικά, πληροφορικά και ελεγκτικά συστήματα για την εκτέλεση πολύπλοκων λειτουργιών. Χρησιμοποιούν αισθητήρες, ενεργοποιητές και μικροεπεξεργαστές για να αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον τους και να προσαρμόζονται σε αυτό.



εύρος συχνοτήτων, οι υποκείμενες τεχνολογίες παραγωγής και οι παρατηρούμενες επιπτώσεις στους στόχους. Ωστόσο, η σύγχρονη ερευνητική προσέγγιση έχει μετατοπιστεί προς την αναζήτηση μεθόδων για την αποδοτικότερη κατανομή περιορισμένης ισχύος με στόχο την επίτευξη βέλτιστων αποτελεσμάτων παρεμβολής (Kim et al., 2022).

Στο πλαίσιο της μελέτης τους οι Kim et al. (2022), πρότειναν μια νέα ταξινόμηση της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Υψηλής Ισχύος IEMI (High-power IEMI)
2. Χαμηλής Ισχύος IEMI (Low-power IEMI)
3. Μη Ραδιοσυχνοτική Παρεμβολή (Non-RF Interference)

Παρακάτω αναλύονται οι διάφορες μορφές IEMI, παρέχοντας μια εμπειρισταωμένη επισκόπηση των χαρακτηριστικών και επιπτώσεών τους (Kim et al., 2022):

- **Υψηλής Ισχύος IEMI (High-power IEMI)**

Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών σημάτων υψηλής ισχύος, ικανών να προκαλέσουν σημαντική υποβάθμιση ή ολική καταστροφή των ηλεκτρονικών συσκευών. Παρόλο που δεν υφίσταται ένα καθολικά αποδεκτό κατώφλι ισχύος για τον χαρακτηρισμό ενός σήματος ως υψηλής ισχύος, η επιστημονική κοινότητα συγκλίνει στο ότι εντάσεις πεδίου που υπερβαίνουν τα 100 V/m στην περιοχή του στόχου εμπίπτουν σε αυτή την κατηγορία. Τα σήματα αυτά δύνανται να επιφέρουν εκτεταμένες επιπτώσεις σε ένα ευρύ φάσμα ηλεκτρονικών συστημάτων, ανεξαρτήτως του εσωτερικού μηχανισμού λειτουργίας τους.

- **Χαμηλής Ισχύος IEMI (Low-power IEMI)**

Αυτή η κατηγορία εστιάζει στην αξιοποίηση σημάτων χαμηλότερης ισχύος, τα οποία στοχεύουν στην πρόκληση δυσλειτουργίας συγκεκριμένων συστημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του τρόπου λειτουργίας τους. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη μείωση της απαιτούμενης ισχύος, καθιστώντας την παρεμβολή πιο αποδοτική και δυσκολότερα ανιχνεύσιμη. Κύριοι στόχοι αυτής της κατηγορίας αποτελούν οι αισθητήρες και οι επικοινωνιακές μονάδες μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Για παράδειγμα, οι αναλογικοί αισθητήρες, οι οποίοι λειτουργούν με σήματα χαμηλής τάσης, είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι σε παρεμβολές ακόμη και με μικρή ποσότητα ενέργειας, εφόσον εφαρμοστούν κατάλληλες μέθοδοι σύζευξης.

- **Μη Ραδιοσυχνοτική Παρεμβολή (Non-RF Interference)**

Πέραν των ραδιοσυχνοτήτων, άλλες μορφές σημάτων, όπως ακουστικά ή οπτικά, δύνανται να χρησιμοποιηθούν για την παρεμβολή των ηλεκτρονικών συστημάτων. Οι

μέθοδοι αυτές στοχεύουν σε συγκεκριμένα μηχανικά στοιχεία ή λειτουργικούς μηχανισμούς των αισθητήρων. Παρόλο που χαρακτηρίζονται από περιορισμένη ευελιξία, μπορούν να αποδειχθούν εξαιρετικά αποτελεσματικές υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Για παράδειγμα, ακουστικά σήματα υψηλής έντασης μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία των αισθητήρων των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (MEMs: Micro-Electro-Mechanical Systems), ενώ έντονα φωτεινά σήματα μπορούν να παρεμποδίσουν τους οπτικούς αισθητήρες ή τις κάμερες.

## 6.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η υψηλής ισχύος IEMI μπορεί να υλοποιηθεί είτε μέσω παλμικών κυμάτων (PW: Pulsed Wave) είτε μέσω συνεχών (CW: Continuous Wave), με τα παλμικά σήματα να είναι συνήθως πιο αποτελεσματικά λόγω του ευρύτερου φάσματος συχνοτήτων που καλύπτουν. Ωστόσο, η κατασκευή συστημάτων παραγωγής παλμικών σημάτων υψηλής ισχύος παρουσιάζει σημαντικές τεχνικές προκλήσεις. Εκτενείς ερευνητικές μελέτες έχουν καταδείξει την αποτελεσματικότητα και των δύο τύπων σημάτων ως πηγών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την ανάπτυξη εξειδικευμένων εγκαταστάσεων δοκιμών που περιλαμβάνουν πολλαπλές πηγές μικροκυμάτων σε διάφορες ζώνες συχνοτήτων.

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι επιπτώσεις της παρεμβολής είναι εντονότερες σε χαμηλότερες συχνότητες, με σοβαρές ζημιές σε ηλεκτρονικά συστήματα να παρατηρούνται σε εντάσεις πεδίου από 15 έως 25 kV/m. Αυτό υποδηλώνει ότι τα συστήματα που λειτουργούν σε χαμηλότερες συχνότητες ενδέχεται να είναι πιο ευάλωτα σε υψηλής ισχύος IEMI, γεγονός που έχει σημαντικές επιπτώσεις στον σχεδιασμό μέτρων προστασίας.

Στη μελέτη των Sakharov κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Kim κ.ά., 2022), διερευνήθηκε η επίδραση παλμών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υπερ-ευρείας ζώνης (UWB EMP: Ultra-WideBand Electromagnetic Pulses) ηλεκτρομαγνητικού παλμού σε ένα εμπορικό drone. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πλάτος του σήματος είναι πιο καθοριστικό για την απορρύθμιση του drone σε σχέση με τη συχνότητα επανάληψης του παλμού. Μια συμπληρωματική έρευνα των Lubkowski κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Kim κ.ά., 2022) εξέτασε τη δράση στενής ζώνης υψηλής ισχύος παλμών στα UAVs, δείχνοντας ότι οι μαγνητομετρητές και τα σήματα ελέγχου των κινητήρων επηρεάζονται άμεσα, ενώ οι δονήσεις από τη μεταβολή της ταχύτητας των κινητήρων έχουν δευτερογενείς επιπτώσεις σε άλλους αισθητήρες.

Σε άλλη μελέτη των Delsing κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Kim κ.ά., 2022) δοκιμάστηκε η επίδραση υψηλής ισχύος IEMI σε μια μονάδα Bluetooth. Τα αποτελέσματα

έδειξαν ότι συνεχή κύματα με ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο επηρέασαν σημαντικά έναν ενσωματωμένο αισθητήρα θερμοκρασίας και προκάλεσαν απώλειες δεδομένων λόγω των σφαλμάτων στην επικοινωνία.

Η χαμηλής ισχύος IEMI αξιοποιεί σήματα χαμηλότερης ισχύος που στοχεύουν συγκεκριμένα υποσυστήματα, βασιζόμενη σε προηγούμενη γνώση του τρόπου λειτουργίας του στόχου. Παρά την περιορισμένη ευελιξία της, μπορεί να είναι αποτελεσματική όταν συνδυάζεται με τεχνικές συντονισμού και αποσύνθεσης του σήματος εντός του κυκλώματος-στόχου.

Μια σημαντική μελέτη των Torrero κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Kim κ.ά., 2022) έδειξε ότι σήματα παρεμβολής χαμηλής ισχύος μπορούν να επηρεάσουν επιλεκτικά τον GPS δέκτη ενός drone, ενώ άλλες μονάδες παραμένουν ανεπηρέαστες. Σε άλλες μελέτες των Kune κ.ά., Nishiyama κ.ά., Poucheret κ.ά. (όπως αναφέρονται στην έρευνα των Kim κ.ά., 2022) διερευνήθηκαν επιθέσεις χαμηλής ισχύος σε διάφορους τύπους αισθητήρων, με τους αναλογικούς αισθητήρες να είναι ιδιαίτερα ευάλωτοι σε παρεμβολές μέσω της εισαγωγής εξωτερικών σημάτων.

Οι μέθοδοι παρεμβολής, όπως το jamming και το spoofing, έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε διάφορους στόχους, συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων GPS, καμερών και τηλεχειριστηρίων (Noh κ.ά., Rozenbeek, Ferreira, κ.ά., Caforio κ.ά. – όπως αναφέρονται στην έρευνα των Kim κ.ά., 2022). Η καινοτόμος μέθοδος sweep jamming έχει δείξει ιδιαίτερη αποτελεσματικότητα έναντι σημάτων τηλεχειριστηρίων βασιζόμενη στη σάρωση ενός σχετικά μεγάλου εύρους συχνοτήτων (Kim et al, 2022).

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αναδεικνύει σημαντικές προηγούμενες μελέτες που εξετάζουν την επίδραση των υπερευρέων παλμών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στα UAVs. Για παράδειγμα, η έρευνα των Sakharov κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belouson κ.ά., 2022) διερευνά τις επιπτώσεις των UWB EMPs σε ένα εμπορικό DJI Phantom 3 Standard UAV, καταδεικνύοντας την ευαισθησία του σε αυτές τις παρεμβολές. Η μελέτη των Chen κ.ά., 2018b (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belouson κ.ά., 2022) προτείνει μια καινοτόμο μέθοδο δοκιμής της ευπάθειας των UAVs σε σκόπιμες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, αποδεικνύοντας ότι η διασύνδεση δεδομένων μεταξύ ενός UAV και του σταθμού εδάφους μπορεί να διακοπεί ακόμη και με ακτινοβολούμενο ηλεκτρικό πεδίο χαμηλότερο από 1 V/m, υπό συγκεκριμένες συνθήκες συχνότητας.

Η έρευνα των Belouson κ.ά. επεκτείνει τις παραπάνω γνώσεις, προσφέροντας μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία για τη διασφάλιση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε συστήματα αντιμετώπισης UAVs. Οι προτεινόμενες μέθοδοι αναμένεται να συμβάλουν

σημαντικά στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της αξιοπιστίας αυτών των συστημάτων, παρέχοντας λύσεις στις υφιστάμενες προκλήσεις με σχετικά χαμηλό κόστος εφαρμογής. Οι μελέτες αυτές καλύπτουν διάφορες πτυχές: από τα όπλα υψηλής ισχύος μικροκυμάτων των Gao κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belousov κ.ά., 2022) έως τα χαρακτηριστικά των συστημάτων πρόωσης των UAVs των Adamaski κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belousov κ.ά., 2022) και τις επιπτώσεις των EMI στις επικοινωνιακές κυκλωματικές διατάξεις τους, των Li κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belousov κ.ά., 2022).

Οι Bennageh κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belousov κ.ά., 2022) παρέχουν μια εκτενή ανασκόπηση της βιβλιογραφίας σχετικά με την EMC και τις EMI που επηρεάζουν τις διασυνδέσεις δεδομένων μεταξύ UAVs και σταθμών εδάφους. Παράλληλα, ο Garcia (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belousov κ.ά., 2022) εξετάζει τις δυνατότητες ανάπτυξης καινοτόμων πειραματικών και αριθμητικών προσεγγίσεων για την αξιολόγηση της EMC των UAVs υπό συνθήκες υψηλής έντασης EMI, όπως αυτές που προκαλούνται από κεραυνούς ή μη πυρηνικούς ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η έρευνα των Lubkowski κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belousov κ.ά., 2022) η οποία διερευνά την επίδραση σκόπιμων EMI στους αισθητήρες ενός μικρού τετρακόπτερου UAV. Το παρεμβαλλόμενο σήμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένας στενής ζώνης υψηλής ισχύος ηλεκτρομαγνητικός παλμός, με συχνότητες μεταξύ 100 MHz και 3,4 GHz, και ένταση πεδίου που υπερβαίνει τα επίπεδα αντοχής που απαιτούνται από τα πρότυπα EMC. Αυτή η μελέτη παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την ευπάθεια των συστημάτων UAV σε στοχευμένες ηλεκτρομαγνητικές επιθέσεις.

Η ανάλυση των ζητημάτων EMC των UAV παρουσιάζεται από δύο κρίσιμες οπτικές γωνίες: την ακτινοβολία και την αντοχή στο θόρυβο στην έρευνα του Perez (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belousov κ.ά., 2022). Τα μικρά UAVs συνήθως ενσωματώνουν συστήματα δορυφορικής και αδρανειακής ναυσιπλοΐας, καθώς και μαγνητικές πυξίδες, με στερεά αισθητήρια αδρανειακά συστήματα που χρησιμοποιούνται για τη διατήρηση της θέσης του UAV κατά την πτήση. Η κατανόηση της αλληλεπίδρασης αυτών των συστημάτων με εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη αποτελεσματικών μέτρων προστασίας.

Για τη μελέτη της επίδρασης ενός ισχυρού μικροκυματικού παλμού στο κανάλι μετάδοσης δεδομένων του UAV κατά την πτήση, οι Zhang κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belousov κ.ά., 2022) προτείνουν τη χρήση ενός μοντέλου παρακολούθησης παρεμβολών.

Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ακριβέστερη πρόβλεψη και αντιμετώπιση πιθανών διαταραχών στην επικοινωνία του UAV. Η σημασία της αντιμετώπισης των UAVs, και ιδιαίτερα των μικρών UAVs, επιβεβαιώνεται από τον μεγάλο αριθμό σχετικών ερευνητικών έργων, όπως αυτά που παρουσιάζονται στο συλλογικό τόμο του Makarenko (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Belouson κ.ά., 2022). Αυτό το έργο παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των τρεχουσών προκλήσεων και λύσεων στον τομέα της ασφάλειας των UAVs (Belouson et al., 2022).

### **6.3 Μεθοδολογίες Αξιολόγησης των Ηλεκτρομαγνητικών Επιδράσεων**

Η αξιολόγηση των ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων στα UAVs αποτελεί κρίσιμο βήμα για την εξασφάλιση της λειτουργικής τους ακεραιότητας και της διατήρησης της αξιοπιστίας τους σε περιβάλλοντα με έντονη ηλεκτρομαγνητική δραστηριότητα. Ποικίλες μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί για την αποτελεσματική εκτίμηση και αντιμετώπιση αυτών των επιδράσεων, καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και εφαρμογές. Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται αναλυτικά οι κύριες προσεγγίσεις που περιλαμβάνουν τις δοκιμές ακτινοβολίας, τις δοκιμές έγχυσης, την προσομοιωτική έρευνα, τη συνδυαστική προσέγγιση καθώς και εξειδικευμένες μεθόδους δοκιμών. Η κατανόηση και η σωστή εφαρμογή αυτών των μεθοδολογιών συμβάλλουν στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας των UAVs έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και στην προαγωγή της ασφαλούς και αποδοτικής λειτουργίας τους σε διάφορα επιχειρησιακά πλαίσια.

#### **6.3.1 Δοκιμές Ακτινοβολίας**

Οι δοκιμές ακτινοβολίας αποτελούν την πλέον διαδεδομένη μεθοδολογία για την αξιολόγηση των επιπτώσεων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε ηλεκτρονικά συστήματα. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την έκθεση του υπό δοκιμή εξοπλισμού (EUT: Equipment Under Test) σε ελεγχόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μέσω μιας κεραίας εκπομπής, ενώ ο εξοπλισμός βρίσκεται σε λειτουργία. Η κατάσταση του υπό δοκιμή εξοπλισμού παρακολουθείται σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας την αξιολόγηση των επιπτώσεων της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Επιπλέον, η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον προσδιορισμό των οριακών τιμών έντασης πεδίου ή ισχύος που απαιτούνται για την εκδήλωση συγκεκριμένων φαινομένων.

Τα συνήθη περιβάλλοντα διεξαγωγής δοκιμών ακτινοβολίας περιλαμβάνουν:

- Εξωτερικές τοποθεσίες.
- Θαλάμους εγκάρσιου ηλεκτρομαγνητικού κύματος (TEM: Transverse Electromagnetic).

- Θαλάμους αντήχησης.
- Ανηχοϊκούς θαλάμους (θάλαμοι απορρόφησης κυμάτων).

Για τα UAVs, η επικρατέστερη μεθοδολογία είναι η διεξαγωγή δοκιμών ακτινοβολίας σε ανηχοϊκούς θαλάμους. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει ακριβέστερες μετρήσεις της έντασης ακτινοβολίας και της ενεργειακής πυκνότητας στο σημείο δοκιμής, καθώς και τη λεπτομερή παρακολούθηση των μεταβολών στην κατάσταση του UAV και των σχετικών φαινομένων που προκύπτουν από την έκθεση στην ακτινοβολία (Zhang et al., 2024).

### **6.3.2 Δοκιμές Έγχυσης**

Όταν η διεξαγωγή δοκιμών ακτινοβολίας καθίσταται ανέφικτη, εφαρμόζονται εναλλακτικά οι δοκιμές έγχυσης. Σε αυτή τη μεθοδολογία, υψηλής έντασης ρεύματα ή υψηλές τάσεις εγχέονται απευθείας στον εξοπλισμό. Παρά τις διαφορές στους φυσικούς μηχανισμούς σύζευξης και στα αποτελέσματα μεταξύ της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και της άμεσης έγχυσης σημάτων, ορισμένες μελέτες υποδεικνύουν ότι υπό συγκεκριμένες συνθήκες, η δοκιμή έγχυσης δύναται να προσομοιώσει επαρκώς τις επιπτώσεις της ακτινοβολίας.

Οι δοκιμές έγχυσης προσφέρουν ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των δοκιμών ακτινοβολίας:

- Βελτιωμένη απόδοση δοκιμών για δεδομένη ισχύ εισόδου.
- Ακριβέστερο έλεγχο των παραμέτρων του σήματος παρεμβολής.
- Δυνατότητα λήψης δεδομένων μεγαλύτερης ακρίβειας.

Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται συχνά για την αξιολόγηση των επιδράσεων ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε επιμέρους ηλεκτρονικές συσκευές ή κυκλώματα, όπως οι ενισχυτές χαμηλού θορύβου (LNAs: Low Noise Amplifiers) και τα ολοκληρωμένα κυκλώματα (ICs: Integrated Circuits) (Zhang et al., 2024).

### **6.3.3 Προσομοιωτική Έρευνα**

Η προσομοιωτική έρευνα αξιοποιεί υπολογιστικά μοντέλα και τεχνικές αριθμητικής προσομοίωσης για την ανάλυση των επιπτώσεων της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής. Μέσω της ανάπτυξης εξελιγμένων μαθηματικών και φυσικών μοντέλων, καθίσταται εφικτή η διεξαγωγή αριθμητικών υπολογισμών και προσομοιώσεων που αφορούν:

- Στη διάδοση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.
- Στους μηχανισμούς ηλεκτρομαγνητικής σύζευξης.
- Στις ηλεκτρομαγνητικές επιδράσεις σε διάφορα συστήματα.

Η προσομοιωτική προσέγγιση παρέχει μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση και επιτρέπει τη διερεύνηση πολλαπλών παραμέτρων και μηχανισμών, ακόμη και σε περιπτώσεις όπου οι πειραματικές δοκιμές είναι δαπανηρές ή δυσχερείς.

Οι τυπικές μέθοδοι προσομοίωσης κατηγοριοποιούνται σε αλγορίθμους χρονικού και συχνοτικού πεδίου. Από αυτές τις μεθόδους έχουν αναπτυχθεί διάφορα εξειδικευμένα λογισμικά προσομοίωσης, τα οποία επιτρέπουν την ανάλυση πολύπλοκων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων (Zhang et al., 2024).

### **6.3.4 Συνδυαστική Προσέγγιση**

Η συνδυασμένη χρήση πειραματικών και προσομοιωτικών μεθόδων προσφέρει ισχυρή υποστήριξη για την κατανόηση και την αντιμετώπιση των επιπτώσεων των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στα UAVs. Αυτή η ολιστική προσέγγιση συμβάλλει στη διασφάλιση της αξιοπιστίας και ασφάλειας λειτουργίας των UAVs υπό αντίξοες ηλεκτρομαγνητικές συνθήκες (Zhang et al., 2024).

### **6.3.5 Εξειδικευμένες μέθοδοι δοκιμών**

Για συγκεκριμένα υποσυστήματα των UAVs, έχουν αναπτυχθεί εξειδικευμένες μέθοδοι δοκιμών. Για παράδειγμα:

- Για τους δέκτες GPS των UAVs, έχει αναπτυχθεί μια εναλλακτική μέθοδος δοκιμής βασισμένη στην έγχυση ηλεκτρομαγνητικού παλμού αστραπής (LEMP).
- Για τις διασυνδέσεις δεδομένων (datalinks) των UAVs, έχουν διεξαχθεί μελέτες που επικεντρώνονται στη χρήση της μεθόδου έγχυσης για την αξιολόγηση των ηλεκτρομαγνητικών επιπτώσεων.

Συμπερασματικά, η επιλογή της κατάλληλης μεθοδολογίας για τη μελέτη των ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων στα UAVs εξαρτάται από τους συγκεκριμένους ερευνητικούς στόχους, τις διαθέσιμες υποδομές και τα υπό εξέταση υποσυστήματα. Η ολοκληρωμένη προσέγγιση, που συνδυάζει πειραματικές και υπολογιστικές μεθόδους, παρέχει τη βέλτιστη κατανόηση των πολύπλοκων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων που επηρεάζουν τη λειτουργία των UAVs (Zhang et al., 2024).

## **6.3 Μέθοδοι Ηλεκτρομαγνητικής Προσομοίωσης**

Οι μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικής προσομοίωσης αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη των επιδράσεων των ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στα ηλεκτρονικά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των μη επανδρωμένων αεροσκαφών. Αυτές οι μέθοδοι επιτρέπουν την ανάλυση πολύπλοκων ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων σε ελεγχόμενα ψηφιακά

περιβάλλοντα, παρέχοντας πολύτιμες πληροφορίες για το σχεδιασμό και την προστασία των ηλεκτρονικών συστημάτων (Zhang et al., 2024).

### **6.3.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων**

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM: Finite Element Method) είναι μια ευρέως διαδεδομένη αριθμητική τεχνική για την επίλυση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Στην ηλεκτρομαγνητική προσομοίωση, η FEM χρησιμοποιείται για την ανάλυση της σύζευξης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με πολύπλοκες γεωμετρίες. Για παράδειγμα, οι Carpes et al. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Zhang κ.ά., 2024) ανέπτυξαν μια μέθοδο αριθμητικής προσομοίωσης βασισμένη στη FEM, τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και της συχνότητας, για την προσομοίωση της σύζευξης ηλεκτρομαγνητικού κύματος με καλώδιο σε μεταλλική κοιλότητα με μικρά ανοίγματα και σχισμές. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη λεπτομερή ανάλυση των μηχανισμών διείσδυσης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων σε θωρακισμένα περιβλήματα, όπως αυτά που χρησιμοποιούνται στα UAVs (Zhang et al., 2024).

### **6.3.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Διαφορών στο Πεδίο του Χρόνου**

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών στο πεδίο του χρόνου (FDTD: Finite-Difference Time-Domain) είναι μια άλλη δημοφιλής τεχνική για την επίλυση των εξισώσεων του Maxwell στο πεδίο του χρόνου. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάλυση μεταβατικών φαινομένων και ευρυζωνικών αποκρίσεων. Οι Cheng κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Zhang κ.ά., 2024) χρησιμοποίησαν τεχνολογία υπολογιστικής προσομοίωσης (CST: Computer Simulation Technology), η οποία βασίζεται στη μέθοδο FDTD, για να δημιουργήσουν ένα προσομοιωτικό μοντέλο του περιβλήματος ενός UAV και να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα της ηλεκτρομαγνητικής του θωράκισης. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της θωράκισης για μέγιστη προστασία από εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Zhang et al., 2024).

### **6.3.3 Μέθοδος των Ροπών**

Η μέθοδος των ροπών (MoMs: Method of Moments) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται κυρίως για την ανάλυση ακτινοβολίας και σκέδασης από μεταλλικές επιφάνειες. Οι Chen κ.ά., 2018a (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Zhang κ.ά., 2024) εφάρμοσαν τη MoM σε συνδυασμό με το λογισμικό CST για την προσομοίωση των μεταβατικών τάσεων και ρευμάτων που επάγονται στα εσωτερικά καλώδια του εξοπλισμού κατά την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικό παλμό. Αυτή η μελέτη οδήγησε στην πρόταση βελτιωμένων σχημάτων



διάταξης καλωδίων για τη μείωση του κινδύνου των κεραυνικών πληγμάτων στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη (Zhang et al., 2024).

#### **6.3.4 Υβριδικές Μέθοδοι Προσομοίωσης**

Η σύνθετη φύση των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων σε UAVs συχνά απαιτεί το συνδυασμό διαφορετικών μεθόδων προσομοίωσης. Οι Song κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Zhang κ.ά., 2024) ανέπτυξαν μια ημι-φυσική προσομοίωση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε UAVs, συνδυάζοντας την προσομοίωση σε επίπεδο συστήματος με την έγχυση σήματος στην κεραία και στα εσωτερικά καλώδια. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την ακριβέστερη μοντελοποίηση των πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων μεταξύ των διαφόρων υποσυστημάτων του UAV υπό την επίδραση ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων (Zhang et al., 2024).

#### **6.3.5 Προσομοίωση σε Επίπεδο Συστήματος**

Εκτός από τις λεπτομερείς ηλεκτρομαγνητικές προσομοιώσεις, η ανάλυση σε επίπεδο συστήματος είναι κρίσιμη για την κατανόηση των συνολικών επιπτώσεων των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στη λειτουργία των UAVs. Οι Wen κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Zhang κ.ά., 2024) χρησιμοποίησαν το MATLAB/Simulink για να εξετάσουν την επίδραση των UWB EMP στις ασύρματες επικοινωνίες των UAVs. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει την αξιολόγηση της ευρωστίας των συστημάτων επικοινωνίας των UAVs σε ακραία ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα (Zhang et al., 2024).

#### **6.3.6 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης και Μηχανική Μάθηση**

Σύγχρονες τεχνικές βελτιστοποίησης και μηχανικής μάθησης εφαρμόζονται όλο και περισσότερο στην ανάλυση και το σχεδιασμό UAVs ανθεκτικών σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Οι Xie κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Zhang κ.ά., 2024) ανέπτυξαν ένα σχήμα βελτιστοποίησης διαδρομής για πολλαπλά UAVs, στοχεύοντας στην εύρεση της οικονομικότερης διαδρομής πτήσης σε περιβάλλον με παρεμβολές ραντάρ. Επιπλέον, οι Zhang κ.ά., 2016 (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Zhang κ.ά., 2024) πρότειναν μια μέθοδο εκτίμησης του βαθμού παρεμβολής στο σύστημα μετάδοσης δεδομένων (Datalink System) των UAVs σε πολύπλοκα περιβάλλοντα, συνδυάζοντας μηχανές διανυσματικής υποστήριξης (SVM: Support Vector Machines) και κριτήρια ισχύος. Τέλος, οι Xu κ.ά. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Zhang κ.ά., 2024) ανέπτυξαν μια μέθοδο βασισμένη σε συνελκτικό νευρωνικό δίκτυο για την αναγνώριση ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και την εκτίμηση του κινδύνου του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος για το Datalink ενός UAV.

Συμπερασματικά, η προσομοίωση έχει αναδειχθεί σε ένα αναπόσπαστο και ιδιαίτερα αποτελεσματικό εργαλείο στη μελέτη των ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων σε UAVs. Η ορθή ανάπτυξη προσομοιωτικών μοντέλων, η εφαρμογή κατάλληλων υπολογιστικών μεθόδων και η προσεκτική ρύθμιση των παραμέτρων επίλυσης επιτρέπουν στην προσομοίωση να λειτουργήσει ως ένα αξιόπιστο υποκατάστατο των φυσικών δοκιμών σε πολλές περιπτώσεις. Η υψηλή αποδοτικότητα και ευελιξία της προσομοίωσης ενισχύουν σημαντικά την ερευνητική παραγωγικότητα, επιτρέποντας τη διερεύνηση ενός ευρέος φάσματος σεναρίων και παραμέτρων.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η βέλτιστη προσέγγιση για την κατανόηση και αντιμετώπιση των ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών επιδράσεων σε UAVs περιλαμβάνει τον συνδυασμό προσομοιώσεων και φυσικών δοκιμών. Αυτή η συμπληρωματική προσέγγιση επιτρέπει την επαλήθευση και βελτίωση των προσομοιωτικών μοντέλων, ενώ παράλληλα παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα της συμπεριφοράς των UAVs σε πραγματικά ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα (Zhang et al., 2024).

#### **6.4 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα**

Η μελέτη των Belousov κ.ά. (2022) εξετάζει το κρίσιμο ζήτημα της διασφάλισης της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε συστήματα αντιμετώπισης μη επανδρωμένων αεροσκαφών που βασίζονται σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Η εφαρμογή των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών εμπεριέχει σημαντικές προκλήσεις, μιας και ενώ οι παρεμβολές έναντι των UAVs μπορεί να είναι αποτελεσματικές, υπάρχει κίνδυνος να επηρεαστούν και άλλα ηλεκτρονικά συστήματα στην περιοχή, τα οποία δεν είναι στόχος των παρεμβολών. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει κρίσιμες υποδομές ή άλλα συστήματα που βασίζονται στην ίδια ηλεκτρομαγνητική περιοχή. Η έρευνά τους προτείνει μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία που συνδυάζει καινοτόμες προσεγγίσεις και τεχνικές για την επίλυση των προκλήσεων των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να υιοθετηθούν από διάφορους τύπους συστημάτων, ανάλογα με το πλαίσιο και τις ανάγκες προστασίας, συμπεριλαμβανομένων και των UAVs που θέλουν να προστατευτούν από τους EMP παλμούς. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη επικεντρώνεται στις εξής μεθόδους:

- Χρήση κοίλων και λεπτών παθητικών αγωγών.
- Εφαρμογή μαγνητοδιηλεκτρικών υλικών σε συμμετρικά φίλτρα ανάκλασης.

- Αξιοποίηση συμμετρικών δομών για τον διαχωρισμό εξαιρετικά σύντομων παλμών<sup>6</sup> (USP: Ultra-Short Pulses).
- Χρήση καμπυλωτών γραμμών ή σεληνιακών γραμμών<sup>7</sup> (ML: Meander Line) ως μέσο προστασίας από τους εξαιρετικά σύντομους παλμούς.

Η χρήση γεννητριών ισχυρών μικροκυμάτων και ακτινοβολίας λέιζερ μπορεί να προκαλέσει δυσλειτουργίες στον ραδιοηλεκτρονικό εξοπλισμό (REE: Radio-Electronic Equipment), συμπεριλαμβανομένων των συσκευών λήψης και μετάδοσης, των γεννητριών σημάτων και των ηλεκτρονικών υπολογιστικών συσκευών. Η μελέτη εισάγει μια καινοτόμο προσέγγιση στην αντιμετώπιση του ζητήματος της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για τα «φιλικά» UAVs που βρίσκονται στην περιοχή δράσης των συστημάτων EMI. Αυτή η πτυχή, που δεν είχε εξεταστεί επαρκώς στο παρελθόν λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους των μικρών UAVs, αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε πραγματικές συνθήκες μάχης.

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στοχεύει στην κάλυψη ενός σημαντικού κενού στη βιβλιογραφία, καθώς δεν υπάρχουν προηγούμενες ολοκληρωμένες προσεγγίσεις για τη διασφάλιση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας σε τέτοια συστήματα (Belouson et al., 2022).

#### **6.4.2 Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα έναντι των USP Παλμών**

Η ραγδαία εξέλιξη των γεννητριών παλμών υπερ-σύντομης διάρκειας αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, ιδιαίτερα όσον αφορά τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Ακόμη και όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από τους USP παλμούς είναι ίδια με την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από άλλους τύπους ηλεκτρομαγνητικών παλμών, οι πρώτοι έχουν σημαντικά πιο αποτελεσματική επίδραση στον εξοπλισμό των UAVs. Αυτό συμβαίνει λόγω της μικρής τους διάρκειας, η οποία είναι συγκρίσιμη με τη διάρκεια των σημάτων πληροφορίας που επεξεργάζονται τα συστήματα ελέγχου των UAVs, αυξάνοντας έτσι την πιθανότητα διαταραχής τους.

Η σύγχρονη τεχνολογική πρόοδος, που χαρακτηρίζεται από την ταχεία εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας, την εκθετική αύξηση του όγκου και της ταχύτητας μετάδοσης των δεδομένων, καθώς και τη συνεχή βελτίωση του απομακρυσμένου ελέγχου των μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε πραγματικό χρόνο, καθιστά επιτακτική την ανάπτυξη

<sup>6</sup> Πρόκειται για παλμούς που έχουν διάρκεια νανοδευτερόλεπτων ή ακόμη μικρότερη.

<sup>7</sup> Είναι ένας τύπος γραμμής που χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC), προστασίας από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI) και σχεδίασης φίλτρων. Η γραμμή αυτή σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει επαναλαμβανόμενες καμπύλες ή κυματοειδείς μορφές, θυμίζοντας την κίνηση της σελήνης, απ' όπου παίρνει και την ονομασία της.

προηγμένων συστημάτων προστασίας. Τα συστήματα αυτά οφείλουν να διασφαλίζουν την αδιάλειπτη και ασφαλή λειτουργία των UAVs υπό την επίδραση πιθανών ηλεκτρονικών παρεμβολών από τα συστήματα παρεμπόδισής τους. Οι υφιστάμενες διατάξεις προστασίας εμφανίζουν σημαντικούς περιορισμούς, συμπεριλαμβανομένης της ανεπαρκούς ταχύτητας επεξεργασίας των παρεμβαλλόμενων σημάτων, της υψηλής πολυπλοκότητας και του δυσανάλογου κόστους. Αυτοί οι περιορισμοί υπογραμμίζουν την επείγουσα ανάγκη για ανάπτυξη καινοτόμων και αποτελεσματικών συστημάτων προστασίας.

Η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τη διασφάλιση της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας προκειμένου να προστατευτούν τα εν λόγω συστήματα από ηλεκτρομαγνητικές απειλές απαιτεί τη δημιουργία θεωρητικών πλαισίων, μεθόδων, βασικών αρχών, διαδικασιών και μέσων υλοποίησης. Στο πλαίσιο αυτό, προτείνεται ένα νέο σύνολο προσεγγίσεων και μεθόδων, συμπεριλαμβανομένης της μοδαλικής διήθησης, της χρήσης κοίλων και λεπτών παθητικών αγωγών, της εφαρμογής μαγνητοδιηλεκτρικών υλικών σε συμμετρικές δομές, της αξιοποίησης των μεθόδων TRIZ σε συμμετρικές μοδαλικές δομές και τη χρήση γραμμών τύπου meander. Πιο αναλυτικά:

1. **Μοδαλική Διήθηση<sup>8</sup> (MF: Modal Filtering):** Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη διάσπαση υπερσύντομων παλμών σε ακολουθίες μικρότερων παλμών με χαμηλότερη ένταση, προστατεύοντας έτσι τα κρίσιμα κυκλώματα των ραδιοηλεκτρονικών εξοπλισμών.
2. **Εφαρμογή Κοίλων και Λεπτών Παθητικών Αγωγών:** Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη μείωση της μάζας του συστήματος προστασίας, διατηρώντας παράλληλα την αποτελεσματικότητά του.
3. **Χρήση Μαγνητοδιηλεκτρικών Υλικών:** Η ενσωμάτωση μαγνητοδιηλεκτρικών υλικών σε δομές με Μοδαλική Εφεδρεία<sup>9</sup> (MR: Modal Reservation) έχει δείξει σημαντική βελτίωση στην απόσβεση των υπερβολικά βραχέων παλμών.

---

<sup>8</sup> Ο όρος χρησιμοποιείται κυρίως στον τομέα της Μηχανικής και της Ηλεκτρονικής για να περιγράψει τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση ή την εξαφάνιση συγκεκριμένων λειτουργικών τρόπων ή «μοδών» από ένα σύστημα.

Ειδικά, στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία, οι μόδες διάδοσης (Wave Modes) αναφέρονται σε συγκεκριμένους τρόπους με τους οποίους τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διαδίδονται μέσα σε μια διάταξη ή ένα μέσο. Για παράδειγμα, οι μόδες διάδοσης σε ένα κύμα οδηγού ή ένα οπτικό νημάτιο αναφέρονται σε συγκεκριμένες μορφές διάδοσης του φωτός ή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

<sup>9</sup> Πρόκειται για την τεχνική που χρησιμοποιείται για να ενισχύσει την ανθεκτικότητα ή την επιβίωση ενός συστήματος σε συνθήκες επικινδυνότητας ή αποτυχίας, διασφαλίζοντας ότι οι κρίσιμες λειτουργίες ή οι βασικές λειτουργίες του συστήματος είναι προστατευμένες ή εφεδρικές.

4. **Εφαρμογή της «Θεωρίας Εφευρετικής Επίλυσης Προβλημάτων» (TRIZ: Theory of Inventive Problem Solving):** Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται για την αναγνώριση και αξιοποίηση κρυφών πόρων στα συστήματα, οδηγώντας σε καινοτόμες λύσεις.

Η αποτελεσματικότητα της μοδαλικής διήθησης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η γεωμετρική διαμόρφωση της προστατευτικής διάταξης, ο αριθμός των αγωγών, το χρησιμοποιούμενο διηλεκτρικό υλικό και το μήκος της δομής. Στο πλαίσιο της έρευνας των Belousov κ.ά., εξετάστηκε μια τυπική MF διάταξη βασισμένη σε συζευγμένες γραμμές μεταφοράς, με μήκος 1 μέτρο. Ως πηγή διέγερσης χρησιμοποιήθηκε υπερσύντομος παλμός σε μορφή τραπεζοειδούς, με πλάτος 1V και συνολική διάρκεια 300 ps (picosecond / πικοδευτερόλεπτο). Οι τιμές των αντιστάσεων επιλέχθηκαν προσεκτικά ώστε να εξασφαλιστεί η συμβατότητα της δομής με την πορεία του σήματος, διασφαλίζοντας ότι το σήμα στην αρχή της γραμμής είναι ίσο με το μισό της πηγής.

Οι πιο πρόσφατες συσκευές προστασίας από USP βασίζονται στην αρχή της μοδαλικής διήθησης. Αυτή η μέθοδος αξιοποιεί ζεύγη γραμμών μετάδοσης με ετερογενή διηλεκτρική πλήρωση για να διασπάσει τον αρχικό παλμό USP σε πολλαπλούς παλμούς μικρότερης έντασης. Παρά τις σημαντικές βελτιώσεις που έχουν επιτευχθεί, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις, κυρίως όσον αφορά την ανάγκη για μεγαλύτερη διαφορά στις καθυστερήσεις των τρόπων διαμόρφωσης, που θα επέτρεπε την αποτελεσματικότερη διάσπαση των παλμών USP.

Η μέθοδος των κοίλων και λεπτών παθητικών αγωγών επιτρέπει τη σημαντική μείωση της μάζας του τελικού προϊόντος, διατηρώντας παράλληλα τα απαραίτητα προστατευτικά χαρακτηριστικά. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας των αγωγών, η οποία επιτρέπει την αποτελεσματική διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με ελάχιστη χρήση υλικού. Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση κοίλων και λεπτών παθητικών αγωγών σε προστατευτικές διατάξεις μοδαλικής διήθησης έχει αναδειχθεί ως μια ιδιαίτερα αποτελεσματική προσέγγιση.

Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το εύρος ζώνης των φίλτρων κυμάνθηκε μεταξύ 77 και 82 MHz, με μικρές διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφόρων τύπων αγωγών. Παρατηρήθηκε μια απόκλιση της τάξης του  $\pm 25\%$  μεταξύ των προσομοιώσεων και των πειραματικών δεδομένων για τον MF με λεπτό αγωγό, η οποία αποδίδεται κυρίως στις απώλειες των αγωγών και των διηλεκτρικών υλικών, καθώς και στην αντανάκλαση που προκαλείται από τη μη αντιστοίχιση των τρόπων διάδοσης.

Η χρήση μαγνητοδιηλεκτρικών υλικών, όπως το ZIPSIL RPM-P1, έδειξε σημαντική βελτίωση στην απόσβεση των USP. Συγκεκριμένα, οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι η προσθήκη του μαγνητοδιηλεκτρικού υλικού μείωσε τη συχνότητα αποκοπής κατά 150 MHz και τη

συχνότητα πρώτου συντονισμού κατά 490 MHz. Αυτό οδήγησε σε σημαντική βελτίωση της προστασίας έναντι των USP παλμών, καθώς μειώθηκαν οι τιμές όλων των μετρούμενων παραμέτρων. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας TRIZ οδήγησε σε μια καινοτόμο προσέγγιση: στην τροποποίηση των οριακών συνθηκών μιας συμμετρικής σεληνιακής γραμμής, αντί για την αλλαγή της γεωμετρίας της.

Η σεληνιακή γραμμή έχει αναδειχθεί ως ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό μέσο για την απόσβεση της έντασης των παλμών USP. Πειραματικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι με μία στροφή της γραμμής αυτής σε αέρα, χωρίς, δηλαδή, τη χρήση ή παρουσία κάποιου άλλου υλικού, ο παλμός USP μπορεί να διασπαστεί σε δύο παλμούς μικρότερης έντασης, ενώ όταν η στροφή εφαρμόζεται σε μία μικροταινία ML, η διάσπαση οδηγεί σε τρεις διακριτούς παλμούς. Πρόσφατες ερευνητικές μελέτες έχουν αποκαλύψει ότι η εισαγωγή ασυμμετρίας στη διατομή της σεληνιακής γραμμής, σε συνδυασμό με την προσθήκη ενός επιπλέον παθητικού αγωγού, μπορεί να ενισχύσει σημαντικά την απόσβεση του παλμού USP. Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί αύξηση της απόσβεσης έως και 5,4 φορές σε σύγκριση με τις συμβατικές διατάξεις. Η τεχνική της διαδοχικής σύνδεσης (cascading) πολλαπλών στροφών ML προσφέρει ακόμη μεγαλύτερες δυνατότητες απόσβεσης. Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση τριών διαδοχικών στροφών μπορεί να επιτύχει απόσβεση 8 φορές μεγαλύτερη, ενώ η εφαρμογή τεσσάρων στροφών μπορεί να αυξήσει την απόσβεση έως και 20 φορές.

Μια ιδιαίτερα ελπιδοφόρα προσέγγιση είναι ο συνδυασμός της σεληνιακής γραμμής με τη μοδαλική διήθηση σε υβριδικές συσκευές. Αυτές οι υβριδικές διατάξεις, με την κατάλληλη γεωμετρική διαμόρφωση, έχουν επιδείξει εξαιρετική απόδοση, επιτυγχάνοντας απόσβεση έως και 12 φορές μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους (Belousov et al., 2022).

### **6.4.3 Ανάλυση Ευρημάτων**

Η βιωσιμότητα και η αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων μεθόδων στην έρευνα των Belousov κ.ά. έχουν τεκμηριωθεί μέσω εμπειριστατωμένων παραδειγμάτων και μελετών περιπτώσεων, παρέχοντας καινοτόμες κατευθύνσεις για την ανάπτυξη προηγμένων συστημάτων προστασίας. Αυτές οι μέθοδοι αποσκοπούν στην ενίσχυση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των UAV υπό συνθήκες έντονων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (Belousov et al., 2022).

Η έρευνα επικεντρώθηκε σε πέντε κύριους άξονες τεχνολογικών προσεγγίσεων, οι οποίοι αναλύονται ως εξής (Belousov et al., 2022):

1. **Μοδαλική Διήθηση (Modal Filtration):** Η τεχνολογία αυτή αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση για τη διάσπαση των αγωγίμων παλμών μικρής διάρκειας σε ακολουθίες

παλμών μικρότερου πλάτους. Η εφαρμογή της βασίζεται στην αξιοποίηση υφιστάμενων διασυνδέσεων ηλεκτρονικών και ηλεκτρικών συσκευών, συμπεριλαμβανομένων:

- Του περιβλήματος ως επίπεδο επιστροφής γείωσης.
- Του διαθέσιμου χώρου στην πλακέτα κυκλώματος.
- Των υπαρχόντων καλωδίων.
- Των τυπωμένων αγωγών.

Η μέθοδος αυτή επιτυγχάνει σημαντική μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών χωρίς την ανάγκη πρόσθετων εξαρτημάτων, βελτιστοποιώντας έτσι το βάρος και το κόστος του συστήματος.

**2. Μέθοδος Κοίλων και Λεπτών Παθητικών Αγωγών:** Τα πειραματικά δεδομένα καταδεικνύουν ότι η αντικατάσταση των συμβατικών συμπαγών παθητικών αγωγών με κοίλους, γωνιακούς ή λεπτούς αγωγούς επιφέρει σημαντικά οφέλη, όσον αφορά στα παρακάτω:

- Μείωση της τάσης εξόδου.
- Αξιοσημείωτη εξοικονόμηση βάρους.
- Διατήρηση της επιθυμητής κατανομής του παλμού σε μικρότερες ακολουθίες.

Η προσέγγιση αυτή συμβάλλει στη βελτιστοποίηση της σχέσης απόδοσης-βάρους, κρίσιμη παράμετρος για τα συστήματα UAV.

**3. Μαγνητοδιηλεκτρικά σε Δομές με Μοδαλική Δέσμευση:** Η ενσωμάτωση μαγνητοδιηλεκτρικών υλικών, σε συνδυασμό με την εφαρμογή της μεθοδολογίας TRIZ οδήγησε στην ανάπτυξη συσκευών με τριπλή μοδαλική δέσμευση. Αυτές οι συσκευές παρουσιάζουν εξαιρετική απόδοση στην:

- Ενίσχυση της προστασίας έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.
- Καταστολή της εκπομπής επικίνδυνων ρευμάτων.

Η συγκεκριμένη προσέγγιση προσφέρει μια πολυεπίπεδη λύση για την αντιμετώπιση των σύνθετων ηλεκτρομαγνητικών προκλήσεων.

**4. Αξιολόγηση της Απόσβεσης των Υπερσύντομων Παλμών:** Η μέθοδος της συμμετρικής διήθησης μέσω διαδοχικών σταδίων αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη μείωση της έντασης των USP. Η τεχνική αυτή είναι ιδανική για εφαρμογές όπου απαιτείται:

- Αυστηρή συμμόρφωση με τις διαστάσεις των UAV.
- Διατήρηση των βασικών χαρακτηριστικών των συστημάτων UAV.

Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτελεσματική προστασία χωρίς να επηρεάζει σημαντικά τον σχεδιασμό ή τη λειτουργικότητα του UAV.

**5. Χρήση Μη Γραμμικών Φίλτρων για την Προστασία των USP:** Η περαιτέρω ενίσχυση της απόσβεσης των USP επιτυγχάνεται μέσω:

- Προσθήκης επιπλέον αγωγών.
- Εισαγωγής ασυμμετρίας στο σύστημα.
- Ανάπτυξης υβριδικών δομών που συνδυάζουν MLs και MF.

Η εφαρμογή της προσέγγισης TRIZ σε αυτό το πλαίσιο οδηγεί σε καινοτόμες τεχνικές λύσεις για την επίτευξη EMC σε προηγμένα συστήματα αντιμετώπισης UAV.

## **6.5 Επίδραση της EMP στα μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα**

### **6.5.1 Ανάλυση της Ευπάθειας των Κρίσιμων Συστημάτων των UAV έναντι των Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών**

Στη μελέτη τους οι Ibeobi & Pan, (2021) εστίασαν στην ανάλυση των επιδράσεων του παλμού στη δομή, στην επικοινωνία και στο κύκλωμα καλωδίωσης ενός drone επιτήρησης, αξιοποιώντας το λογισμικό CST microwave studio και τη μέθοδο του πλέγματος γραμμών μετάδοσης (TLM: Transmission Line Method).

Οι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί, που αρχικά παρατηρήθηκαν κατά τις πυρηνικές δοκιμές του 1946 χαρακτηρίζονται ως εκρήξεις υψηλής συχνότητας που δημιουργούν ισχυρά ηλεκτρικά πεδία, ικανά να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στα ηλεκτρονικά κυκλώματα. Τα drones, λόγω της απουσίας πιλότου και της εξάρτησής τους καθαρά από τις αεροδυναμικές δυνάμεις για την πτήση, παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία σε τέτοιου είδους παρεμβολές.

Η έρευνα των Ibeobi & Pan επικεντρώθηκε στο μοντέλο DJI Mavic Pro, ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μη επανδρωμένο εναέριο όχημα, που χρησιμοποιείται για επιτήρηση και εναέρια φωτογράφιση. Η μελέτη εξέτασε διεξοδικά την επίδραση του EMP σε κρίσιμα συστήματα όπως η επικοινωνία, ο έλεγχος πτήσης, οι προπέλες, οι μικροελεγκτές και οι αισθητήρες. Επιπλέον, διερευνήθηκε η πιθανότητα παρεμβολής του σήματος και της τελικής κατάρρευσής του, υπό συγκεκριμένες συνθήκες έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς.

Η μεθοδολογία της έρευνας περιλάμβανε τόσο υπολογιστικές προσομοιώσεις όσο και πειραματικές μετρήσεις. Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον του CST microwave studio, με το μοντέλο του drone να εισάγεται σε μορφή STEP και τα υλικά να ορίζονται βάσει των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων τους. Η διαμόρφωση των παραμέτρων προσομοίωσης ακολούθησε το πρότυπο MIL-STD464A, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος TLM χρησιμοποιήθηκε για τον ακριβή υπολογισμό των



ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, επιτρέποντας τη διακριτοποίηση του χώρου και του χρόνου. Οι προσομοιώσεις εστίασαν στην αλληλεπίδραση των καλωδίων με τα πεδία EMP, αναδεικνύοντας τη σημασία του μήκους των καλωδίων στην ευαισθησία των κυκλωμάτων σε επιθέσεις EMP.

Πειραματικά, η αντίδραση του drone μετρήθηκε χρησιμοποιώντας γεννήτρια EMP σε αποστάσεις 12, 10 και 8 μέτρων από την πηγή ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν αυξημένη αστάθεια του μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος με την αύξηση της ισχύος του πεδίου, με το όχημα να καθίσταται ανεξέλεγκτο σε ένταση πεδίου 24 kV/m και απόσταση 8 μέτρων από την πηγή. Η περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων αποκάλυψε ότι η επίδραση του EMP είναι πιο έντονη όταν προκαλεί μονοκατευθυντική ακτινοβολία, ενώ δεν παρατηρήθηκε σημαντική επίδραση σε διμερείς ακτινοβολίες. Επιπλέον, διαπιστώθηκε ότι τα κοντύτερα καλώδια παρουσιάζουν χαμηλότερη επαγόμενη τάση και ρεύμα, καθιστώντας τα κυκλώματα λιγότερο ευάλωτα σε επιθέσεις EMP (Ibeobi & Pan, 2021).

### 6.5.2 Επιπτώσεις των Ισχυρών Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών

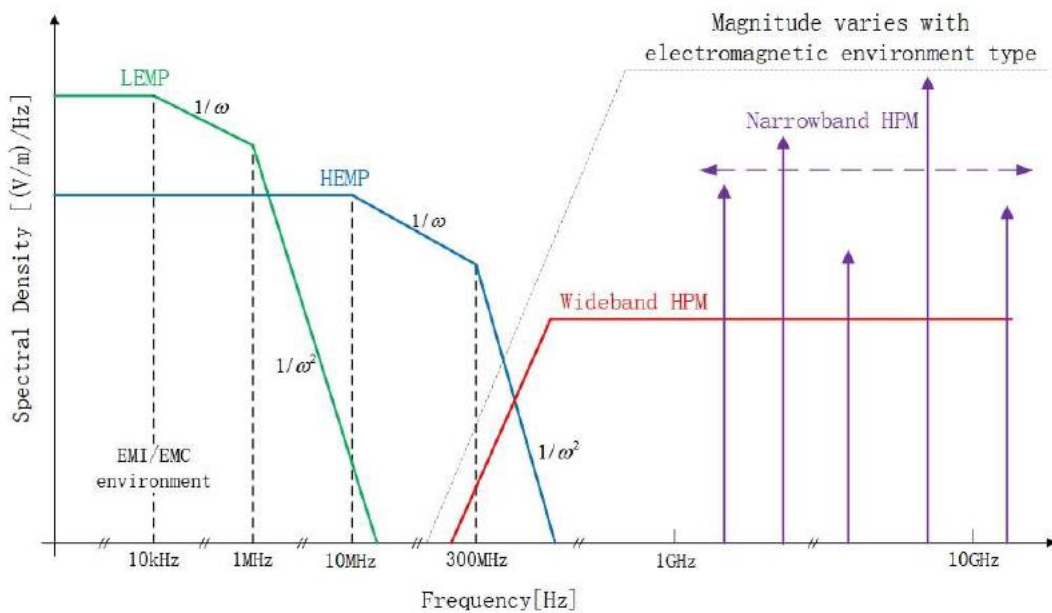
Η μελέτη των Zhang κ.ά. (2024) παρουσιάζει μια συστηματική ανάλυση των πιθανών ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που ενδέχεται να αντιμετωπίσουν τα UAVs κατά τη διάρκεια της πτήσης τους. Η μελέτη επικεντρώνεται σε τρία κρίσιμα υποσυστήματα: το σύστημα μετάδοσης δεδομένων, το σύστημα ελέγχου πτήσης και πλοήγησης και το σύστημα παροχής ισχύος.

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που επηρεάζουν τα UAVs κατά τη διάρκεια της πτήσης τους μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κύριες ομάδες: εσωτερικές και εξωτερικές EMI, όπως απεικονίζεται στον παρακάτω πίνακα:

Κατηγορία Ηλεκτρομαγνητικής Παρεμβολής	Τύπος Ηλεκτρομαγνητικής Παρεμβολής
Εσωτερική	Ατμοσφαιρικός θόρυβος Ακτινοβολία διαστήματος LEMP
Εξωτερική	CW HEMP UWB EMP HPM

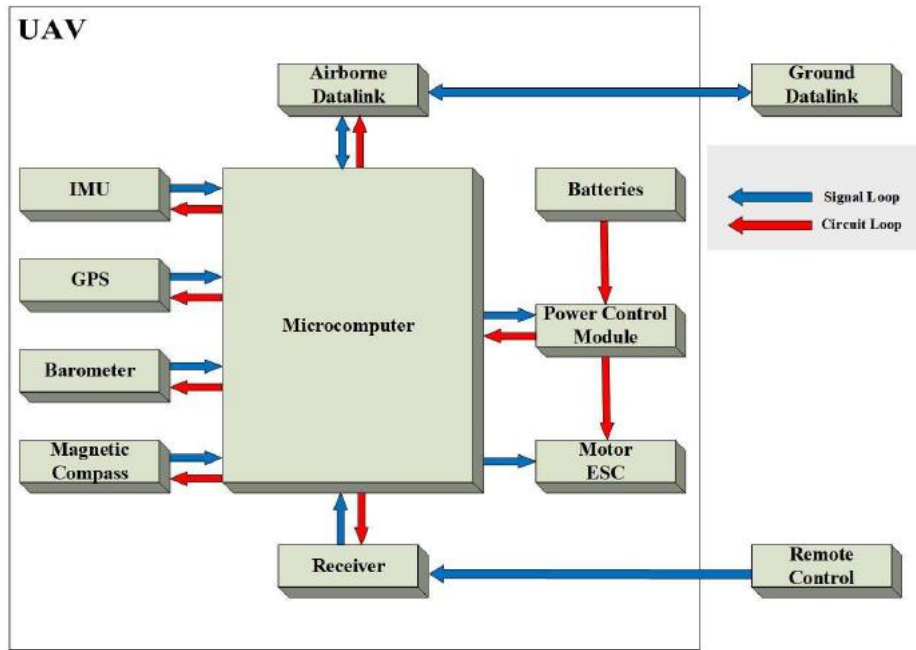
*Πίνακας 2: Πηγές ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών για μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα*  
**Πηγή:** Zhang et al., 2024

Η μελέτη των Zhang κ.ά. εστιάζει αποκλειστικά στις εξωτερικές EMI που προέρχονται από το περιβάλλον λειτουργίας. Ο όρος «ισχυρές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές» αναφέρεται στην παρουσία σημάτων ηλεκτρομαγνητικής διαταραχής υψηλού πλάτους, τα οποία εμφανίζονται κατά τη λειτουργία των ηλεκτρονικών συσκευών ή συστημάτων. Αυτά τα σήματα αξιολογούνται σε σχέση με το τυπικό λειτουργικό περιβάλλον των συστημάτων και έχουν τη δυνατότητα να επηρεάσουν σημαντικά τη λειτουργικότητά τους. Οι ισχυρές EMI περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα κυματομορφών, συμπεριλαμβανομένων των συνεχών κυμάτων (CW), των ηλεκτρομαγνητικών παλμών υψηλού υψομέτρου (HEMPs), των ηλεκτρομαγνητικών παλμών από κεραυνούς (LEMPs), των παλμών υπερ-ευρείας ζώνης (UWB EMPs), και των μικροκυμάτων υψηλής ισχύος (HPMs), όπως απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα:



**Εικόνα 14:** Φάσμα ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών παλμών  
**Πηγή:** Zhang et al., 2024

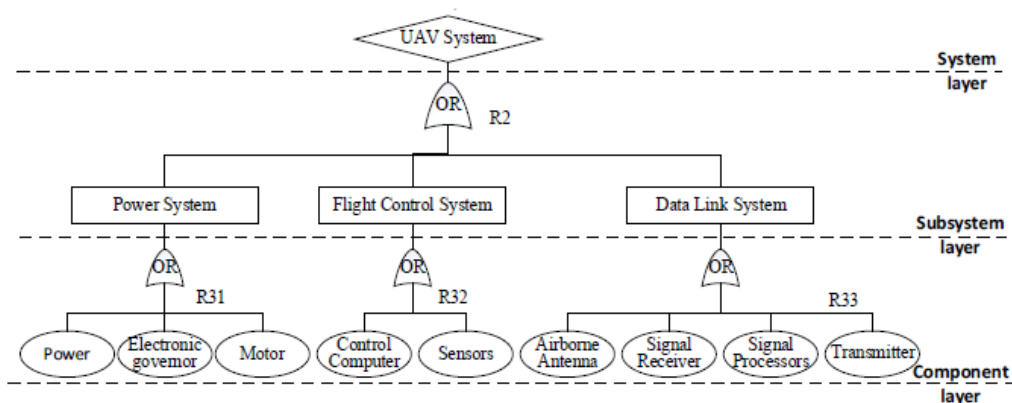
Τα UAVs, ως εξαιρετικά ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά συστήματα, αποτελούνται από πληθώρα ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Από μια συστημική προοπτική, το σύστημα UAV μπορεί να διαχωριστεί σε δύο βασικά κυκλώματα: το κύκλωμα σήματος και το κύκλωμα ισχύος (Zhang et al., 2020), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.



**Εικόνα 15:** Βρόχος σήματος και βρόχος κυκλώματος σε ένα UAV  
**Πηγή:** Zhang et al., 2024

Το κύκλωμα σήματος λειτουργεί ως το κανάλι μετάδοσης δεδομένων μεταξύ των επιμέρους στοιχείων του UAV ή μεταξύ του UAV και του επίγειου σταθμού ελέγχου, ενώ το κύκλωμα ισχύος αντιπροσωπεύει τα εσωτερικά κυκλώματα τροφοδοσίας του συστήματος. Οι ισχυρές EMI μπορούν να συζευχθούν με οποιοδήποτε από αυτά τα κυκλώματα, επηρεάζοντας ενδεχομένως τα εσωτερικά ηλεκτρονικά και εκθέτοντας το UAV σε διάφορους βαθμούς παρεμβολής και πιθανής βλάβης.

Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται καθένα από τα στοιχεία ενός UAV και το υποσύστημα στο οποίο ανήκει:



**Εικόνα 16:** Πρότυπο διάγραμμα των επιμέρους στοιχείων του ηλεκτρονικού συστήματος ενός UAV  
**Πηγή:** Yang et al., 2023

### 6.5.2.1 Επίδραση στο Σύστημα Μετάδοσης Δεδομένων

Το σύστημα μετάδοσης δεδομένων ενός UAV είναι ένα κρίσιμο κανάλι αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ του μη επανδρωμένου αεροσκάφους και του επίγειου σταθμού ελέγχου. Βασίζεται στην ασύρματη επικοινωνία και περιλαμβάνει μια ανοδική ζεύξη για τη μετάδοση σημάτων τηλεχειρισμού και μια καθοδική ζεύξη για την αναμετάδοση των δεδομένων κατάστασης και των οπτικών πληροφοριών.

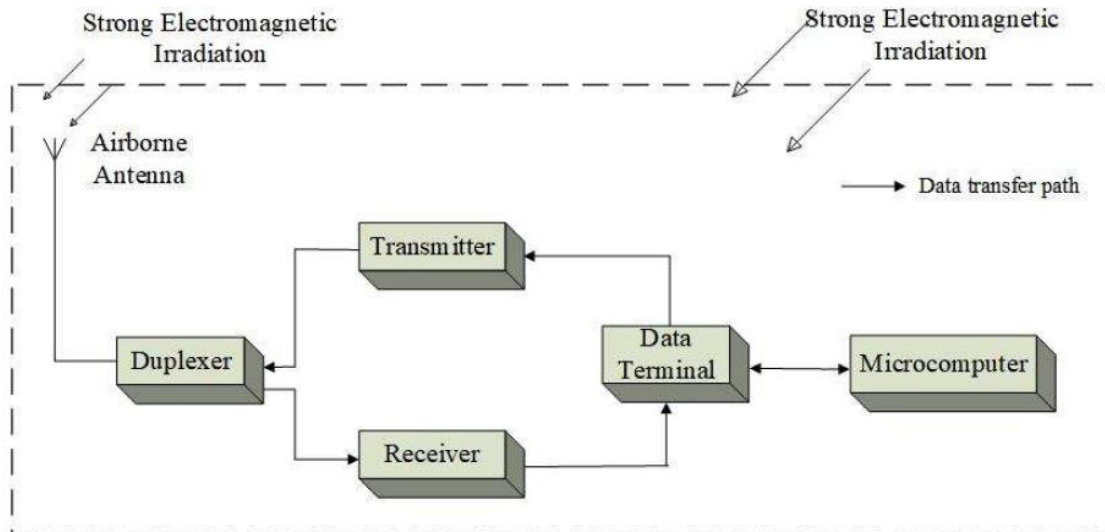
Ωστόσο, η κεραία του συστήματος διασύνδεσης δεδομένων δεν λειτουργεί αποκλειστικά ως δέκτης σημάτων ελέγχου από τον επίγειο σταθμό, αλλά αποτελεί επίσης πιθανή πύλη εισόδου για ανεπιθύμητη ισχυρή ηλεκτρομαγνητική ενέργεια στο εσωτερικό του συστήματος. Αυτή η διείσδυση μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω δύο κύριων μηχανισμών σύζευξης:

1. *Σύζευξη «μπροστινής πόρτας»* (front-door coupling): Είσοδος των μικροκυμάτων υψηλής ισχύος μέσω κεραιών και παρόμοιων στοιχείων.
2. *Σύζευξη «πίσω πόρτας»* (back-door coupling): Διείσδυση της ενέργειας μικροκυμάτων μέσω οπών και σχισμών στο περίβλημα της συσκευής.

Οι διαδικασίες βλάβης των μη επανδρωμένων αεροπορικών συστημάτων από μικροκύματα υψηλής ισχύος περιλαμβάνουν τρία στάδια:

1. **Ακτινοβολία:** Η ενέργεια μικροκυμάτων ακτινοβολείται στην επιφάνεια του στόχου.
2. **Σύζευξη:** Η ενέργεια εισέρχεται στο σύστημα μέσω των προαναφερθέντων μηχανισμών.
3. **Καταστροφή:** Προκαλείται ζημιά στα ηλεκτρονικά συστήματα μέσω θερμικών επιδράσεων ή ισχυρών ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων.

Τα εσωτερικά κυκλώματα του συστήματος διασύνδεσης δεδομένων UAV περιλαμβάνουν ευαίσθητα εξαρτήματα όπως ενισχυτές χαμηλού θορύβου, μίκτες και ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος (DSP: Digital Signal Processor). Αυτά τα εξαρτήματα είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε ισχυρές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ένα ευρύ φάσμα δυσλειτουργιών, από παροδική υποβάθμιση της απόδοσης έως και μόνιμη βλάβη των εξαρτημάτων.



*Εικόνα 17: Σύστημα μετάδοσης δεδομένων ενός UAV*  
**Πηγή:** Zhang et al., 2024

Η σύζευξη κυμάτων συνεχούς κύματος αποτελεί την πιο συνηθισμένη μορφή EMI, λειτουργώντας κυρίως σε χαμηλές συχνότητες. Σε αυτή την περίπτωση, η κεραία του UAV αποτελεί την πρωταρχική οδό σύζευξης για το σύστημα διασύνδεσης δεδομένων. Οι ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί, από την άλλη πλευρά, μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές, ακόμη και μόνιμες, βλάβες στα εσωτερικά ηλεκτρονικά εξαρτήματα του UAV. Η επίδραση των μικροκυμάτων υψηλής ισχύος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συχνότητα λειτουργίας του συστήματος διασύνδεσης δεδομένων.

Η ευαισθησία του συστήματος διασύνδεσης δεδομένων σε EMI επηρεάζεται από διάφορους κρίσιμους παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι η συχνότητα παρεμβολής. Όταν η συχνότητα του παρεμβαλλόμενου σήματος προσεγγίζει τη συχνότητα του σήματος τηλεχειρισμού, η απομόνωση των παρεμβαλλόμενων σημάτων από το ραδιοσυχνικό εμπρόσθιο άκρο καθίσταται ανεπαρκής. Επιπλέον, η πόλωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς η κατεύθυνση πόλωσης επηρεάζει σημαντικά το βαθμό παρεμβολής.

Η ένταση του πεδίου είναι ένας ακόμη καθοριστικός παράγοντας, ιδιαίτερα όσον αφορά τους ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς και την επίδρασή τους στα UAVs. Σε περιπτώσεις στενής ζώνης ισχυρών EMP, η συχνότητα των παλμών διαδραματίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στην επίδραση στο σύστημα διασύνδεσης δεδομένων.

Για την καλύτερη κατανόηση αυτών των φαινομένων, έχουν πραγματοποιηθεί εκτενείς προσομοιώσεις και αναλύσεις. Συγκεκριμένα, προσομοιώσεις με χρήση MATLAB έχουν καταδείξει τη σχέση μεταξύ του λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR: Signal-to-Noise Ratio)

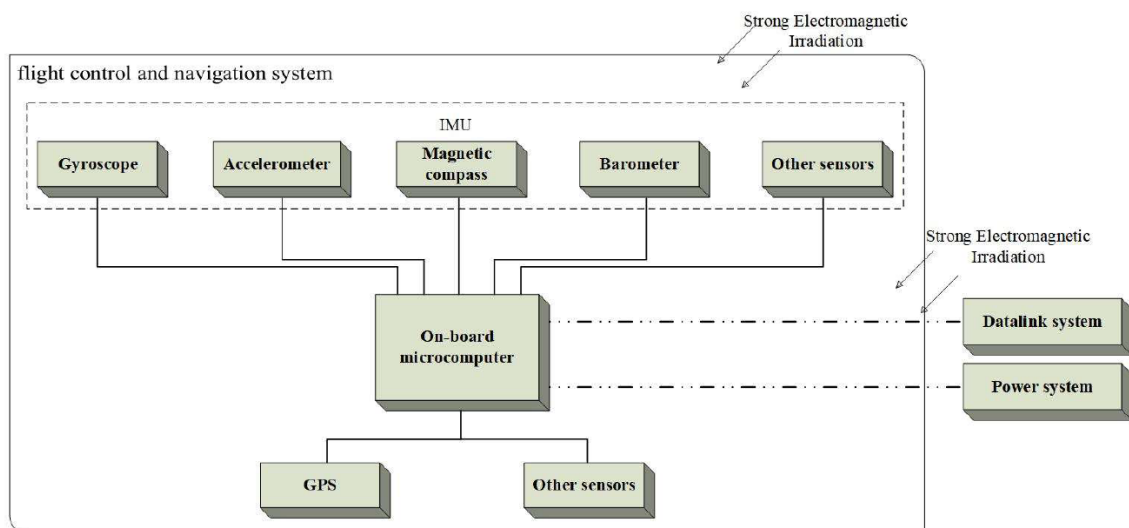
και του ρυθμού σφάλματος bit (BER: Bit Error Rate) σε περιβάλλον μονόσυχνης παρεμβολής. Προσομοιώσεις με SIMULINK επιβεβαίωσαν την επίδραση των HPM στο σύστημα διασύνδεσης δεδομένων, με τα αποτελέσματα να συμφωνούν με τις πειραματικές δοκιμές ακτινοβολίας.

Πρόσφατες έρευνες έχουν, επίσης, εστιάσει στην ανάλυση της επίδρασης διαφόρων κυματομορφών στην ποιότητα μετάδοσης εικόνας στο κανάλι καθόδου των δεδομένων. Τα ευρήματα δείχνουν ότι ο θόρυβος Gaussian, οι τετραγωνικοί παλμοί και οι παλμοί αιχμής επιδεικνύουν τη μεγαλύτερη επίδραση στο σύστημα μετάδοσης δεδομένων. Επιπλέον, έχει παρατηρηθεί ότι η ποιότητα μετάδοσης της εικόνας επηρεάζεται σημαντικά όταν οι τιμές του BER είναι παρόμοιες, ανεξαρτήτως της κυματομορφής.

Το σύστημα μετάδοσης δεδομένων των UAVs έχει αναδειχθεί ως ένα από τα πιο ευάλωτα υποσυστήματα στις ισχυρές EMI και αποτελεί αντικείμενο εντατικής ερευνητικής δραστηριότητας (Yang et al., 2023; Zhang et al., 2024 ).

#### 6.5.2.2 Επίδραση στο Σύστημα Πτήσης και Πλοήγησης

Το σύστημα πτήσης και πλοήγησης αποτελεί τον πυρήνα ενός μη επανδρωμένου αεροσκάφους, διαδραματίζοντας καθοριστικό ρόλο στην ομαλή λειτουργία και στον έλεγχο του οχήματος. Η δομή του συστήματος αυτού περιλαμβάνει τρία βασικά στοιχεία: τη μονάδα μέτρησης αδρανειακής κίνησης (IMU: Inertial Measurement Unit), έναν ενσωματωμένο μικροϋπολογιστή και έναν δέκτη GPS, όπως απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



**Εικόνα 18:** Σύστημα πτήσης και πλοήγησης ενός UAV  
**Πηγή:** Zhang et al., 2024

Η μονάδα μέτρησης αδρανειακής κίνησης ενσωματώνει εξειδικευμένους αισθητήρες που μετρούν με ακρίβεια την τριαξονική γωνία στάσης και τις παραμέτρους κίνησης του UAV. Ο ενσωματωμένος μικροϋπολογιστής λειτουργεί ως ο εγκέφαλος του συστήματος, αναλαμβάνοντας την επεξεργασία των σημάτων και τη λήψη κρίσιμων αποφάσεων για την πτήση. Τέλος, ο δέκτης GPS παρέχει ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τη θέση και την κατεύθυνση του οχήματος.

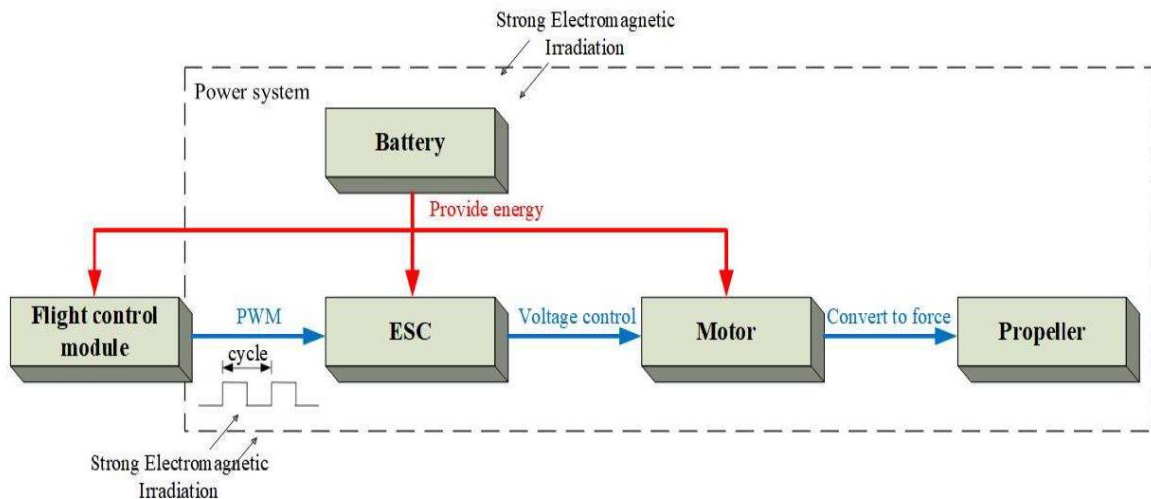
Το σύστημα πτήσης και πλοήγησης παρουσιάζει σημαντικές ευπάθειες σε ισχυρές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μπορούν να επηρεάσουν δραστικά την ακρίβεια των γυροσκοπίων και των μαγνητικών πυξίδων, οδηγώντας σε εσφαλμένη εκτίμηση της στάσης του αεροσκάφους και μειωμένη σταθερότητα της πτήσης. Επιπλέον, οι EMI έχουν τη δυνατότητα να αλλοιώσουν τα σήματα εντολών που εκπέμπονται από τον μικροϋπολογιστή, προκαλώντας ανώμαλη λειτουργία του UAV. Ιδιαίτερα ευάλωτος σε EMI είναι ο δέκτης GPS, λόγω της υψηλής ευαισθησίας που απαιτείται για την ακριβή λειτουργία του.

Τα συμπεράσματα της μελέτης υπογραμμίζουν τη σημαντική επίδραση των ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στα κρίσιμα συστήματα των UAVs. Τα ευρήματα αναδεικνύουν την επιτακτική ανάγκη για ανάπτυξη προηγμένων τεχνικών θωράκισης και προστασίας των ηλεκτρονικών συστημάτων των UAVs. Επιπλέον, κρίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός ανθεκτικών αλγορίθμων ελέγχου που θα μπορούν να αντισταθμίσουν αποτελεσματικά τις επιπτώσεις των EMI.

Οι μελλοντικές κατευθύνσεις της έρευνας θα πρέπει να περιλαμβάνουν περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών τύπων EMI σε συνδυασμό με ποικίλους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Επιπρόσθετα, η ανάπτυξη προηγμένων μεθόδων δοκιμών και πιστοποίησης για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των UAVs σε EMI αποτελεί μια κρίσιμη πτυχή της μελλοντικής έρευνας (Zhang et al., 2024).

#### 6.5.2.3 Επίδραση στο Σύστημα Ισχύος

Το σύστημα ισχύος είναι ζωτικής σημασίας για την πτήση των UAVs και αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία: μπαταρία, κινητήρα, ηλεκτρονικό έλεγχο ευστάθειας (ESC: Electronic Stability Control) και έλικα, όπως απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα (Zhang et al., 2024):



Εικόνα 19: Σύστημα ισχύος ενός UAV  
 Πηγή: Zhang et al., 2024

Ο κινητήρας και το ESC είναι κρίσιμα για τη σταθερότητα της πτήσης. Σε περιβάλλον ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, το σύστημα ισχύος μπορεί να υποστεί δυσλειτουργίες. Οι παρεμβολές μπορούν να εισέλθουν στο κύκλωμα μέσω σύζευξης στην πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (PCB: Printed Circuit Board) ή να επηρεάσουν τη διαμόρφωση του εύρους των παλμών (PWM: Pulse Width Modulation) μέσω της σύζευξης των καλωδίων. Οι έρευνες έχουν δείξει ότι (Zhang et al., 2024):

- Ισχυροί ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί μπορούν να προκαλέσουν αστοχία στο MOSFET του ESC.
- Ισχυρά μαγνητικά πεδία αυξάνουν σημαντικά το ρεύμα κορυφής των κινητήρων και επηρεάζουν την ταχύτητά τους, ανάλογα με τον αλγόριθμο ελέγχου.
- Μικροκύματα υψηλής ισχύος (HPM) μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στους κινητήρες και τα ESC, οδηγώντας σε πτώση του UAV.
- Τα καλώδια μεταξύ του μοντέλου ελέγχου πτήσης, ESC και κινητήρα αποτελούν την κύρια οδό σύζευξης για την ενέργεια HPM.
- Οι παλμοί HPM μπορούν να επηρεάσουν τα σήματα PWM, προκαλώντας απότομες αλλαγές στην ταχύτητα του κινητήρα.

### 6.5.3 Επίδραση των Υπερ-Ευρυζωνικών Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών

Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη έχουν αναδειχθεί σε κρίσιμο στοιχείο των σύγχρονων στρατιωτικών δυνάμεων, λόγω των πολλαπλών πλεονεκτημάτων τους, όπως η υψηλή ευελιξία, η ελαχιστοποίηση του κινδύνου απωλειών προσωπικού και το συγκριτικά χαμηλό κόστος λειτουργίας. Ωστόσο, ο περιορισμένος χώρος στο εσωτερικό των MEA επιβάλλει τη



συμπύκνωση πολλαπλών ηλεκτρονικών συστημάτων σε μικρό όγκο, γεγονός που αυξάνει την ευαισθησία τους σε ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Αυτή η τρωτότητα καθιστά επιτακτική την ανάγκη για εκτενή μελέτη και ανάπτυξη αποτελεσματικών μέτρων προστασίας.

Η μελέτη του Shukun (2019) εξετάζει την κρίσιμη σημασία της σύνδεσης δεδομένων για την αποτελεσματική λειτουργία των μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε συνθήκες μάχης, με ιδιαίτερη έμφαση στην ανθεκτικότητά τους έναντι των υπερ-ευρυζωνικών ηλεκτρομαγνητικών παλμών, οι οποίοι αναδεικνύονται ως σημαντική πηγή παρεμβολών, λόγω της υψηλής ισχύος, του ευρέος φάσματος συχνοτήτων και της εκτεταμένης περιοχής επίδρασής τους.

Για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των συστημάτων επικοινωνίας των UAV υπό την επίδραση των UWB, διεξήχθη μια σειρά πειραμάτων ακτινοβολίας. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στο φαινόμενο της «απώλειας κλειδώματος», ένα κρίσιμο ζήτημα για την ασφάλεια των επικοινωνιών. Τα αποτελέσματα κατέδειξαν μια σαφή συσχέτιση μεταξύ της έντασης της ακτινοβολίας UWB και της πιθανότητας «απώλειας κλειδώματος» του συστήματος επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ένα κρίσιμο κατώφλι έντασης στα 140 kV/m, πάνω από το οποίο η πιθανότητα μόνιμης βλάβης αυξανόταν εκθετικά (Shukun, 2019).

Τα πειραματικά δεδομένα κατέδειξαν μια σαφή συσχέτιση μεταξύ της έντασης και της συχνότητας των υπερ-ευρυζωνικών ηλεκτρομαγνητικών παλμών και της λειτουργικής ακεραιότητας του συστήματος συνδέσμου δεδομένων των UAV. Πιο αναλυτικά (Shukun, 2019):

- **Μονήρεις παλμοί:** Η εφαρμογή μεμονωμένων παλμών, ανεξαρτήτως απόστασης και σημείου ακτινοβολίας, δεν επέφερε απώλεια κλειδώματος ("lost lock") του συστήματος συνδέσμου δεδομένων. Αυτό υποδεικνύει ένα βαθμό ανθεκτικότητας του συστήματος σε βραχείες ηλεκτρομαγνητικές διαταραχές.
- **Κρίσιμες παράμετροι:** Παρατηρήθηκε ότι για αποστάσεις μικρότερες ή ίσες των 4 μέτρων και συχνότητες ακτινοβολίας άνω των 5Hz, το σύστημα εμφάνιζε σημαντική απώλεια δεδομένων και αδυναμία αποκατάστασης της επικοινωνίας. Το κρίσιμο κατώφλι έντασης ακτινοβολίας για την πρόκληση αυτής της δυσλειτουργίας προσδιορίστηκε στα 140 kV/m.
- **Συσχέτιση με την απόσταση:** Η παρατηρούμενη εξάρτηση από την απόσταση υποδηλώνει την ύπαρξη ενός χωρικού κατωφλίου, πέραν του οποίου η εξασθένηση του πεδίου είναι επαρκής για την πρόληψη καταστροφικών επιπτώσεων στο σύστημα.

Η διεξοδική ανάλυση του φαινομένου της απώλειας κλειδώματος αποκάλυψε τον ακόλουθο μηχανισμό (Shukun, 2019):

- **Πρωτογενής σύζευξη:** Ο UWB ηλεκτρομαγνητικός παλμός συζευγνύεται πρωτίστως με το σύστημα λήψης του drone μέσω της κεραίας του. Αυτή η σύζευξη αποτελεί το κύριο σημείο εισόδου των ηλεκτρομαγνητικών διαταραχών στο σύστημα.
- **Παρεμβολές στην επικοινωνία:** Η εισερχόμενη ηλεκτρομαγνητική ενέργεια προκαλεί σημαντικές παρεμβολές στο σύστημα επικοινωνίας, επηρεάζοντας την ακεραιότητα των μεταδιδόμενων δεδομένων.
- **Αδυναμία αποκατάστασης:** Η παρατεταμένη έκθεση σε υψηλής έντασης UWB παλμούς οδηγεί σε αδυναμία του συστήματος να αποκαταστήσει την επικοινωνία. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί σε δύο πιθανά σενάρια:
  - α) Ανωμαλία του σήματος εκπομπής.
  - β) Ανωμαλία του σήματος λήψης.
- **Εντοπισμός της πηγής βλάβης:** Μέσω ενδελεχούς διερεύνησης, αποκλείστηκε η πιθανότητα ανωμαλίας του σήματος εκπομπής. Η ανάλυση κατέδειξε ότι η κύρια αιτία της απώλειας κλειδώματος είναι η βλάβη του ενισχυτή χαμηλού θορύβου στον δέκτη του MEA.

## 6.6 Μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικής προστασίας

Στην παρούσα ενότητα αναλύονται οι διάφορες στρατηγικές και μέθοδοι για την προστασία των UAV έναντι των διαφόρων τύπων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

### 6.6.1 Προστασία έναντι των Ισχυρών Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών

Η ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών, όπως οι επιφάνειες επιλεκτικής συχνότητας (FSS: Frequency Selective Surface) και επιλεκτικής ενέργειας (ESS: Energy Storage System), καθώς και η χρήση προηγμένων συσκευών περιορισμού, αποτελούν καθοριστικά βήματα προς την ενίσχυση της ανθεκτικότητας των UAV σε απαιτητικά ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα (Zahng et al., 2024).

#### 6.6.1.2 Μέθοδοι Προστασίας από τη σύζευξη «πίσω-πόρτας»

Η προστασία έναντι της σύζευξης πίσω πόρτας αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα στην ηλεκτρομαγνητική θωράκιση των UAV. Το φαινόμενο αυτό περιλαμβάνει την είσοδο ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας στο εσωτερικό ενός ηλεκτρονικού συστήματος μέσω διαφόρων οδών, όπως ανοίγματα, γειώσεις, γραμμές τροφοδοσίας ή άμεση διείσδυση. Αυτή η διείσδυση δημιουργεί μια πολύπλοκη κατανομή ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, η οποία μπορεί να

επιηρεάσει δυσμενώς ευαίσθητα κυκλώματα ή εξαρτήματα, παρεμποδίζοντας την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Η στρατηγική προστασίας έναντι αυτής της παρεμβολής εστιάζει πρωτίστως στη μείωση της ενέργειας του εισερχόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, με την εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών ανάλογα με τα εκάστοτε μονοπάτια σύζευξης (Zahng et al., 2024).

#### *6.6.1.3 Προστασία μέσω Θωράκισης*

Η ηλεκτρομαγνητική θωράκιση (Shielding Protection) αποτελεί μια θεμελιώδη τεχνική για τον περιορισμό της διάδοσης ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών στο χώρο. Η μέθοδος αυτή υλοποιείται μέσω της περιβολής της συσκευής ή του κυκλώματος με ειδικά υλικά που προκαλούν εξασθένηση του σήματος παρεμβολής, είτε μέσω της ανάκλασης είτε μέσω της απορρόφησης. Στο πλαίσιο της ισχυρής ηλεκτρομαγνητικής προστασίας των UAV, οι κύριες εφαρμογές της θωράκισης επικεντρώνονται στο κέλυφος και στα καλώδια.

Πειραματικές μελέτες έχουν καταδείξει την αποτελεσματικότητα διαφόρων υλικών θωράκισης. Για παράδειγμα, η χρήση αλουμινόχαρτου στο κέλυφος ενός UAV αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική έναντι του ηλεκτρομαγνητικού παλμού κεραυνού (LEMP), μειώνοντας τη μέγιστη τάση στο εσωτερικό της καμπίνας του UAV σε μόλις 1 V υπό συνθήκες παλμικού κεραυνού 150 kV. Επιπρόσθετα, έρευνες έχουν αξιολογήσει την απόδοση προηγμένων υλικών, όπως οι σύνθετες ίνες άνθρακα και το οξείδιο του γραφενίου, σε εφαρμογές θωράκισης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητά τους για χρήση σε UAV.

Προσομοιώσεις που διεξήχθησαν με το λογισμικό COMSOL Multiphysics έχουν παράσχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με την επίδραση του LEMP σε διάφορα τμήματα του UAV, συμπεριλαμβανομένης της ατράκτου και των πτερυγίων. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων καταδεικνύουν ότι η κατάλληλη επικάλυψη της επιφάνειας του κελύφους με ηλεκτρικά αγωγικά υλικά μπορεί να αποτρέψει αποτελεσματικά την είσοδο κεραυνού στο UAV. Επιπλέον, οι μελέτες αυτές ανέδειξαν τη σημαντική επίδραση που έχουν οι θέσεις των ανοιγμάτων στο κέλυφος και η κατεύθυνση πόλωσης του εισερχόμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στην απόδοση της θωράκισης (Zahng et al., 2024).

#### *6.6.1.4 Θωράκιση Καλωδίων*

Τα καλώδια, ως βασικοί αγωγοί για τη μετάδοση πληροφοριών και ενέργειας μεταξύ των ηλεκτρονικών συστημάτων των UAV, είναι ιδιαίτερα ευάλωτα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές λόγω της άμεσης έκθεσής τους σε πολύπλοκα ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα. Η θωράκιση των καλωδίων (Cable Shielding) αποτελεί μια κρίσιμη τεχνική για τη μείωση της

ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που συζευγνύεται σε αυτά, ενισχύοντας έτσι την αντίστασή τους στις εξωτερικές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Εκτενείς έρευνες έχουν καταδείξει ότι η αποτελεσματικότητα της θωράκισης καλωδίων εξαρτάται από πολλαπλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένου του τύπου των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και των δομικών παραμέτρων της θωράκισης. Επιπλέον, η χωρική διάταξη των καλωδίων εντός του UAV έχει αποδειχθεί ότι επηρεάζει σημαντικά την απόδοση της θωράκισης. Βάσει αυτών των ευρημάτων, προτείνονται στρατηγικές για τη βελτιστοποίηση της προστασίας, οι οποίες περιλαμβάνουν τον προσεκτικό σχεδιασμό των διαδρομών τοποθέτησης καλωδίων και την εφαρμογή προηγμένων μεθόδων γείωσης.

Προσομοιώσεις υψηλής ακρίβειας έχουν αναδείξει τη σημαντική επίδραση που έχουν η διάταξη και ο τύπος των καλωδίων στις επαγόμενες τάσεις σε περιβάλλοντα ισχυρού ηλεκτρομαγνητικού παλμού. Αυτά τα ευρήματα υπογραμμίζουν τη σημασία της ολιστικής προσέγγισης στο σχεδιασμό της καλωδίωσης των UAV, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις ηλεκτρικές όσο και τις γεωμετρικές παραμέτρους (Zahng et al., 2024).

#### *6.6.1.5 Προστασία από Αγωγιμότητα*

Σε περιβάλλοντα με έντονη ηλεκτρομαγνητική δραστηριότητα, οι αγωγοί εντός των UAV, συμπεριλαμβανομένων των καλωδίων, μπορούν να λειτουργήσουν ως μέσα σύζευξης ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, μεταφέροντας ανεπιθύμητες τάσεις ή ρεύματα στα εσωτερικά συστήματα. Η προστασία από αγωγιμότητα (Conduction Protection) στοχεύει στην αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου μέσω της στρατηγικής τοποθέτησης μη γραμμικών κυκλωματικών στοιχείων κατά μήκος των καλωδίων του UAV. Αυτά τα στοιχεία λειτουργούν είτε μέσω περιορισμού της τάσης, είτε μέσω απελευθέρωσης του ρεύματος, με σκοπό τη μείωση των επιδράσεων των παρεμβολών.

Οι κύριες μέθοδοι προστασίας από αγωγιμότητα περιλαμβάνουν τεχνικές περιορισμού και φιλτραρίσματος. Σε αντίθεση με την προστασία από τη σύζευξη «μπροστινής πόρτας» όπου οι τεχνολογίες περιορισμού εφαρμόζονται κυρίως στα συστήματα λήψης, στην προστασία από αγωγιμότητα, οι τεχνολογίες προστασίας εφαρμόζονται στα εσωτερικά καλώδια του UAV. Ο στόχος είναι η αποτροπή της διάδοσης των παρεμβολών στο εσωτερικό σύστημα του drone (Zhang et al., 2024).

#### **6.6.2 Προστασία έναντι των Ηλεκτρομαγνητικών Παλμών Υπερ-Ευρείας Ζώνης**

Η έρευνα των Shukun κ.ά. (2019) ανέδειξε δύο κύριους άξονες για την ενίσχυση της προστασίας των UAV έναντι των UWB ηλεκτρομαγνητικών παλμών:

- Μείωση της σύζευξης ενέργειας των παλμών από την κεραία:

- Με εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης στο εμπρόσθιο τμήμα της κεραίας του UAV.
- Με χρήση επιλεκτικής επιφάνειας συχνοτήτων για χωρικό περιορισμό της εισόδου του παλμού.
- Μείωση της ενέργειας των παλμών που φθάνει στο εμπρόσθιο μέρος του κυκλώματος ραδιοσυχνότητας:
  - Με ενσωμάτωση εξελιγμένων φίλτρων και ορίων (limiters) πριν από τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα.
  - Με αξιοποίηση προηγμένων τεχνολογιών όπως PIN limiters, περιοριστές αερίου πλάσματος, ταχύτατοι διακόπτες μικροκυμάτων, φερρίτες<sup>10</sup> και υπεραγώγιμα όρια.

#### *6.6.2.1 Μείωση της Σύζευξης της Κεραίας με τον Ηλεκτρομαγνητικό Παλμό*

Η εφαρμογή ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης στο εμπρόσθιο τμήμα της κεραίας ενός UAV αποτελεί μια αποτελεσματική μέθοδο για τη μείωση της σύζευξης με τον UWB παλμό. Η επιλεκτική επιφάνεια συχνοτήτων αναδεικνύεται ως μια ιδιαίτερα ελπιδοφόρα τεχνολογία για αυτόν τον σκοπό. Πρόκειται για μια δισδιάστατη ή τρισδιάστατη μεταλλική περιοδική δομή, που επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων εντός της ζώνης διέλευσης, ενώ ανακλά ισχυρά τα κύματα εκτός αυτής. Η επιλεκτική σύζευξη που προσφέρει η FSS μπορεί να μειώσει σημαντικά την ενέργεια του UWB παλμού που συζευγνύεται με την κεραία, χωρίς να επηρεάζει τη λειτουργικότητα του συστήματος επικοινωνίας (Shukun, et al., 2019).

#### *6.6.2.2 Μείωση της Ενέργειας του Ηλεκτρομαγνητικού Παλμού στο Εμπρόσθιο Μέρος του Κυκλώματος Ραδιοσυχνότητας*

Η προσθήκη εξελιγμένων φίλτρων και ορίων (limiters) πριν από τα ευαίσθητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα ενός UAV αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της στρατηγικής προστασίας. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη χρήση PIN limiter. Μία τέτοια διάταξη αποτελείται από μια δίοδο PIN με τρεις περιοχές - έντονα προσμεμιγμένη P+, έντονα προσμεμιγμένη N+ και ελαφρώς προσμεμιγμένη ενδιάμεση περιοχή I. Όταν η διάταξη αυτή ενεργοποιείται, οι φορείς φορτίου διέρχονται μέσω της ενδιάμεσης περιοχής και ανασυνδυάζονται. Το αποτέλεσμα αυτού του ανασυνδυασμού είναι η αποφόρτιση της ενέργεια του UWB παλμού στη γη, παρέχοντας αποτελεσματική ηλεκτρομαγνητική προστασία. Τοποθετείται συνήθως στο εμπρόσθιο μέρος

---

<sup>10</sup> Ο φερρίτης είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται συχνά σε ηλεκτρονικές εφαρμογές για την καταστολή των ανεπιθύμητων ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Είναι ένα είδος κεραμικού υλικού, συνήθως αποτελούμενο από οξειδία σιδήρου αναμειγμένα με άλλα μέταλλα όπως μαγγάνιο, νικέλιο ή ψευδάργυρο.

του κυκλώματος ραδιοσυχνοτήτων για την προστασία του ενισχυτή χαμηλού θορύβου και του μίκτη έναντι των υψηλής ισχύος ηλεκτρομαγνητικών παλμών (Shukun, et al., 2019).

#### *6.6.2.3 Πολλαπλές Μέθοδοι Προστασίας*

Η πολυπλοκότητα της απειλής που θέτουν οι UWB παλμοί καθιστά επιτακτική την ανάγκη για ανάπτυξη προηγμένων μεθόδων ηλεκτρομαγνητικής προστασίας. Ωστόσο, λόγω των προαναφερθέντων χαρακτηριστικών του UWB παλμού, η πλήρης προστασία των ευαίσθητων εξαρτημάτων ενός UAV με μία μόνο μέθοδο προστασίας κρίνεται ανεπαρκής και τεχνικά ανέφικτη.

Συνεπώς, προτείνεται η ταυτόχρονη εφαρμογή πολλαπλών, συμπληρωματικών μεθόδων ηλεκτρομαγνητικής προστασίας. Αυτές μπορεί να περιλαμβάνουν:

1. Προηγμένη ηλεκτρομαγνητική θωράκιση με υλικά υψηλής αγωγιμότητας και μαγνητικής διαπερατότητας.
2. Εφαρμογή τοπολογιών κυκλωμάτων ανθεκτικών σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
3. Χρήση εξελιγμένων διατάξεων προστασίας από υπερτάσεις, όπως διόδους ταχείας απόκρισης και varistors.
4. Βελτιστοποίηση της γείωσης και της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας του συνολικού συστήματος.
5. Ενσωμάτωση αλγορίθμων αυτο-επανάκαμψης σε περίπτωση προσωρινής δυσλειτουργίας.

Η συνδυαστική εφαρμογή αυτών των μεθόδων στοχεύει στη σημαντική βελτίωση της επιβιωσιμότητας των drones στο ολοένα και πιο σύνθετο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον των σύγχρονων και μελλοντικών πεδίων μάχης. Η έρευνα σε αυτόν τον τομέα κρίνεται ζωτικής σημασίας, καθώς η αυξανόμενη εξάρτηση από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη τόσο σε στρατιωτικές όσο και σε πολιτικές εφαρμογές απαιτεί τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και ανθεκτικότητάς τους έναντι των προηγμένων ηλεκτρομαγνητικών απειλών (Shukun, et al., 2019).

#### *6.6.3 Νέες Τεχνολογίες Ισχυρής Ηλεκτρομαγνητικής Προστασίας*

Η ραγδαία εξέλιξη του ηλεκτρομαγνητικού περιβάλλοντος, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα και τη σμίκρυνση των ηλεκτρονικών συστημάτων, έχει δημιουργήσει νέες προκλήσεις στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής προστασίας των UAVs. Οι παραδοσιακές μέθοδοι προστασίας αποδεικνύονται συχνά ανεπαρκείς για την αντιμετώπιση των σύγχρονων απαιτήσεων, ενώ απαιτείται η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών και υλικών (Zhang et al., 2024).

### 6.6.3.1 Νέα Υλικά και Τεχνολογίες Ηλεκτρομαγνητικής Προστασίας

1. **Προηγμένα Υλικά Ηλεκτρομαγνητικής Θωράκισης:** Πρόσφατες έρευνες έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων σύνθετων υλικών με εξαιρετικές ιδιότητες ηλεκτρομαγνητικής θωράκισης. Νανοσύνθετα υλικά με βάση το γραφένιο έχουν επιδείξει εξαιρετική απόδοση στην απορρόφηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Αυτά τα υλικά προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά το βάρος και την ευελιξία, καθιστώντας τα ιδανικά για εφαρμογές στα μη επανδρωμένα αεροσκάφη.
2. **Ηλεκτρομαγνητική Βιονική Τεχνολογία:** Εμπνευσμένη από βιολογικά συστήματα, η ηλεκτρομαγνητική βιονική τεχνολογία αξιοποιεί δομές και μηχανισμούς που απαντώνται στη φύση για τη βελτίωση της ηλεκτρομαγνητικής προστασίας. Για παράδειγμα, μεταύλικά που μιμούνται τη δομή των φτερών πεταλούδας έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικά στην απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε συγκεκριμένες ζώνες συχνοτήτων.
3. **Προσαρμοστική Ηλεκτρομαγνητική Προστασία:** Τα συστήματα προσαρμοστικής ηλεκτρομαγνητικής προστασίας χρησιμοποιούν προηγμένους αλγορίθμους και έξυπνα υλικά για τη δυναμική προσαρμογή της θωράκισης ανάλογα με τις μεταβαλλόμενες ηλεκτρομαγνητικές συνθήκες. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της προστασίας σε πραγματικό χρόνο, αυξάνοντας σημαντικά την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα των συστημάτων προστασίας.

### 6.6.3.2 Καινοτόμες Λύσεις Λογισμικού

1. **Αυτόματη Επανεκκίνηση και Αποκατάσταση:** Πρόσφατες μελέτες έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη εξελιγμένων λύσεων λογισμικού που επιτρέπουν την αυτόματη επανεκκίνηση και αποκατάσταση των συστημάτων πτήσης και πλοήγησης των UAVs μετά από ισχυρές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Αυτές οι λύσεις βασίζονται σε προηγμένους αλγορίθμους ανίχνευσης σφαλμάτων και μηχανισμούς ταχείας επαναφοράς, διασφαλίζοντας την ελαχιστοποίηση του χρόνου διακοπής λειτουργίας.
2. **Τεχνικές Καταστολής Στενής Ζώνης Παρεμβολών:** Η εφαρμογή τεχνικών καταστολής στενής ζώνης παρεμβολών, βασισμένων σε προηγμένους αλγορίθμους επεξεργασίας σήματος όπως ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα αποτελεσματική. Αυτές οι τεχνικές επιτρέπουν την ακριβή αναγνώριση και εξάλειψη συγκεκριμένων παρεμβολών, βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα των επικοινωνιών σε δίκτυα UAV.

3. **Γνωστική Επικοινωνία για Σμήνη UAVs:** Καινοτόμες μέθοδοι αντιπαρεμβολής που βασίζονται σε τεχνολογίες γνωστικής επικοινωνίας έχουν αναπτυχθεί ειδικά για την επικοινωνία σε σμήνη UAVs. Αυτές οι μέθοδοι αξιοποιούν τεχνικές όπως η δυναμική ανίχνευση φάσματος και η προσαρμοστική πρόσβαση στο φάσμα, επιτρέποντας την αποτελεσματική επικοινωνία ακόμη και σε περιβάλλοντα με έντονες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

#### 6.6.3.3 Εξειδικευμένες Προσεγγίσεις ανά Τύπο UAV και Σενάριο Πτήσης

Η ηλεκτρομαγνητική προστασία των UAVs απαιτεί εξειδικευμένες προσεγγίσεις ανάλογα με τον τύπο του αεροσκάφους και το σενάριο πτήσης:

1. **Περιστροφικά UAVs (Rotary-wing UAVs):** Λόγω της πολύπλοκης δομής τους με πολλαπλούς περιστρεφόμενους κινητήρες και της υψηλής ενσωμάτωσης συσκευών, τα περιστροφικά UAVs απαιτούν ολιστικές λύσεις προστασίας. Αυτές περιλαμβάνουν:
  - Προηγμένα σχήματα θωράκισης για την ελαχιστοποίηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των εσωτερικών εξαρτημάτων.
  - Εξελιγμένα συστήματα φιλτραρίσματος για την αντιμετώπιση των ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών από τους κινητήρες.
  - Τεχνικές ενεργού ελέγχου θορύβου για τη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που προκαλούνται από τα περιστρεφόμενα μέρη.
2. **Σταθερά UAVs (Fixed-wing UAVs):** Τα σταθερά UAVs, με την απλούστερη δομή τους, επικεντρώνονται κυρίως στην προστασία των κρίσιμων συστημάτων επικοινωνίας και πλοήγησης. Οι εξειδικευμένες λύσεις περιλαμβάνουν:
  - Προηγμένα συστήματα κεραιών με ενσωματωμένη ηλεκτρομαγνητική θωράκιση.
  - Τεχνικές διαφορικής λήψης σήματος για βελτιωμένη ανθεκτικότητα στις παρεμβολές.
  - Εφαρμογή αλγορίθμων προσαρμοστικού φιλτραρίσματος για την ενίσχυση της ποιότητας του σήματος σε περιβάλλοντα με υψηλό θόρυβο.
3. **Εξειδίκευση ανά Σενάριο Πτήσης:**
  - *UAVs για Αεροφωτογραφία και Εφοδιαστική:* Έμφαση στην εσωτερική ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με χρήση προηγμένων τεχνικών απομόνωσης και φιλτραρίσματος για τη διασφάλιση της ακρίβειας των αισθητήρων και των συστημάτων απεικόνισης.



- *UAVs για Έρευνες Ηλεκτρικής Ενέργειας:* Εφαρμογή πολυεπίπεδων στρατηγικών προστασίας, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης προηγμένων υλικών θωράκισης και ενεργών συστημάτων καταστολής παρεμβολών.
- *UAVs για Πτήσεις σε Μεγάλα Ύψη:* Ανάπτυξη εξειδικευμένων λύσεων για την αντιμετώπιση των μοναδικών προκλήσεων που θέτει το ιονοσφαιρικό περιβάλλον, όπως η χρήση προσαρμοστικών αλγορίθμων διόρθωσης σφαλμάτων και τεχνικών ενίσχυσης σήματος.

## **6.7 Εναλλακτικές Μέθοδοι Παρεμβολής σε Συστήματα UAV: Ακουστικές και Οπτικές Τεχνικές**

Ενώ οι συμβατικές μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών υψηλής και χαμηλής ισχύος βασίζονται κυρίως σε ραδιοσυχνότητες, η αποτελεσματικότητά τους μπορεί να περιοριστεί από τα χαρακτηριστικά των στοχευόμενων συστημάτων. Ιδιαίτερα στην περίπτωση των σύγχρονων ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, οι μικροσκοπικές διαστάσεις και τα υψηλά επίπεδα τάσης λειτουργίας καθιστούν τις παρεμβολές RF συχνά αναποτελεσματικές. Αυτοί οι περιορισμοί έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη εναλλακτικών μεθόδων παρεμβολής, με έμφαση στη χρήση ακουστικών σημάτων και οπτικών τεχνικών (Kim et al., 2022).

### **6.7.1 Ακουστικές Μέθοδοι Παρεμβολής**

Οι Son et al. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Kim et al., 2022) πρωτοπόρησαν στη χρήση ακουστικών σημάτων για την υποβάθμιση της απόδοσης των γυροσκοπίων των μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων των UAVs. Η έρευνά τους αποκάλυψε ότι τα γυροσκόπια παρουσιάζουν συχνότητες συντονισμού εντός του ακουστικού φάσματος, καθιστώντας τα ευάλωτα σε στοχευμένες ακουστικές παρεμβολές. Σε μια εκτενή μελέτη 15 διαφορετικών τύπων γυροσκοπίων, διαπιστώθηκε ότι σχεδόν το 50% (7 από τα 15) είχαν συχνότητες συντονισμού στο ακουστικό εύρος. Πειραματικές επιθέσεις σε δύο ευάλωτους τύπους γυροσκοπίων επιβεβαίωσαν ότι η υποβάθμιση της απόδοσής τους οδηγεί σε σημαντική αστάθεια στην πτήση του UAV.

Επεκτείνοντας αυτή την προσέγγιση, οι Trippel et al. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Kim et al., 2022) διερεύνησαν την επίδραση των ακουστικών σημάτων στα επιταχυνσιόμετρα των μικροηλεκτρονικών συστημάτων. Η μελέτη τους κατέδειξε τη δυνατότητα χειραγώγησης των δεδομένων του επιταχυνσιόμετρου μέσω προσεκτικά σχεδιασμένων ακουστικών σημάτων, υπογραμμίζοντας την ευπάθεια των συστημάτων αδρανειακής πλοήγησης σε τέτοιου είδους επιθέσεις.

Μια πιο ακραία προσέγγιση προτάθηκε από τους Martin et al. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Kim et al., 2022), οι οποίοι εξέτασαν τη χρήση κατευθυνόμενης ακουστικής ενέργειας υπό μορφή κρουστικών κυμάτων, παραγόμενων από εκρηκτικά C-4. Αν και αυτή η μέθοδος αποδείχθηκε αποτελεσματική, η καταστροφική της φύση την καθιστά λιγότερο πρακτική για εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια και ελεγχόμενη παρεμβολή (Kim et al., 2022).

### **6.7.2 Οπτικές Μέθοδοι Παρεμβολής**

Παράλληλα με τις ακουστικές τεχνικές, οι ερευνητές έχουν στραφεί και στη χρήση οπτικών μεθόδων παρεμβολής. Οι Davidson et al. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Kim et al., 2022) επικεντρώθηκαν στην παρεμβολή αισθητήρων οπτικής ροής, χρησιμοποιώντας λέιζερ και προβολείς υψηλής έντασης. Η μέθοδός τους βασίζεται στην παραμόρφωση της οπτικής εισόδου του αισθητήρα, επηρεάζοντας έτσι την ικανότητα του UAV να εκτιμήσει την κίνησή του. Τα πειράματά τους, που διεξήχθησαν σε ποικίλα περιβάλλοντα (πλακάκια, χαλιά, σκυρόδεμα), έδειξαν σημαντική αποτελεσματικότητα, με εξαίρεση επιφάνειες όπως το γρασίδι, όπου η οπτική ροή παρέμεινε σχετικά ανεπηρέαστη.

Οι Shin et al. (όπως αναφέρεται στην έρευνα των Kim et al., 2022) διεύρυναν περαιτέρω το πεδίο των οπτικών παρεμβολών, εστιάζοντας στους αισθητήρες LiDAR (Light Detection and Ranging). Πρότειναν δύο διακριτές μεθόδους:

- Κορεσμός του αισθητήρα με τη χρήση ισχυρών οπτικών σημάτων για την υπερφόρτωση του αισθητήρα LiDAR.
- Εξαπάτηση μέσω αναμετάδοσης με τη μίμηση του μηχανισμού λειτουργίας του LiDAR για την παραπλάνηση του συστήματος σχετικά με τις πραγματικές αποστάσεις.

Αυτές οι τεχνικές εκμεταλλεύονται την αρχή λειτουργίας του LiDAR, που βασίζεται στη μέτρηση του χρόνου διέλευσης των παλμών λέιζερ για τον υπολογισμό των αποστάσεων.

Συμπερασματικά, οι εναλλακτικές μέθοδοι παρεμβολής, όπως οι ακουστικές και οπτικές τεχνικές, προσφέρουν νέες προοπτικές στην αντιμετώπιση των σύγχρονων UAV. Αυτές οι προσεγγίσεις παρακάμπτουν τους περιορισμούς των συμβατικών παρεμβολών ραδιοσυχνοτήτων και αναδεικνύουν νέες ευπάθειες στα συστήματα αισθητήρων των UAV. Ωστόσο, η ανάπτυξη αποτελεσματικών αντιμέτρων παραμένει κρίσιμη για τη διασφάλιση της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των UAV σε ποικίλες εφαρμογές (Kim et al., 2022).

## **7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ, ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**

### **7.1 Συμπεράσματα**

Η παρούσα μελέτη καταδεικνύει την αυξανόμενη ευπάθεια των μη επανδρωμένων αεροσκαφών σε ισχυρές ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ένα φαινόμενο που έχει καταστεί ιδιαίτερα εμφανές με τη ραγδαία επέκταση της αγοράς των drones και την ολοένα αυξανόμενη πολυπλοκότητα των ενσωματωμένων συστημάτων τους. Η συστηματική ανάλυση των πειραματικών δεδομένων αποκάλυψε ότι:

- Η απώλεια κλειδώματος του συστήματος συνδέσμου δεδομένων οφείλεται πρωτίστως στη βλάβη του ενισχυτή χαμηλού θορύβου στα εσωτερικά κυκλώματα του UAV. Αυτή η διαπίστωση υπογραμμίζει την κρισιμότητα του LNA ως ευαίσθητου σημείου στην αρχιτεκτονική των UAVs.
- Οι παλμοί υπερ-ευρείας ζώνης αποδείχθηκαν ιδιαίτερα επιζήμιοι για τα UAVs, λόγω του εξαιρετικά ταχέως χρόνου ανόδου (της τάξης των picoseconds) και της μεγάλης ακτινοβολούμενης ισχύος (που μπορεί να φτάσει τα gigawatts). Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν στους UWB παλμούς να παρακάμπτουν συμβατικές μεθόδους θωράκισης και να επάγουν υψηλές τάσεις στα εσωτερικά κυκλώματα, οδηγώντας σε καταστροφική βλάβη των ημιαγωγών.
- Οι συμβατικές τεχνικές προστασίας συχνά αδυνατούν να ανταποκριθούν επαρκώς στις σύγχρονες απαιτήσεις προστασίας από ισχυρές EMI. Η εφαρμογή καινοτόμων προστατευτικών υλικών και τεχνολογιών, αν και είναι πολλά υποσχόμενη, βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο ερευνητικό στάδιο και δεν έχει ενσωματωθεί ουσιαστικά στη διαδικασία σχεδιασμού και κατασκευής των UAVs.

### **7.2 Περιορισμοί**

Παρά τα σημαντικά ευρήματα, η παρούσα μελέτη υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς:

- Η πλήρης προστασία των ευαίσθητων εξαρτημάτων του UAV με μία μόνο μέθοδο προστασίας κρίνεται ανεπαρκής και τεχνικά ανέφικτη, λόγω της πολυπλοκότητας των UWB παλμών.
- Οι υφιστάμενες πειραματικές μεθοδολογίες ενδέχεται να μην αποτυπώνουν πλήρως τη συσχέτιση μεταξύ μακροσκοπικών φαινομένων και υποκείμενων μικροσκοπικών μηχανισμών που προκαλούνται από τις ηλεκτρονικές παρεμβολές.

- Τα τρέχοντα μοντέλα προσομοίωσης ενδέχεται να μην λαμβάνουν επαρκώς υπόψη όλες τις ιδιαίτερες δομικές και υλικές παραμέτρους των UAVs.
- Η ανάλυση των μηχανισμών αστοχίας δεν έχει ακόμη συστηματοποιηθεί πλήρως, περιορίζοντας την κατανόηση της σχέσης μεταξύ της ζημιάς σε μεμονωμένα εξαρτήματα και της συνολικής αστοχίας του συστήματος UAV.

### 7.3 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Λαμβάνοντας υπόψη τα ευρήματα και τους περιορισμούς της παρούσας μελέτης, προτείνονται οι ακόλουθες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα:

- Ενσωμάτωση αλγορίθμων αυτο-επανάκαμψης σε περίπτωση προσωρινής δυσλειτουργίας.
- Ενίσχυση των πειραματικών μεθοδολογιών μέσω:
  - Ενσωμάτωσης προηγμένων τεχνικών παρακολούθησης, όπως η χρήση αισθητήρων υψηλής ακρίβειας.
  - Εφαρμογής τεχνικών μη καταστροφικού ελέγχου.
- Βελτίωση των μοντέλων προσομοίωσης μέσω:
  - Ανάπτυξης πιο εξελιγμένων αλγορίθμων που λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαίτερες δομικές και υλικές παραμέτρους των UAVs.
  - Χρήσης τεχνικών μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης για τη βελτίωση της ακρίβειας των προσομοιώσεων.
  - Ενσωμάτωσης πολυφυσικών μοντέλων που συνδυάζουν ηλεκτρομαγνητικά, θερμικά και μηχανικά φαινόμενα.
- Ανάπτυξη και ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών προστασίας, όπως:
  - Χρήση προηγμένων μεταϋλικών.
  - Ανάπτυξη ενεργών συστημάτων προστασίας.
  - Εφαρμογή τεχνικών αυτο-επούλωσης για την αντιμετώπιση των επιπτώσεων των ισχυρών EMI.
- Συστηματοποίηση της ανάλυσης μηχανισμών αστοχίας μέσω:
  - Ανάπτυξης ολοκληρωμένων μοντέλων που περιγράφουν τη σχέση μεταξύ ζημιάς σε μεμονωμένα εξαρτήματα και συνολικής αστοχίας του συστήματος UAV.
  - Διεξαγωγής λεπτομερών αναλύσεων αξιοπιστίας.
  - Ανάπτυξης προηγμένων τεχνικών διάγνωσης και πρόγνωσης βλαβών.

- Ανάπτυξη πρακτικών και οικονομικά αποδοτικών μεθόδων προστασίας, συμπεριλαμβανομένων, όπως της εφαρμογής τεχνικών τρισδιάστατης εκτύπωσης για την κατασκευή εξειδικευμένων προστατευτικών δομών.
- Διερεύνηση της εφαρμογής των προτεινόμενων μεθόδων σε ευρύτερο φάσμα ηλεκτρονικών συστημάτων, πέραν των UAV.
- Ανάπτυξη προτύπων και κατευθυντήριων γραμμών για την εφαρμογή αυτών των τεχνικών σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας.

Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν τη μελέτη των επιπτώσεων της IEMI σε αναδύμενες τεχνολογίες, όπως τα συστήματα 5G και το Internet of Things (IoT), την ανάπτυξη προσαρμοστικών συστημάτων προστασίας που μπορούν να ανταποκρίνονται δυναμικά σε διάφορους τύπους ηλεκτρομαγνητικών απειλών, καθώς και τη μελέτη των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων της έκθεσης σε IEMI στην αξιοπιστία και τη διάρκεια ζωής των ηλεκτρονικών συστημάτων.

Συμπερασματικά, η συνεχής έρευνα και ανάπτυξη στον τομέα της ηλεκτρομαγνητικής προστασίας των UAVs είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της ασφάλειάς τους σε ένα ολοένα και πιο πολύπλοκο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## Ελληνική

### Ξένη

- Acharjee, M. (n.d.). An introduction to electron and ion guns: What is an electron or ion gun?
- Adamski, M. (2017). *Analysis of propulsion systems of unmanned aerial vehicles*. Journal of Marine Engineering & Technology, 16(4), 291–297. <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1402694>
- Averitt, S. E. (2021). *The electromagnetic threat to the United States: Recommendations for consequence management* [Master's thesis, Naval Postgraduate School].
- Becker, R., & Herrmannsfeldt, W. B. (2004). *The design of electron and ion guns, beams, and collectors*. In Proc. EBIS Symposium (Vol. 2, No. 1). Retrieved from <http://www.iop.org/EJ/toc/1742-6596/2/1>
- Belousov, A. O., Zhechev, Y. S., Chernikova, E. B., Nosov, A. V., & Gazizov, T. R. (2022). *UAVs protection and countermeasures in a complex electromagnetic environment*. International Journal of Antennas and Propagation. <https://doi.org/10.1155/2022/8539326>
- Bennageh, I., Mahmoudi, H., & Labbadi, M. (2021). Impact of the electromagnetic environment on UAV's datalink. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 785, 1–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/785/1/012046>
- Caforio, G., Scazzoli, D., Reggiani, L., Magarini, M., Le Moullec, Y., & Alam, M. M. (2020). *A configurable radio jamming prototype for physical layer attacks against malicious unmanned aerial vehicles*. In Proceedings of the 2020 17th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC) (pp. 1–6), Tallinn, Estonia, 6–8 October 2020.
- Carpes, W. P., Pichon, L., & Razek, A. (2002). *Analysis of the coupling of an incident wave with a wire inside a cavity using an FEM in frequency and time domains*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 44(3), 470–475.
- Chamola, V., Kotesch, P., Agarwal, A., Gupta, N., & Guizani, M., Naren, N. (2020). A comprehensive review of unmanned aerial vehicle attacks and neutralization techniques. Ad Hoc Networks, 104, 102324. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>
- Cheng, E., Chen, Y., Liu, W., Zhang, D., & Li, G. (2017). *Test method for shielding effectiveness of unmanned aerial vehicle enclosure*. High Power Laser and Particle Beams, 29(1), 55–60.
- Chen, C., Yan, W., Zhao, Y., Wang, E., Fu, C., Ma, R., & Zhu, J. (2018a). *Simulation and analysis of EMP transient electromagnetic effect of aircraft*. Journal of Engineering, 2019(6), 2464–2467.

- Chen, Y., Zhang, D., Cheng, E., & Wang, X. (2018b). *Investigation on susceptibility of UAV to radiated IEMI*. In Proceedings of the 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC) (pp. 718–722). Suntec City, Singapore.
- Clark, B., Walton, T. A., Tourangeau, M., & Tourangeau, S. (2021). *The invisible battlefield: A technology strategy for US electromagnetic spectrum superiority*. Hudson Institute, Center for Defense Concepts and Technology, Warrior Support Solutions. Hudson Institute.
- Davidson, D., Wu, H., Jellinek, R., Singh, V., & Ristenpart, T. (2016). *Controlling UAVs with sensor input spoofing attacks*. In 10th USENIX Workshop on Offensive Technologies (WOOT 16). Austin, TX, USA: USENIX Association.
- Delsing, J., Ekman, J., Johansson, J., Sundberg, S., Backstrom, M., & Nilsson, T. (2006). *Susceptibility of sensor networks to intentional electromagnetic interference*. In Proceedings of the 2006 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility (pp. 172–175), Singapore, 27 February–3 March 2006.
- Division of Environmental Health - Office of Radiation Protection. (2003). *Electromagnetic Pulse (EMP)*. (Fact Sheet 320-090).
- Dowell, D. H. (n.d.). *Lecture 2: Electron emission and cathode emittance*. Stanford Linear Accelerator Center.
- Ferreira, R., Gaspar, J., Souto, N., & Sebastião, P. (2018). *Effective GPS jamming techniques for UAVs using low-cost SDR platforms*. In Proceedings of the 2018 Global Wireless Summit (GWS) (pp. 27–32), Chiang Rai, Thailand, 25–28 November 2018.
- Foster, J. S., Gjelde, E., Graham, W. R., Hermann, R. J., Kluepfel, H. M., Lawson, R. L., Soper, K.G., Wood, L.L. & Woodard, J. B. (2008). *Report of the commission to assess the threat to the United States from electromagnetic pulse (EMP) attack*. Washington, DC: EMP Commission.
- Gao, C., Xue, Z., Li, W., & Ren, W. (2021). *The influence of electromagnetic interference of HPM on UAV*. In Proceedings of the 2021 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) (pp. 1–3). Nanjing, China. <https://doi.org/10.1109/ICMMT52085.2021.9442265>
- Garcia, S. G. (2016). *UAVEMI project: Numerical and experimental EM immunity assessment of UAV for HIRF and lightning indirect effects*. In Proceedings of the 2016 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC) (pp. 1–5). Valencia, Spain. <https://doi.org/10.1109/AEROSPACE.2016.7500366>
- Ibeobi, S., & Pan, X. (2021). *Study of electromagnetic pulse (EMP) effect on surveillance unmanned aerial vehicles (UAVs)*. Journal of Mechanical Engineering, Automation and Control Systems, 2(1), 44-54. <https://doi.org/10.21595/jmeacs.2021.21926>

- Iqbal, M., Islam, G. U., Faridi, M. A., & Zhou, Z. (2013). *Electron beam guns for high energy electron accelerators: An overview*. *Journal of Modern Physics*, 4(11), 1536-1539. <https://doi.org/10.4236/jmp.2013.411188>
- Kim, K., & Park, Y.-J. (2021). *Development of Decision-Making Factors to Determine EMP Protection Level: A Case Study of a Brigade-Level EMP Protection Facility*. *Applied Sciences*, 11(11), 5227. <https://doi.org/10.3390/app11115227>
- Kim, S.-G., Lee, E., Hong, I.-P., & Yook, J.-G. (2022). *Review of intentional electromagnetic interference on UAV sensor modules and experimental study*. *Sensors*, 22(6), 2384. <https://doi.org/10.3390/s22062384>
- Kune, D. F., Backes, J., Clark, S. S., Kramer, D., Reynolds, M., Fu, K., Kim, Y., & Xu, W. (2013). *Ghost talk: Mitigating EMI signal injection attacks against analog sensors*. In *Proceedings of the 2013 IEEE Symposium on Security and Privacy* (pp. 145–159), San Francisco, CA, USA, 19–22 May 2013.
- Len, L. K., & Mako, F. M. (1999). *Self-bunching electron guns*. In *Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference* (p. 70). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PAC.1999.794199>
- Lewellen, J. W. (2002). *Ion tracking in photocathode rf guns*. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 5, 020101. <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.5.020101>
- Li, Y., Ding, Q., Li, K., Valtchev, S., Li, S., & Yin, L. (2021). *A survey of electromagnetic influence on UAVs from EHV power converter stations and possible countermeasures*. *Electronics*, 10(6), 701. <https://doi.org/10.3390/electronics10060701>
- Lubkowski, G., Lanzrath, M., Lavau, L. C., & Suhrke, M. (2020). *Response of the UAV sensor system to HPEM attacks*. In *Proceedings of the 2020 International Symposium on Electromagnetic Compatibility* (pp. 1–6). Rome, Italy. <https://doi.org/10.1109/ISEMC48845.2020.9266906>
- Malekos Smith, Z. L. (2023). *The Buzz about Electromagnetic Pulse Weapons*. Foreign Policy Research Institute.
- Makarenko, S. I. (2020). *Protivodejstvie bespilotnym letatel'nyim apparatam: Monografiya* [Countermeasures against unmanned aerial vehicles: Monograph]. Naukoemkie Tekhnologii.
- Martin, J. E., Saul, V., Novick, D., & Allen, D. (2020). *Assessing the vulnerability of unmanned aircraft systems to directed acoustic energy*. Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories.
- Maruyama, M., Okamoto, K., Okugawa, Y., & Kato, J. (2018). *Investigating Countermeasures against High-altitude Electromagnetic Pulse (HEMP)*. *NTT Technical Review*, 16(6).
- Nishiyama, H., Okamoto, T., Kim, Y., Fujimoto, D., & Hayashi, Y. I. (2019). *Fundamental study on influence of intentional electromagnetic interference on IC communication*. In *Proceedings of the 2019 12th*



International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo) (pp. 201–203), Hangzhou, China, 21–23 October 2019.

- Noh, J., Kwon, Y., Son, Y., Shin, H., Kim, D., Choi, J., & Kim, Y. (2019). *Tractor beam: Safe-hijacking of consumer drones with adaptive GPS spoofing*. *ACM Transactions on Privacy and Security*, 22(1), 1–26.
- Paki, P., Mahmood, S., Talbot, B., Platt, J., Centeno, M., Schoonover, R., Cohen, M., Robertshaw, G., & Trovato, J. (2022). *Electromagnetic pulse shielding mitigations: Best practices for protection of mission critical equipment*. U.S. Department of Homeland Security, Science & Technology Directorate.
- Pahl, H., Bidault, N., Khatri, G., Pikin, A., & Wenander, F. J. C. (2022). *Nonadiabatic electron gun at an electron beam ion source: Commissioning results and charge breeding investigations*. *Physical Review Accelerators and Beams*, 25(1), 013402. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.25.013402>
- Park, S., Kim, H. T., Lee, S., Joo, H., & Kim, H. (2021). *Survey on anti-drone systems: Components, designs, and challenges*. *IEEE Access*, 9, 12345-12367. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065926>
- Perez, R. J. (2019). *EMC considerations for unmanned aerial vehicles*. In *Handbook of Aerospace Electromagnetic Compatibility* (pp. 603–619). IEEE. <https://doi.org/10.1109/9781119508855.ch25>
- Poucheret, F., Tobich, K., Lisarty, M., Chusseau, L., Robisson, B., & Maurine, P. (2011). *Local and direct EM injection of power into CMOS integrated circuits*. In *Proceedings of the 2011 Workshop on Fault Diagnosis and Tolerance in Cryptography* (pp. 100–104), Tokyo, Japan, 29 September 2011.
- Ribton, C., del Pozo, S., Balachandran, W., & Smith, D. R. (2016). *Design of electron guns using a bespoke genetic algorithm*. *Electron Optics, Electron Guns, Electron Beam Equipment, Electron Beam Characterization*.
- Roy, A. (2010). *Electronic emission & electron guns*. Proceedings of SPPT 2010, BARC, Mumbai. INIS Repository, Reference Number 41111122, INIS Volume 41, INIS Issue 40.
- Rozenbeek, D. J. (2020). *Evaluation of drone neutralization methods using radio jamming and spoofing techniques*. Retrieved from: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1460807/FULLTEXT01.pdf>.
- Sakharov, K. Y., Sukhov, A. V., Ugolev, V. L., & Gurevich, Y. M. (2018). *Study of UWB electromagnetic pulse impact on commercial unmanned aerial vehicle*. In *Proceedings of the 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)* (pp. 40–43). Amsterdam, Netherlands.
- Savage, E., Gilbert, J., & Radasky, W. (2010). *The Early-Time (E1) High-Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) and Its Impact on the U.S. Power Grid*. Metatech Corporation.

- Shin, H., Kim, D., Kwon, Y., & Kim, Y. (2017). *Illusion and dazzle: Adversarial optical channel exploits against lidars for automotive applications*. In Cryptographic Hardware and Embedded Systems—CHES 2017 (Vol. 10529, pp. 445–467). Taipei, Taiwan: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-66787-4\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66787-4_22)
- Shukun, G., et al. (2019). Research on ultra-wideband electromagnetic pulse irradiation effect and protection method of unmanned aerial vehicle. *Journal of Physics: Conference Series*, 1325, 012165. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1325/1/012165>
- Son, Y., Shin, H., Kim, D., Park, Y., Noh, J., Choi, K., Choi, J., & Kim, Y. (2015). *Rocking drones with intentional sound noise on gyroscopic sensors*. In 24th USENIX Security Symposium (USENIX Security 15) (pp. 881–896). Washington, DC, USA: USENIX Association.
- Song, Z., Yu, B., Ye, F., & Zhao, J. (2003). *Research on electromagnetic simulation for UAV focused on environment applicability*. *Journal of System Simulation*, 15(3), 433–436.
- Telli, K., Kraa, O., Himeur, Y., Ouamane, A., Boumehras, M., Atalla, S., & Mansoor, W. (2023). *A comprehensive review of recent research trends on UAVs*. arXiv:2307.13691v1 [cs.RO] 25 Jul 2023
- Thermo Fisher Scientific. (2008). *Combination low energy electron/ion gun*. Application Note: 31071. Part of Thermo Fisher Scientific.
- Torrero, L., Mollo, P., Molino, A., & Perotti, A. (2013). *RF immunity testing of an unmanned aerial vehicle platform under strong EM field conditions*. In Proceedings of the 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) (pp. 263–267), Gothenburg, Sweden, 8–12 April 2013.
- Trippel, T., Weisse, O., Xu, W., Honeyman, P., & Fu, K. (2017). *WALNUT: Waging doubt on the integrity of MEMS accelerometers with acoustic injection attacks*. In 2017 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS&P) (pp. 3–18). Paris, France.
- Vukanić, J., & Terzić, I. (1973). *Experimental investigations of Li<sup>+</sup> ion gun characteristics*. *Nuclear Instruments and Methods*, 111(1), 117-124. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(73\)90102-X](https://doi.org/10.1016/0029-554X(73)90102-X)
- Wen, T., Song, Q., & Gao, Y. (2006). *The analysis about UWB's EMI cause to UAV system based on Matlab/Simulink*. In Proceedings of the 2006 4th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (pp. 1–4). Dalian, China.
- Xie, J., Fu, Q., Jia, R., & Li, M. (2023). *Multi-UAV path planning under radar threats*. In Proceedings of the 2023 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT) (pp. 1–6). Xining, China.
- Xu, T., Chen, Y., Wang, Y., Zhang, D., & Zhao, M. (2023). *EMI threat assessment of UAV data link based on multi-task CNN*. *Electronics*, 12(7), 1631. <https://doi.org/10.3390/electronics12071631>

- Yang, C.-X., Cui, D.-H., Chen, Z.-H., Xiao, Y.-J., & Zheng, C. (2023). *High-power microwave damage assessment method for UAV*. In 2022 International Conference on Defence Technology (2022 ICDT). Journal of Physics: Conference Series, 2478, 082011. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2478/8/082011>
- Youvan, D. C. (2024). *Electromagnetic Pulse (EMP) Warfare and Geopolitical Dynamics: A Theoretical Analysis of Claims by McGovern and Escobar*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33469.27363>
- Zhang, W., Ding, W., & Liu, C. (2016). *Prediction of interference effect on UAV data link in complex environment*. Systems Engineering and Electronics, 38(4), 760–766.
- Zhang, D., Zhou, X., Cheng, E., Wan, H., & Chen, Y. (2020). *Investigation on effects of HPM pulse on UAV's datalink*. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 62(3), 829–839. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.2976148>
- Zhang, Z., Zhou, Y., Zhang, Y., & Qian, B. (2024). Strong electromagnetic interference and protection in UAVs. Electronics, 13(2), 393. <https://doi.org/10.3390/electronics13020393>

## Ιστοσελίδες

- Boraks, D. (2019). *Study finds the facts, not science fiction, in an electromagnetic pulse attack*. WFAE. <https://www.wfae.org/energy-environment/2019-04-30/study-finds-the-facts-not-science-fiction-in-an-electromagnetic-pulse-attack>
- Defensebridge. (2023). *The impact of military technology on modern warfare*. Retrieved from <https://defensebridge.com/article/the-impact-of-military-technology-on-modern-warfare.html>
- Hadhazy, A. (2009, March 13). *A scary 13th: 20 years ago, Earth was blasted with a massive plume of solar plasma*. Scientific American. <https://www.scientificamerican.com/article/geomagnetic-storm-march-13-1989-extreme-space-weather/>
- IONICS SA (2022). *ionGUNTM : ion implanter*. <https://www.ionics-group.com/en/equipment-supply/iongun-ion-implantation-implanter>
- Kallberg, J. (2018). *Electronic warfare, spectrum warfare*. Cyber Defense. <https://cyberdefense.com/2018/10/10/spectrum-warfare/>
- Phillips, T. (2021). *The great Québec blackout*. SpaceWeatherArchive. <https://spaceweatherarchive.com/2021/03/12/the-great-quebec-blackout/>
- Robin Radar Systems. (2024). *10 counter-drone technologies to detect and stop drones today*. Retrieved from: <https://www.robinradar.com>

U.S. Air Force Civil Engineer Center. (2020). *High Altitude Electromagnetic Pulse (HEMP) Effects And Protection. Whole Building Design Guide*. <https://www.wbdg.org/resources/high-altitude-emp-effects-protection>