



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΥΓΕΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΙΑΤΡΙΚΗΣ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΣ - ΚΛΙΝΙΚΟΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΦΥΣΙΟΛΟΓΙΑΣ**

**Ανάπτυξη αυτομάτων συστημάτων Η/Υ για εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών
κυμάτων επανασυντονισμού κακοήθων εξεργασιών:
Αποτελέσματα σε σειρές κακοήθων κυττάρων σαρκώματος και
κακοήθων σαρκωματικών όγκων πειραματόζωων**

**Αντώνιος Χρ. Αυδίκος
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΙΩΑΝΝΙΝΑ 2017

«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ιατρική Σχολή του Πανεπιστημίου
Ιωαννίνων δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα Ν. 5343/32, άρθρο 202,
παράγραφος 2 (νομική κατοχύρωση του Ιατρικού Τμήματος)»

Ημερομηνία αίτησης του κ. Αυδίκου Αντωνίου: 19-9-2002

Ημερομηνία ορισμού Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής: 486^α/3-12-2002

Μέλη Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής:

Επιβλέπων

Ευαγγέλου Άγγελος, Καθηγητής Φυσιολογίας του Τμήματος Ιατρικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Μέλη

Καρκαμπούνας Σπυρίδων, Λέκτορας Φυσιολογίας του Τμήματος Ιατρικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.

Γαλάνης Σοφοκλής, Αναπληρωτής Καθηγητής του Τμήματος Μαθηματικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Ημερομηνία ορισμού θέματος: 18-12-2002

«Ανάπτυξη αυτόματων συστημάτων Η/Υ για εκπομπή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων επανασυντονισμού κακοήθων εξεργασιών: Αποτελέσματα σε σειρές κακοήθων κυττάρων σαρκώματος και κακοήθων σαρκωματικών όγκων πειραματοζώων»

ΟΡΙΣΜΟΣ ΕΠΤΑΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ 790^α/1-7-2016

Ευαγγέλου Άγγελος	ομότιμος Καθηγητής Φυσιολογίας του Τμήματος Ιατρικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
Καλφάκου Βασιλική	Καθηγήτρια Φυσιολογίας με έμφαση στην Περιβαλλοντική Φυσιολογία του Τμήματος Ιατρικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
Παπαδοπούλου Χρυσάνθη	Καθηγήτρια Μικροβιολογίας του Τμήματος Ιατρικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
Χαραλαμπόπουλος Κωνσταντίνος	Καθηγητής Φυσιολογίας του Τμήματος Ιατρικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
Γαλάνης Σοφοκλής	τ. Αναπληρωτής Καθηγητής Αριθμητικής Ανάλυσης του Τμήματος Μαθηματικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
Πέσχος Δημήτριος	Επίκουρος Καθηγητής Φυσιολογίας με έμφαση στην Κυτταρική Φυσιολογία του Τμήματος Ιατρικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων.
Ντουνούση Ευαγγελία	Λέκτορας Νεφρολογίας με έμφαση στις Μεταμοσχεύσεις του Τμήματος Ιατρικής του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

Έγκριση Διδακτορικής Διατριβής με βαθμό «ΑΡΙΣΤΑ» στις 11-12-2017

ΠΡΟΕΔΡΟΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΙΑΤΡΙΚΗΣ

Μηνάς Πασχόπουλος

Καθηγητής Μαιευτικής-Γυναικολογίας



Η Γραμματέας του Τμήματος

ΜΑΡΙΑ ΚΑΠΙΤΟΠΟΥΛΟΥ

στην Ζιζίκα
Μνήμη και Αγάπη

Ερεΰνα καὶ πίστευε

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η ανακάλυψη των φαινομένων του ηλεκτρισμού αποδίδεται ήδη στους αρχαίους Έλληνες και συγκεκριμένα στον Θαλή τον Μιλήσιο ο οποίος περί τα 600 π.χ. παρατήρησε ότι ράβδοι κεχριμπαριού, δηλαδή απολιθωμένης ρητίνης κωνοφόρων φυτών, αποκτούν ιδιότητες έλξης ελαφρών αντικειμένων, οργανικής φύσης (άχυρα, πούπουλα κ.ά.) κατόπιν εντόνου τριβής τους με στεγνό ύφασμα προερχόμενο από δέρμα γάτας. Ο Θαλής υποστήριξε ότι η τριβή του κεχριμπαριού (ήλεκτρο) με το δέρμα της γάτας μετατρέπει προσωρινά το κεχριμπάρι σε ένα είδος μαγνήτη. Ο Θαλής είχε προηγουμένως παρατηρήσει επίσης το φαινόμενο του μαγνητισμού οπότε συνέδεσε την ανάπτυξη ελκτικών ιδιοτήτων εκ μέρους του κεχριμπαριού με τα μαγνητικά φαινόμενα. Η συσχέτιση αυτή αποδείχθηκε ότι ήταν αληθής σχεδόν 2400 χρόνια μετά, όταν η ανάπτυξη της Φυσικής κατά τον 19^ο αιώνα έφερε στην επιφάνεια την κοινή φύση των ηλεκτρικών και μαγνητικών φαινομένων και τη σύντηξή τους στον ενοποιημένο εννοιολογικό χώρο του ηλεκτρομαγνητισμού.

Ο επιστημονικός χώρος του ηλεκτρομαγνητισμού αρχίζει και αναπτύσσεται κατά τρόπο λογαριθμικό από την εποχή του James Clerk Maxwell, Σκωτσέζου θεωρητικού φυσικού (1831 – 1879). Το 1871 ο Maxwell ενοποιεί τον χώρο του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού με τις περίφημες εξισώσεις που φέρουν το όνομά του. Σχεδόν ταυτόχρονα ο Γερμανός φυσικός Heinrich Rudolf Hertz (1857 – 1894) επιβεβαιώνει τις εξισώσεις και την εν γένει θεωρία του Maxwell υλοποιώντας την κατασκευή ενός συστήματος εκπομπής και λήψης ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Προς τιμή του η μονάδα συχνότητας ενός παλλόμενου δίπολου εκπομπής ονομάστηκε Hertz. Ουσιαστικά με τη συσκευή του Hertz ετέθη η βάση για την ασύρματη μετάδοση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας, η οποία σταδιακά οδήγησε στη δημιουργία των ασύρματων τηλεπικοινωνιών και εν γένει στη μετάδοση μη οπτικών σημάτων ηλεκτρομαγνητικής φύσης τα οποία δημιούργησαν τον τεράστιο χώρο εφαρμογών της ραδιοεπικοινωνίας.

Ο χώρος του ηλεκτρομαγνητισμού έκτοτε ευρίσκεται σε μια εξέλιξη εργώδη και έχει δημιουργήσει ουσιαστικά το περιβάλλον επικοινωνιακής λειτουργίας όλων των σύγχρονων κοινωνιών. Αυτά βεβαίως θα τα αποτιμήσουμε μιλώντας αναλυτικότερα στην ανάπτυξη του γενικού μέρους, όπως επίσης στο ειδικό μέρος και τα συμπεράσματα.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή έλαβε χώρα εξ ολοκλήρου στο Εργαστήριο Φυσιολογίας και συγκεκριμένα στη Μονάδα Περιβαλλοντικής Φυσιολογίας. Το

αντικείμενο της διατριβής υπήρξε η μελέτη της δράσης μιας σειράς ηλεκτρομαγνητικών συχνοτήτων ραδιοφωνικού χαρακτήρα, επί του ρυθμού πολλαπλασιασμού ενός συγκεκριμένου τύπου νεοπλασματικών κυττάρων (λειτουργοσάρκωματικά κύτταρα επίμυος Wistar) που αναπτυσσόταν 1^{ov}) σε καλλιέργειες in vitro και 2^{ov}) σε επίμυες Wistar κατόπιν ενοφθαλμισμού με ειδικό τρόπο. Οι ηλεκτρομαγνητικές συχνότητες εκπεμπούν μέσω ενός συστήματος πομπών που οδηγούταν με τη χρήση υπολογιστή εφοδιασμένου με το κατάλληλο λογισμικό. Το σύστημα εκπομπής και οι εκάστοτε βιολογικοί στόχοι ήταν τοποθετημένοι στο εσωτερικό ενός κλωβού Faraday, προκειμένου να μην υπάρχει είσοδος παρασιτικών συχνοτήτων προερχόμενων από τον εξωτερικό χώρο. Ο κλωβός Faraday κρίθηκε απαραίτητος και για την προστασία του προσωπικού από τις εκπεμπόμενες συχνότητες.

Προσωπικά ως μαθηματικός σχεδίασα τα χαρακτηριστικά της εκπομπής στο φυσικό και μαθηματικό επίπεδο, τις εντάσεις, την εμβέλειά της, ενώ ταυτοχρόνως κατασκεύασα ένα μεγάλο μέρος της υποδομής που απαιτούσε τεχνικές γνώσεις.

Τα σχετικά με τη δημιουργία των νεοπλασματικών κυττάρων, τη βιολογία και την καλλιέργειά τους in vitro τα διδάχτηκα εκ μέρους του προσωπικού του Εργαστηρίου Φυσιολογίας, των μεταπτυχιακών φοιτητών και των εξωτερικών συνεργατών του Εργαστηρίου. Όλους αυτούς τους ανθρώπους ευχαριστώ συνολικά για την απρόσκοπτη προσφορά τους και για τη φιλική και συναδελφική τους στάση.

Ειδικότερα ευχαριστώ τους εξής:

- Τον Δρ. Άγγελο Ευαγγέλου, Ιατρό παθολόγο, Ομότιμο Καθηγητή Φυσιολογίας που μου έδωσε την δυνατότητα να αναπτύξω τα πειράματα της διατριβής μου ως επιβλέπων καθηγητής.
- Τον Δρ. Σπύρο Καρκαμπούνα, βιολόγο, Αναπληρωτή Καθηγητή Φυσιολογίας με τον οποίον συνεργαστήκαμε στενότερα και αναπτύξαμε από κοινού όλη την πειραματική και υλικοτεχνική υποδομή, τον σχεδιασμό των πειραμάτων, τον συνεχή έλεγχο όλων των συστημάτων, και την λεπτομερειακή ανάλυση των βιολογικών και άλλων επιστημονικών δεδομένων.
- Τον Δρ. Σοφοκλή Γαλάνη, Μαθηματικό, τέως Αναπληρωτή Καθηγητή μαθηματικών.
- Την βιολόγο Τζέην Μπινόλη – Schmidt, βιολόγο, υποψήφια διδάκτορα Φυσιολογίας για την βοήθειά της πάνω στην κυτταρική καλλιέργεια και στην κυτταρομετρία ροής.

- Τον Δρ Ρωμάν Λιάσκο, βιολόγο, ο οποίος συμμετείχε στην ανάπτυξη της σειράς των λειομυοσαρκωματικών κυττάρων.
- Την Δρ. Χρυσούλα Αναστασιάδου, βιολόγο ειδική ζωολόγο, η οποία συμμετείχε σε σημαντικό αριθμό πειραμάτων βιολογικού χαρακτήρα.
- Τον Δρ. Γιάννη Ζελοβίτη, γεωπόνο, ο οποίος συμμετείχε στην πραγματοποίηση των πειραμάτων .
- Τον Δρ. Γιάννη Βεργινάδη, βιολόγο – βιοτεχνολόγο, ο οποίος συμμετείχε στον έλεγχο του ηλεκτρονικού συστήματος και σε πολλά βιολογικά πειράματα.
- Τον Δρ. Ιωάννη Σίμο, Κλινικό Διαιτολόγο-Διατροφολόγο, ο οποίος συμμετείχε στη όλη επεξεργασία της διδακτορικής διατριβής.
- Τον Δρ. Αποστόλη Μέτσιο, βιολόγο, ο οποίος συμμετείχε στην παραγωγή νεοπλασματικών κυττάρων, και σε αριθμό πειραμάτων έκθεσής τους στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο.
- Τον κ. Κωνσταντίνο Χαβέλα, ηλεκτρονικό, απόστρατο αξιωματικό του Πολεμικού ναυτικού, ο οποίος συνείσφερε σημαντικά στην κατασκευή του συστήματος εκπομπής.
- Τον κ. Γεώργιο Χατζηαιβάζη, ηλεκτρονικό, απόστρατο αξιωματικό του Πολεμικού ναυτικού, ο οποίος συνείσφερε σημαντικά στην κατασκευή του συστήματος εκπομπής, στον ονομαστικό του έλεγχο, στην συντήρηση και στην σύνθεση των κατάλληλων λογισμικών.
- Το Διοικητικό Συμβούλιο του Συλλόγου Ενεργειακής Συντονιστικής για την Ψυχοσωματική ισορροπία και υγεία ο οποίος επιδότησε οικονομικά μερικά πειράματα του προγράμματος, καθώς και την κατασκευή των γεννητριών παραγωγής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.
- Το Δρ. Νίκο Παπαδόπουλο για την ηλεκτρονική επεξεργασία μέρους βιβλιογραφίας.
- Το Δρ. Γεώργιο Βαρθολομάτο για τον επιμελή έλεγχο των λειομυοσαρκωματικών κυττάρων με την μέθοδο της κυτταρομετρίας ροής και τον προσδιορισμό των ποσοστών των κυττάρων στις διάφορες φάσεις του κυτταρικού κύκλου.

Ευχαριστώ τέλος όλο το τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Φυσιολογίας και συγκεκριμένα τους κκ Νίκο Γκάλγκο, Παναγιώτη Γρίβα, Χριστίνα Τζίμα, Ευτυχία Γούλα, καθώς και τον εκτροφέα πειραματόζωων κ. Αθανάσιο Βέρο. Όλοι αυτοί συνέτειναν στην πραγματοποίηση του ερευνητικού έργου και τους είμαι ιδιαίτερος ευγνώμων.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

I. ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	19
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	19
1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	19
1.1 ΒΑΣΙΚΕΣ ΈΝΝΟΙΕΣ	19
1.1.1 Η έννοια του ηλεκτρικού φορτίου και ο Νόμος του Coulomb.....	19
1.1.2 Το Ηλεκτρικό πεδίο – βασικές έννοιες – μονάδες μεγεθών	22
1.1.3 Ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές.....	26
1.1.4 Ηλεκτρικά δίπολα.....	28
1.2 Ο ΝΟΜΟΣ ΤΟΥ GAUSS ΚΑΙ Η ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΡΟΗ.....	32
1.2.1 Η ηλεκτρική ροή.....	32
1.2.2 Ο Νόμος του Gauss.....	35
1.2.3 Εφαρμογές του νόμου του Gauss.....	39
1.3 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ.....	40
1.3.1 Πηγές ΗΜΠ	44
1.3.2 Τα διάφορα είδη ΗΜΠ.....	45
1.3.3 Η ιονίζουσα ακτινοβολία.....	46
1.3.4 Η μη ιονίζουσα ακτινοβολία.....	46
1.4 ΗΜΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΚΑΙ Ο ΑΝΘΡΩΠΟΣ.....	47
1.5 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΗΛΕΚΤΡΟΘΕΡΑΠΕΙΑΣ.....	52
II. ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	57
2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	57
3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	59
3.1 <i>IN VITRO</i> ΜΕΛΕΤΗ	59
3.1.1 Χημικά και αντιδραστήρια.....	59
3.1.2 Λειομοσοσαρκωματικά κύτταρα του επίμυος Wistar	59
3.1.3 Λεία μυϊκά κύτταρα	61
3.1.4 Κυτταρική καλλιέργεια	61
3.1.5 Ενοφθαλμισμός κυττάρων σε επίμυες Wistar	62
3.1.6 Συσκευή Εκπομπής Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων	62
3.1.7 Υπολογισμός των Ηλεκτρομαγνητικών Συχνοτήτων Συντονισμού των LMS και SMC κυττάρων....	65
3.1.8 Έκθεση των LMS και SMC κυττάρων στα EMF.....	65
3.1.9 Χειρισμός των LMS κυττάρων – Κυτταρομετρία ροής.....	67
3.1.10 Αιμοπεταλιακή συσσώρευση.....	67
3.1.11 Έλεγχος κυτταρικής βιωσιμότητας με τη χρήση χρωστικής Trypan Blue Exclusive Assay	67

3.2 <i>IN VIVO</i> ΜΕΛΕΤΗ.....	68
3.2.1 Καταγραφή των ΗΜΓνητικών Συχνότητων των LMS και SMC.....	68
3.2.2 Έκθεση των LMS και SMC κυττάρων στα EMF.....	68
3.2.3 Έκθεση των επίμυων Wistar στα EMF.....	68
3.2.4 Περαιτέρω μελέτες στα Πειραματόζωα.....	68
3.2.5 Ενοφθαλμισμός επίμυων Wistar.....	70
3.3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	71
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	73
4.1 <i>IN VITRO</i> ΜΕΛΕΤΗ.....	73
4.1.1 Πολλαπλασιασμός των κυττάρων	73
4.1.2 Κατανομή των LMS κυττάρων στις φάσεις του κυτταρικού κύκλου	74
4.1.3 Επιβίωση των SMC κυττάρων μετά από έκθεση στις ΗΜΓνητικές Συχνότητες Συντονισμού.....	75
4.1.4 Αναστολή της συσσώρευσης των αιμοπεταλίων	76
4.1.5 Υπολογισμός των Ηλεκτρομαγνητικών Συχνότητων Συντονισμού των κυττάρων	76
4.2 <i>IN VIVO</i> ΜΕΛΕΤΗ.....	77
4.2.1 Υπολογισμός των Ηλεκτρομαγνητικών Συχνότητων Συντονισμού των κυττάρων	77
4.2.2 Αναστολή της ανάπτυξης των όγκων σε επίμυες Wistar.....	77
5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	83
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	93
7. ΠΕΡΙΛΗΨΕΙΣ	95
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ	95
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΚΗ	97
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	99
9. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	107

I. ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1 Βασικές Έννοιες

1.1.1 Η έννοια του ηλεκτρικού φορτίου και ο Νόμος του Coulomb

Οι αρχαίοι Έλληνες ανακάλυψαν ήδη από τα 600 π.χ. ένα φαινόμενο σύμφωνα με το οποίο η τριβή τεμαχίων ήλεκτρου (κεχριμπαριού) με μάλλινο ύφασμα δημιουργούσε στο ήλεκτρο την ιδιότητα να έλκει ελαφρά αντικείμενα όπως, ξερά φύλλα, τρίχες, σκόνη και γενικά μη μεταλλικά υλικά μικρού βάρους. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε από τον Θαλή τον Μιλήσιο Ηλεκτρισμός και πήρε το όνομά του από την ελκτική ιδιότητα του ήλεκτρου κατόπιν τριβής με το μάλλινο ύφασμα. Έτσι ξεκίνησε η μεγάλη περιπέτεια της ιστορίας του ηλεκτρισμού, η οποία έμελλε, στην πορεία των αιώνων να αλλάξει απολύτως την όψη και το περιεχόμενο της ανθρώπινης κοινωνίας, εισάγοντας τεχνολογίες και διείσδυση σε όλες τις πλευρές της λειτουργίας των κοινωνιών, αλλά και σε διείσδυση μεγάλου βάθους σε θεμελιακά φαινόμενα αφορώντα αυτή καθεαυτή τη δομή και λειτουργία του σύμπαντος. Η είσοδος του φαινομένου του ηλεκτρισμού στη ζωή του ανθρώπου υπήρξε η πυροδότηση της μεγαλύτερης τεχνολογικής και γνωσιολογικής επανάστασης (1).

Από τα πρώτα πειράματα ανάπτυξης ηλεκτρικού φορτίου δια τριβής έγινε κατανοητό ότι υπάρχουν δύο τύποι φορτίων το θετικό (+Q) και το αρνητικό φορτίο (-Q). Τα δύο αυτά φορτία τιθέμενα κατά συνδυασμούς ζευγών αναπτύσσουν δύο τύπους δυνάμεων : 1^{ον}) Έλξη όταν το θετικό φορτίο τίθεται σε στενή συνάφεια με το αρνητικό και 2^{ον}) άπωση όταν δύο ομώνυμα φορτία (+Q, +q) ή (-Q, -q) τίθενται επίσης σε στενή γειτνίαση ώστε να είναι εφικτή η αλληλεπίδρασή τους. Οι δυνάμεις της άπωσης ή της έλξης μελετήθηκαν από τον Coulomb και ταχέως διαπιστώθηκε ότι ακολουθούσαν ένα ακριβή φυσικό νόμο που εκφράστηκε μαθηματικά με την λεγόμενη εξίσωση του Coulomb η οποία έχει ως εξής:

$$F = k(q_1 \cdot q_2)/r^2 \quad (1),$$

όπου q_1, q_2 τα αντίστοιχα φορτία, r η μεταξύ τους απόσταση και k μια σταθερά αναλογίας της οποίας η τιμή εξαρτάται από το χρησιμοποιούμενο σύστημα μονάδων.

Τα στοιχειώδη δύο φορτία αντιστοιχούν στο φορτίο του πρωτονίου που φέρει εκ συμβάσεως το θετικό πρόσημο και στο φορτίο του ηλεκτρονίου που είναι ίσο με του πρωτονίου και αντιθέτου πρόσημου, δηλαδή αρνητικό. Όλα τα υπάρχοντα φορτία στον φυσικό κόσμο είναι ακέραια πολλαπλάσια των δύο αυτών θεμελιωδών φορτίων που αποτελούν δύο ετερόνυμα κβάντα του ηλεκτρικού φορτίου. Ωστόσο η πυρηνική φυσική έδειξε ότι υπάρχουν φορτία ακόμη μικρότερα εκείνων του ηλεκτρονίου και του πρωτονίου. Τα σωματίδια αυτά ονομάζονται κουάρκ, είναι δύο ειδών και το φορτίο τους είναι για το μεν πρώτο είδος $\pm 1/3$ του φορτίου του ηλεκτρονίου, ενώ για το δεύτερο είδος $\pm 2/3$. Μέχρι των ημερών μας δεν έχουμε παρατηρήσει την ύπαρξη ελεύθερων κουάρκ, τα οποία θεωρούνται αποκλειστικά ως ενδοπυρηνικά σωματίδια, συστατικά των πρωτονίων και των νετρονίων των ατομικών πυρήνων. Όταν δύο ηλεκτρικά φορτία αντιθέτων προσήμων και ίσης απόλυτης τιμής αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους τότε έλκονται με αποτέλεσμα να συμπλησιάσουν και να ταυτιστούν γεωμετρικά. Το αποτέλεσμα είναι ότι το σώμα εντός του οποίου λαμβάνει χώρα η υπέρθεση δύο ίσων και αντιθέτων φορτίων εμφανίζεται εξωτερικά ως ηλεκτρικώς ουδέτερο. Στην πραγματικότητα επειδή ουδέποτε έχουμε την πλήρη γεωμετρική αλληλοδιείσδυση και ταύτιση δύο φορέων ίσων και αντιθέτων φορτίων προκύπτει ότι πάντα σχηματίζονται μεταξύ των φορέων αυτών υλικές δομές οι οποίες ονομάζονται ηλεκτρικά δίπολα. Είναι σαφές ότι το όριο προς το οποίο τείνει η απόσταση r μεταξύ δύο αλληλεπιδρώντων ελκτικώς φορτίων είναι το μηδέν, οπότε η ηλεκτρική δύναμη η ασκούμενη μεταξύ ίσων φορτίων αντιθέτου φοράς τείνει προς το άπειρο. Επειδή στο σύμπαν δεν υπάρχουν οντότητες με άπειρο ή μηδενικό μέτρο εξυπακούεται ότι δεν είναι δυνατή η ταύτιση δύο φορτίων ίσων κατ' απόλυτον τιμήν και αντιθέτου προσήμου. Συνεπώς στην φύση η υφιστάμενη κατάσταση είναι πάντα όχι η πλήρης εξουδετέρωση της ηλεκτρικής φόρτισης αλλά η ύπαρξη δίπολων.

Παρά τις τεράστιες εφαρμογές του ηλεκτρισμού, εν τούτοις και σήμερα δεν μπορούμε να πούμε τι είναι ακριβώς το ηλεκτρικό φορτίο. Φαίνεται ως μια έννοια η οποία δεν επιδέχεται περαιτέρω αναγωγή, όπως ακριβώς οι έννοιες της ύλης και της ενέργειας. Το φορτίο μπορεί να εξισορροπηθεί από ένα ίσο και αντιθέτου πρόσημου αλλά είναι κάτι που δεν υπόκειται μεταβολές. Με άλλα λόγια ισχύουν και για το φορτίο ο νόμος της

διατήρησης, ότι δηλαδή το αλγεβρικό άθροισμα όλων των ηλεκτρικών φορτίων οποιουδήποτε κλειστού σώματος παραμένει σταθερό. Το φορτίο, συνεπώς, μπορεί να μεταφέρεται από ένα σώμα σε ένα άλλο σώμα, αλλά δεν μπορεί να καταστρέφεται ή να δημιουργείται εκ του μηδενός. Ακόμη και στις αλληλεπιδράσεις υψηλών ενεργειών, όπου δημιουργούνται και καταστρέφονται σωματίδια, όπως π.χ στην δίδυμη γένεση (όπου ένα φωτόνιο μετατρέπεται σε ένα ζεύγος ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου), το αλγεβρικό άθροισμα του φορτίου των κλειστών σωμάτων είναι ακριβώς σταθερό. Το μέτρο του φορτίου του ηλεκτρονίου ή του πρωτονίου είναι μια σταθερή μονάδα φορτίου. Οποιαδήποτε ποσότητα φορτίου που μπορεί να παρατηρηθεί στην φύση είναι πάντα ένα ακέραιο πολλαπλάσιο αυτής της θεμελιώδους μονάδας. Συνεπώς, σύμφωνα με την θεωρία των κβάντα του Max Plank λέμε ότι το φορτίο είναι ένα *κβαντωμένο*. Οι δυνάμεις οι οποίες κρατούν τα άτομα στα μόρια, η επιφανειακή τάση, η συγκολλητική δύναμη ιξωδών ουσιών (κόλλες), οι δυνάμεις που συγκρατούν τα ηλεκτρόνια περίξ ενός πυρήνα ατόμου, οι δυνάμεις που συγκρατούν τα άτομα και τα μόρια στο δομικό περιβάλλον οποιουδήποτε κρυστάλλου είναι όλες *ηλεκτρικές δυνάμεις* (1). Όμως οι δυνάμεις που συγκρατούν τα πρωτόνια και τα νετρόνια στο μικροπεριβάλλον ενός ατομικού πυρήνα δεν είναι δυνάμεις ηλεκτρικές, αλλά ανήκουν σε άλλου τύπου δυνάμεις, που συναποτελούν τις λεγόμενες *ισχυρές αλληλεπιδράσεις*. Η πυρηνική δύναμη είναι συνεπώς αποτέλεσμα μιας ισχυρής αλληλεπίδρασης. Ωστόσο η πυρηνική δύναμη έχει εξαιρετικά μικρή εμβέλεια η οποία δεν επεκτείνεται πέραν των διαστάσεων ενός ατομικού πυρήνα. Η ηλεκτρική δύναμη από την άλλη μεριά ανήκει στις λεγόμενες *ασθενείς αλληλεπιδράσεις*.

Ο νόμος του Coulomb αποτελεί τον ακρογωνιαίο λίθο της φυσικής του ηλεκτρισμού. Οι δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των φορτίων προκαλούν την γένεση όλων των φαινομένων του ηλεκτρισμού. Οι κατευθύνσεις των δυνάμεων που ασκούνται μεταξύ των φορτίων βρίσκονται πάντα στην ευθεία γραμμή που τα συνδέει. Οι δύο δυνάμεις είναι πάντοτε ίσες κατά μέτρον ακόμη και όταν τα γενεσιουργά φορτία είναι άνισα. Οι δυνάμεις αυτές υπακούουν στον τρίτο νόμο του Νεύτωνα. Οι ηλεκτρικές δυνάμεις μπορεί να είναι ελκτικές ή απωστικές, κατ' αντίθεση με τις βαρυτικές δυνάμεις οι οποίες είναι πάντα ελκτικές.

Βασικά ο νόμος του Coulomb όπως μελετήθηκε με τον ζυγό στρέψης και διατυπώθηκε μαθηματικώς αναφέρεται κυρίως σε σημειακά φορτία, τα οποία παρουσιάζουν μικρή δύναμη αδρανείας. Η αναλογία της ηλεκτρικής δύναμης προς το κλάσμα $1/r^2$ έχει επαληθευτεί επακριβώς και είναι βέβαιο ότι ο εκθέτης είναι 2. Συνεπώς η μορφή του

νόμου του Coulomb που καθορίζει την ηλεκτρική δύναμη είναι όμοια με την μαθηματική μορφή του νόμου που καθορίζει την δύναμη της βαρύτητας. Όταν δύο φορτία ασκούν δυνάμεις πάνω σε ένα τρίτο φορτίο, η ολική δύναμη επί αυτού προκύπτει ως το διανυσματικό άθροισμα των δυνάμεων που θα ασκούσε επάνω του κάθε ένα από τα συγκεκριμένα φορτία ξεχωριστά. Αυτή είναι η αρχή της επαλληλίας των δυνάμεων και ισχύει προφανώς για οιονδήποτε αριθμό φορτίων. Εξυπακούεται ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των φορτίων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους τόσο πιο πολύπλοκος είναι ο υπολογισμός της τελικής συνισταμένης των ηλεκτρικών δυνάμεων.

Η τιμή της σταθεράς k στο σύστημα μονάδων SI είναι :

$$k = 8,987551787 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \approx 8,988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2,$$

όπου $C = \text{Coulomb}$, $N = \text{Newton}$.

Ένα Coulomb αντιπροσωπεύει το αντίθετο του ολικού φορτίου 6×10^{18} ηλεκτρονίων. Σε προβλήματα ηλεκτροστατικής η μονάδα coulomb είναι πολύ μεγάλη για τα συνήθη ηλεκτρικά φορτία. Δύο φορτία μέτρου 1 C ασκούν μεταξύ τους δυνάμεις ίσες με $9 \times 10^9 \text{ N}$, δηλαδή περίπου ενός εκατομμυρίων τόνων. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται υποπολλαπλάσια του coulomb όπως το $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$ ή $1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$. Για να δώσουμε μια εικόνα του μεγέθους αυτών των αριθμών αρκεί να πούμε ότι το φορτίο όλων των ηλεκτρονίων που περιέχονται σε ένα μικρό χάλκινο νόμισμα είναι περίπου ίσο με 10^5 C . Συνεπώς για να προκύψει μια αισθητή διαταραχή της ηλεκτρικής ουδετερότητας των φυσικών σωμάτων είναι αναγκαία η δράση τεραστίων δυνάμεων(1).

1.1.2 Το Ηλεκτρικό πεδίο – βασικές έννοιες – μονάδες μεγεθών

Όταν μέσα σε έναν συγκεκριμένο χώρο δεδομένης γεωμετρίας αναπτύσσεται – για τον οποιονδήποτε λόγο – μια ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου, τότε ο χώρος αυτός αποκτά κάποιες νέες ιδιότητες που σχετίζονται πάντοτε με την ύπαρξη του εν λόγω ηλεκτρικού φορτίου. Οι ιδιότητες της ίδιας φύσης εμφανίζονται και μεταξύ δύο σωμάτων που εμφανίζουν ηλεκτρικά φορτία. Η φύση των εν λόγω δυνάμεων είναι συγκεκριμένη και αποτελούν δυνάμεις τύπου Coulomb. Συνεπώς ο νόμος του Coulomb είναι αυτός που διέπει όλη την λειτουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου. Αυτό σημαίνει ότι ο χώρος του

ηλεκτρικού πεδίου είναι χώρος ανάπτυξης δυνάμεων Coulomb. Σύμφωνα με τον σχετικό νόμο οι δυνάμεις αυτές, οσονδήποτε μικρές και αν είναι, εν τούτοις υφίστανται και γίνονται μηδενικές μόνον σε άπειρη απόσταση από την υλική και γεωμετρική έδρα του συγκεκριμένου ηλεκτρικού φορτίου. Καταλήγοντας μπορούμε να πούμε ότι η παρουσία της ύπαρξης ενός ηλεκτρικού φορτίου τροποποιεί τις ιδιότητες του χώρου γύρω του, με αποτέλεσμα την εκδήλωση δυνάμεων ηλεκτρικού χαρακτήρα πάνω σε φορτισμένα σώματα που εισδύουν ή που ήδη υπάρχουν στην γειτνίαση του θεωρούμενου φορτίου. Ο τροποποιημένος αυτός χώρος ονομάζεται ηλεκτρικό πεδίο και κάθε σημείο του χαρακτηρίζεται από ένα διανυσματικό μέγεθος που λέγεται ένταση E του πεδίου ή απλώς πεδίο. Το ηλεκτρικό πεδίο εκτείνεται μέχρι το άπειρο και είναι ένα τυπικό διανυσματικό πεδίο, καθόσον χαρακτηρίζεται από ανύσματα, όπως η ηλεκτρική δύναμη και η ένταση. Για να διαπιστώσουμε την ύπαρξη ή μη ενός πεδίου χρησιμοποιούμε μια μέθοδο απλή : τοποθετούμε σε διαφορετικά σημεία του θεωρούμενου χώρου ένα φορτισμένο σώμα με καθορισμένο φορτίο, που ονομάζουμε *δοκιμαστικό φορτίο* q' . Αν το δοκιμαστικό φορτίο υποστεί τη δράση δύναμης σε εκείνο το σημείο τότε μπορούμε να ισχυριστούμε ότι εκεί υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο. Φυσικά η δύναμη ελέγχεται από την ικανότητά της να τροποποιεί την κινητική κατάσταση ή την μορφή του σώματος που φέρει το δοκιμαστικό φορτίο q' . Η ένταση E του πεδίου ή το πεδίο είναι διανυσματικό μέγεθος και συσχετίζεται στενά με την ηλεκτρική δύναμη F' . Ισχύει η εξής εξίσωση:

$$E = F'/q' \quad (2) \rightarrow F' = q' E \quad (3)$$

Το δοκιμαστικό φορτίο μπορεί να είναι θετικό ή αρνητικό. Αν είναι θετικό τότε η ένταση E του πεδίου θα είναι ομόρροπη με την δύναμη F' , ενώ αν είναι αρνητικό η ένταση του πεδίου θα είναι αντίρροπη ως προς την αναπτυσσόμενη ηλεκτρική δύναμη. Στο επίπεδο των μονάδων στο σύστημα SI η μονάδα έντασης πεδίου είναι 1 Newton/Coulomb. Η δύναμη του πεδίου δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο. Ο νόμος μεταβολής είναι ο νόμος του Coulomb. Συνεπώς η ένταση είναι ένα μέγεθος μεταβαλλόμενο σημείο προς σημείο και συνεπώς με άπειρες συνολικές τιμές τόσο ως προς το μέτρο της όσο και ως προς την διεύθυνση. Το απειροσύνηλο των εντάσεων του πεδίου αποτελεί μια μαθηματική αποτύπωση του ηλεκτρικού πεδίου στο χώρο που αυτό εκδηλώνεται. Το ηλεκτρικό πεδίο, όπως προαναφέραμε, είναι ένα διανυσματικό πεδίο, όπως π.χ το πεδίο βαρύτητας(1). Δεδομένου ότι ο χώρος καθορίζεται από τις τρεις

συντεταγμένες X, Y, Z έπεται ότι κάθε σημείο του χώρου εμφανίζει τρεις διαφορετικές συντεταγμένες και το σύνολο των σημειακών συναρτήσεων $E_1(x_1, y_1, z_1), E_2(x_2, y_2, z_2), E_3(x_3, y_3, z_3), \dots, E_n(x_n, y_n, z_n)$ αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση του ηλεκτρικού πεδίου, σύμφωνα με τις αρχές του Καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων. Εξυπακούεται ότι σε ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων μπορεί να εφαρμόσει κανείς όλες τις αρχές των διανυσματικών πράξεων, όπως η σύνθεση και η ανάλυση διανυσμάτων. Ο εν λόγω ορισμός για το ηλεκτρικό διανυσματικό πεδίο εμφανίζει μια μικρή δυσχέρεια : Η δύναμη η οποία ασκείται επί του ολικού φορτίου A από το δοκιμαστικό φορτίο q' στην περίπτωση στην οποία ο χώρος του πεδίου A είναι αγωγίμος, μπορεί να προκαλέσει μια παραμόρφωση της πυκνότητας του φορτίου και συνεπώς μια μεταβολή της δομής του πεδίου συναρτήσει του χρόνου και της αντίστασης μετακίνησης. Η παραμόρφωση της πυκνότητας προκύπτει από την μετακίνηση των σημειακών φορτίων λόγω έλξης ή άπωσης αυτών από το δοκιμαστικό φορτίο q' . Αν το δοκιμαστικό φορτίο q' είναι πολύ μικρό τότε και η μετακίνηση των φορτίων θα είναι επίσης πολύ μικρή ή και αμελητέα. Αν εισάγουμε στο σημείο αυτό την έννοια του ορίου, τότε μπορούμε να εκλεπτύνουμε τον ορισμό μας περί της έντασης του πεδίου θεωρώντας ότι το δοκιμαστικό φορτίο q' γίνεται ολόένα και μικρότερο τείνοντας προς το μηδέν, οπότε και η διαταραχή που προκαλείται στην ανακατανομή των φορτίων καθίσταται αμελητέα. Ήτοι:

$$E = \lim F'/q', \quad q' \rightarrow 0 \quad (4)$$

Στην περίπτωση ενός αγωγίμου σώματος, δηλαδή ενός αγωγού, όταν στο εσωτερικό του υπάρχει ηλεκτρικό πεδίο, τότε αυτό ασκεί ηλεκτρική δύναμη, η οποία προκαλεί την κίνηση των ηλεκτρικών φορτίων που ευρίσκονται εκεί. Αυτό συμβαίνει όταν έχουμε την περίπτωση ενός αγωγού, είτε αυτός είναι μεταλλικός, είτε ημιαγωγός, είτε ακόμη διάλυμα ενός χημικού σώματος που διίσταται σε ιόντα. Ωστόσο για λόγους μεθοδολογίας και εξ ορισμού στην ηλεκτροστατική μελετούμε περιπτώσεις όπου τα υφιστάμενα φορτία δεν κινούνται. Στην ηλεκτροδυναμική αντιθέτως μελετούμε κινούμενα φορτία. Συνεπώς στην ηλεκτροστατική το ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του υλικού ενός αγωγίμου σώματος πρέπει να μηδενίζεται. Αυτό βεβαίως δε συνεπάγεται ότι σε μια κοιλότητα στο εσωτερικό ενός αγωγού το πεδίο πρέπει να μηδενίζεται. Το μέτρο και η κατεύθυνση ενός ηλεκτρικού πεδίου μπορούν να μεταβάλλονται από σημείο σε σημείο, αλλά στην περίπτωση όπου αυτά είναι σταθερά σε μια ορισμένη περιοχή του χώρου ομιλούμε για ένα ομογενές

ηλεκτρικό πεδίο . Είναι εύκολο να βρούμε το ηλεκτρικό πεδίο του οποίου η πηγή έχει σημειακή κατανομή με φορτίο q . Ονομάζοντας σημείο πηγής S την θέση του φορτίου και σημείο πεδίου P το σημείο όπου θέλουμε να προσδιορίσουμε την ένταση του πεδίου, αν εισάγουμε ένα μοναδιαίο διάνυσμα $\hat{r}$ που κατευθύνεται από το σημείο της πηγής S προς το σημείο του πεδίου P και θέσουμε ένα μικρό δοκιμαστικό φορτίο q' στο σημείο P και σε απόσταση r , από το σημείο της πηγής, τότε η δύναμη F' δίδεται από τον νόμο του Coulomb :

$$F' = 1/4\pi\epsilon_0 \cdot |q \cdot q'| / r^2 \quad (5)$$

Με την εξίσωση (4) βρίσκουμε πως το μέτρο E του πεδίου στο σημείο P είναι :

$$E = 1/4\pi\epsilon_0 \cdot |q| / r^2 \quad (6)$$

Χρησιμοποιώντας το μοναδιαίο διάνυσμα $\hat{r}$ γράφουμε μια διανυσματική εξίσωση η οποία δίνει τόσο το μέτρο όσο και την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου E :

$$E = (1/4\pi\epsilon_0 \cdot q / r^2) \hat{r}$$

Εξ ορισμού, το ηλεκτρικό πεδίο ενός σημειακού φορτίου βγαίνει πάντα από ένα θετικό φορτίο και καταλήγει σε ένα φορτίο αρνητικό. Με την εισαγωγή της έννοιας του ηλεκτρικού πεδίου, η περιγραφή των ηλεκτρικών επιδράσεων γίνεται σε δύο στάδια :

1. Μια δεδομένη κατανομή φορτίου δρα σαν πηγή ηλεκτρικού πεδίου.
2. Το ηλεκτρικό πεδίο ασκεί στη συνέχεια δύναμη σε οποιοδήποτε φορτίο βρεθεί στο πεδίο.

Η ανάλυσή μας ακολουθεί δύο αντίστοιχα βήματα :

1. τον υπολογισμό του πεδίου που πηγάζει από την δεδομένη κατανομή φορτίου και τα αποτελέσματα του πεδίου σε ό,τι αφορά τις δυνάμεις και την κίνηση.
2. το βήμα αυτό σχετίζεται με την εφαρμογή των Νευτώνιων νόμων και των αρχών της ηλεκτροστατικής σε οποιοδήποτε υλικό φορέα φορτίου που εισέρχεται στο θεωρούμενο ηλεκτρικό πεδίο (1).

Στα ζωντανά συστήματα, όπως τα κύτταρα και οι πολυκύτταροι οργανισμοί, εξ αιτίας της δομής των κυτταρικών τους μεμβρανών, που είναι εφοδιασμένες με μηχανισμούς

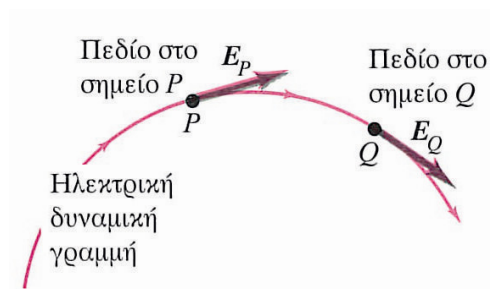
παθητικής αλλά και ενεργητικής μετακίνησης ιόντων μονοσθενών, δισθενών και τρισθενών τα ηλεκτρικά πεδία παίζουν κάποιο ρόλο στις κατανομές των εν λόγω ιόντων, όπως επίσης και στη διέλευση διά μέσου των αντίστοιχων εξειδικευμένων πόρων των εν λόγω μεμβρανών. Συνεπώς το ηλεκτρικό πεδίο είναι, κατ' αρχάς, σε θέση να επηρεάζει σταθερά την κίνηση των ιόντων και συνεπώς να δημιουργεί ηλεκτρικά φαινόμενα στα ζωντανά κύτταρα. Τα φαινόμενα αυτά της ιοντοφόρησης είναι υπεύθυνα για καταστάσεις όπως η διέγερση και η αποδιέγερση των διαφόρων τύπων διεγέρσιμων κυττάρων και επανειλημμένα έχουν χρησιμοποιηθεί μέσω ηλεκτροδίων στην ηλεκτροφυσιολογία, ήδη από το πρώτο τέταρτο του 20^{ου} αιώνα .

Όταν έχουμε την δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου που σχηματίζεται από την αλληλεπίδραση πολλών πεδίων προερχομένων από μεγάλο αριθμό πηγών φορτίων, τότε υποθέτουμε ότι κάθε μια από αυτές είναι μια πηγή σημειακού φορτίου $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$. Κατόπιν, εφ' όσον υπολογίσουμε τα αντίστοιχα πεδία $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ εφαρμόζουμε την αρχή της επαλληλίας για να βρούμε το συνολικό πεδίο E σε κάποιο σημείο P . Όταν πρόκειται για μια ιδιαίτερη κατανομή φορτίου, όπως π.χ. κατά μήκος μιας γραμμής, μέσα σε μια επιφάνεια, ή σε έναν τρισδιάστατο χώρο, τότε χρησιμοποιούμε κάποιους πρόσθετους όρους. Όταν πρόκειται για μια γραμμική κατανομή φορτίου χρησιμοποιούμε το γράμμα λ για να δείξουμε την γραμμική πυκνότητα φορτίου, η οποία μετράται σε C/m. Όταν το φορτίο κατανέμεται σε μια επιφάνεια χρησιμοποιούμε το σύμβολο σ που αντιστοιχεί στην επιφανειακή πυκνότητα φορτίου (δηλαδή το φορτίο ανά μονάδα επιφανείας, με μέτρο το C/m^2), ενώ όταν το φορτίο κατανέμεται σε τρισδιάστατο χώρο, τότε η πυκνότητα αυτού συμβολίζεται με το γράμμα ρ , που δηλώνει την πυκνότητα φορτίου στον χώρο (μετρούμενη σε C/m^3). Οι οριοθετήσεις αυτές είναι σε θέση να μας βοηθήσουν να πραγματοποιήσουμε υπολογισμούς έντασης πεδίου και συνθέσεις πεδίων σε πολύπλοκες γεωμετρικές δομές, οι οποίες μπορούν να αναλυθούν σε απλούστερα γεωμετρικά σχήματα.

1.1.3 Ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές

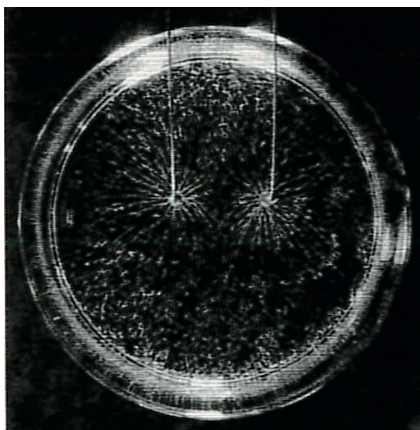
Η αφηρημένη έννοια του ηλεκτρικού πεδίου γίνεται πολύ πιο συγκεκριμένη όταν εισάγουμε την τεχνική της αναπαράστασής τους μέσω των λεγόμενων *δυναμικών γραμμών* αυτού. Οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου μπορούν να μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε μέσω της οπτικής μας αίσθησης την έννοια του. Ορίζουμε ως δυναμική

γραμμή ενός ηλεκτρικού πεδίου μια οποιαδήποτε γραμμή του χώρου έτσι ώστε σε κάθε σημείο αυτής η ένταση του πεδίου να είναι εφαπτόμενη. Η βασική ιδέα παρίσταται στο σχέδιο της Εικόνας 1, στο οποίο βλέπουμε το διάνυσμα της έντασης E του πεδίου να εφάπτεται σε διαφορετικά σημεία της δυναμικής γραμμής(1).



Εικόνα 1 Σε κάθε σημείο η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου εφάπτεται στη δυναμική γραμμή που περνάει από εκείνο το σημείο.

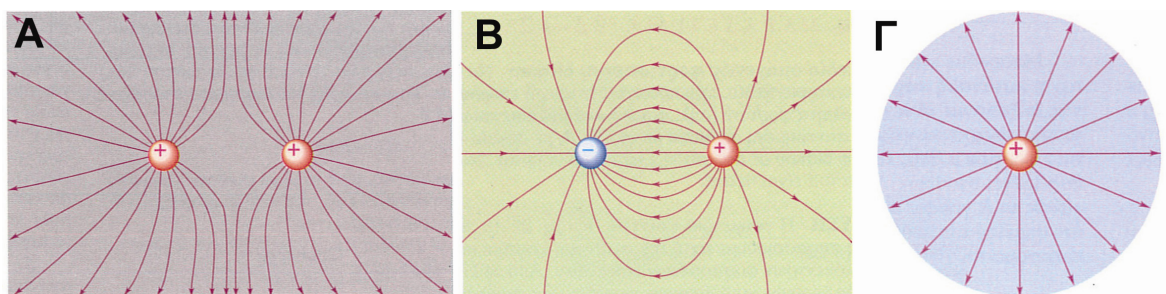
Η εισαγωγή της ιδέας των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών ανήκει στον Michael Faraday (1791-1867) με τις οποίες έδωσε μια οπτική εικόνα του ηλεκτρικού πεδίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2 Ηλεκτρικό πεδίο που προκαλείται από δύο σημειακά φορτία

Σήμερα χρησιμοποιείται περισσότερο ο όρος «γραμμές πεδίου» κι όχι τόσο ο όρος δυναμικές γραμμές. Συνεπώς οι ηλεκτρικές γραμμές μας δίνουν λεπτομερειακά την κατεύθυνση της E του πεδίου σε κάθε σημείο αυτού, ενώ η πυκνότητά τους μας δίνει μια κάποια οπτική ιδέα για το μέγεθος αυτού σε μια συγκεκριμένη του ζώνη. Όταν το πεδίο είναι ισχυρό, τότε η έντασή του είναι μεγάλη και οι δυναμικές γραμμές εμφανίζουν μια υψηλή πυκνότητα. Όταν το πεδίο είναι ασθενές τότε η έντασή του είναι μικρή και συνεπώς

οι ηλεκτρικές γραμμές είναι αραιές. Είναι πολύ σημαντικό να υπογραμμίσουμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο έχει σε κάθε σημείο του μια μοναδική διεύθυνση πράγμα που σημαίνει ότι από κάθε σημείο του χώρου περνά μόνον μια δυναμική γραμμή, με αποτέλεσμα οι δυναμικές ηλεκτρικές γραμμές να μην τέμνονται ποτέ. Στα σχέδια Α, Β και Γ φαίνονται σχηματικά οι δυναμικές γραμμές τριών ηλεκτρικών πεδίων που σχηματίζονται από διαφορετικά ηλεκτρικά φορτία (Εικόνα 3). Στο σχήμα Α έχουμε την εικόνα ενός πεδίου δημιουργούμενου περίξ ενός θετικού σημειακού φορτιού με τις δυναμικές γραμμές να ξεκινούν από αυτό και να αποκλίνουν με ακτινική σφαιρική συμμετρία. Στο σχήμα Β βλέπουμε το διάγραμμα των δυναμικών γραμμών ενός πεδίου που σχηματίζεται από δύο ίσα και αντίθετα φορτία, όπου οι δυναμικές γραμμές εξέρχονται από το θετικό φορτίο και καταλήγουν στο αρνητικό σχηματίζοντας όλο και ανοιχτότερες καμπύλες, που ωστόσο συγκλίνουν τελικά στο αρνητικό φορτίο. Στο σχήμα Γ βλέπουμε τις δυναμικές γραμμές ενός ηλεκτρικού πεδίου άπωσης που σχηματίζεται από δύο ίσα θετικά φορτία απέχοντα την ίδια απόσταση που απέχουν τα αντίστοιχα ετερόνυμα της εικόνας Β. Τα εν λόγω σχέδια ονομάζονται και απεικονίσεις πεδίων, ενώ στη φωτογραφία τάδε φαίνεται μια εποπτική απεικόνιση ενός ηλεκτρικού πεδίου προκαλούμενου από δύο σημειακά φορτία του ιδίου προσήμου (1).



Εικόνα 3 Ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές για ορισμένες κατανομές φορτίων. (Α) δύο ίσα θετικά φορτία, (Β) δύο αντίθετα φορτία και (Γ) Ένα μοναδικό θετικό φορτίο

1.1.4 Ηλεκτρικά δίπολα

Το ηλεκτρικό δίπολο αποτελεί μια διαμόρφωση ενός χαρακτηριστικού ηλεκτρικού πεδίου που σχηματίζεται από δύο ίσα και αντίθετα φορτία $+q$ και $-q$, τα οποία απέχουν μεταξύ τους μια απόσταση l . Στην πραγματικότητα τα ηλεκτρικά δίπολα φαίνεται ότι μια γενικευμένη δομή σημειακής κατανομής φορτίων αντιθέτου πρόσημου, η οποία απαντά με

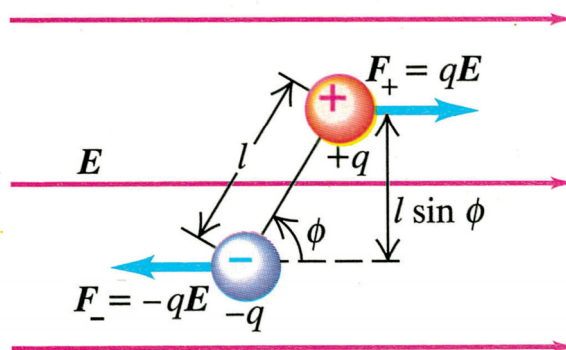
εξαιρετικά υψηλή συχνότητα σε όλον τον φυσικό κόσμο. Στην πραγματικότητα κάθε άτομο είναι, θεωρητικά, ένα σύστημα ηλεκτρικών δίπολων καθόσον κάθε ηλεκτρόνιο έχει την δική του οντότητα και ασκεί ελκτικές δράσεις επί των πρωτονίων του πυρήνα. Συνεπώς λογικά θα μπορούσε κανείς να υποθέσει ότι, συνολικά οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ ηλεκτρονίων και πρωτονίων του πυρήνα συναποτελούν για κάθε άτομο ένα σύνολο συνιστάμενο από ηλεκτρικά δίπολα πρωτονίου – ηλεκτρονίου, στα οποία μπορεί κανείς να εφαρμόσει τις αρχές των συνδυασμών ανά ζεύγος πρωτονίου – ηλεκτρονίου. Θα έπρεπε κανείς να αναμένει ότι οι ελκτικές δυνάμεις, οι ασκούμενες μεταξύ πρωτονίων και ηλεκτρονίων θα κινούσαν τα ηλεκτρόνια να προσπέσουν επί του πυρήνα καθόσον λόγω του μικρού r , δηλαδή της ακτίνας τροχιάς, οι ασκούμενες δυνάμεις Coulomb θα ήσαν τεράστιες, τείνουσες στο άπειρο όσον η μεταξύ τους απόσταση τείνει προς το μηδέν. Ωστόσο αυτό δεν συμβαίνει για λόγους κβαντομηχανικούς καθόσον οι τροχίες των ηλεκτρονίων (τα τροχιακά τους) υπόκεινται σε κβάντωση, οπότε δεν είναι όλες επιτρεπτές. Επίσης η περιφορά των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα – κατά το μοντέλο του Bohr – θα οδηγούσε σε εκπομπή ενέργειας υπό την μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, πράγμα που δεν παρατηρείται υπό σταθερή κατάσταση, αλλά μόνο στην περίπτωση των φαινομένων αποδιέγερσης. Συνεπώς αυτά τα στοιχειώδη ηλεκτρικά δίπολα φαίνονται εξαιρετικώς σταθερά. Αυτό σημαίνει ότι στον κόσμο μας οι ατομικές δομές εμφανίζουν μια πολύ μεγάλη σταθερότητα και ότι η διπολική δομή είναι κάτι το πολύ συχνό και το ιδιαιτέρως σταθερό, επειδή δεν είναι δυνατόν να υπάρξει γεωμετρική (ως προς τον καταλαμβανόμενο χώρο) ταύτιση πρωτονίων και ηλεκτρονίων μέσω απώλειας ενέργειας περιφοράς και συνακόλουθης φυσικής πρόσκρουσης σε μη διεγερμένη κατάσταση (Πυρηνική Φυσική). Τέτοιες εξαναγκασμένες προσκρούσεις λαμβάνουν χώρα μόνον σε επιταχυντές σωματιδίων. Ωστόσο είναι δυνατόν να υπάρξει, υπό συνθήκες μη εξαναγκασμένες, πρόσκρουση μεταξύ ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου (ηλεκτρόνιο αντιύλης) στην οποία και τα δύο υλικά σωματίδια εξαφανίζονται και στο μέρος τους εμφανίζεται ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας (Πυρηνική Φυσική). Αυτό το φαινόμενο ισχύει και αντίθετως, το δε αντίθετό του ονομάζεται δίδυμη γένεση, κατά την οποία ένα φωτόνιο εξαφανίζεται και στην θέση του εμφανίζονται ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο ίσων και αντιθέτων ορμών (Πυρηνική Φυσική). Ωστόσο το ποζιτρόνιο είναι ένα σωματίδιο αντιύλης οπότε είναι ήδη κάτι ποιοτικώς διαφορετικό εν συγκρίσει προς το ηλεκτρόνιο, που είναι το κατοπτρικό του αντίστοιχο, ως προς το φορτίο και την ύλη του. Έτσι λοιπόν το ηλεκτρικό δίπολο παραμένει μια φυσική δομή κυριαρχική με αποτέλεσμα η παρουσία

της να είναι ιδιαίτερος σημαντική για την ανάλυση των ηλεκτρικών δυναμικών φαινομένων.

Για να υπάρχει μια ομοιομορφία στην περαιτέρω μας ανάλυση (καθόσον θα χρησιμοποιήσουμε συχνά την ιδέα του ηλεκτρικού δίπολου σε πολλά φυσικά συστήματα από τα μακρομόρια και τις κυτταρικές μεμβράνες μέχρι τις κεραίες των πομπών) θέτουμε τα εξής ερωτήματα : 1^ο) ποιές είναι οι δυνάμεις και οι ροπές που αναπτύσσονται πάνω στο ηλεκτρικό δίπολο εξ αιτίας ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου; 2^ο) τι πεδίο δημιουργείται εκ μέρους του δίπολου; Για να απαντήσουμε στα εν λόγω ερωτήματα ας ξεκινήσουμε την ανάλυσή μας θέτοντας το θεωρούμενο ηλεκτρικό δίπολο ενός ομογενούς εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου εντάσεως E . Οι δυνάμεις F_+ και F_- που αναπτύσσονται πάνω στα δύο φορτία του δίπολου είναι αντίθετης κατεύθυνσης αλλά ίσου μέτρου κατ' απόλυτον τιμή, οπότε εφόσον κείνται επί του αυτού φορέως συντιθέμενες αλληλοαναιρούνται. Το ίδιο ισχύει και όταν οι δύο ηλεκτρικές δυνάμεις δεν είναι συγγραμμικές. Συνεπώς η *συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη που αναπτύσσεται επί των φορτίων ενός δίπολου μέσα σε εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδενική*. Ωστόσο στην περίπτωση των μη συγγραμμικών ηλεκτρικών δυνάμεων η συνισταμένη ροπή τους δεν μηδενίζεται καθόσον αυτές αποτελούν ζεύγος δυνάμεων. Αν η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του άξονα του δίπολου και του διανύσματος του ηλεκτρικού πεδίου E είναι ίση με ϕ , τότε η ροπή που ασκείται από το δίπολο είναι :

$$\tau = (qE) \cdot (l \cdot \sin \phi) \quad (7),$$

όπου $l \cdot \sin \phi$ είναι η απόσταση των φορέων των δύο δυνάμεων (Εικόνα 4) (Young HD, 1994).



Εικόνα 4 Η συνισταμένη δύναμη πάνω στο ηλεκτρικό δίπολο μηδενίζεται, αλλά παραμένει μια ροπή που κατευθύνεται προς τη σελίδα και τείνει να περιστρέψει το δίπολο δεξιόστροφα.

Ο υπολογισμός της ροπής δύναμης αναφέρεται πάντοτε προς ένα συγκεκριμένο σημείο. Ωστόσο η ροπή ζεύγους δυνάμεων είναι πάντα η ίδια για όλα τα θεωρούμενα σημεία. Βάσει των ανωτέρω ορίζουμε ως *ηλεκτρική διπολική ροπή* p το γινόμενο του φορτίου q επί το μήκος l , με μονάδες φορτίου επί απόστασης. Στο σύστημα SI οι μονάδες ροπής είναι C.m (Coulomb επί μέτρα). Η ροπή τ εκφρασμένη μέσω της βοήθειας της ηλεκτρικής διπολικής ροπής p γράφεται ως εξής :

$$\tau = pE \sin \varphi \quad (8).$$

Αναδιατυπώνοντας την σχέση αυτή σε πιο συμπαγή διανυσματική μορφή ορίζουμε την ηλεκτρική διπολική ροπή ως εκείνο το διανυσματικό μέγεθος p μέτρου ql και κατεύθυνση από το αρνητικό στο θετικό φορτίο επί του άξονα του δίπολου. Έχοντας υπόψη ότι η γωνία μεταξύ των δύο διανυσμάτων p & E είναι φ τότε η διανυσματική εξίσωση γράφεται ως εξής :

$$\tau = p \times E \quad (9).$$

Η ροπή αποκτά μέγιστη τιμή όταν τα διανύσματα p και E είναι κάθετα μεταξύ τους, ενώ αντιθέτως μηδενίζεται όταν είναι παράλληλα ή αντιπαράλληλα. Η ροπή τείνει πάντα να περιστρέψει το p , ώστε να το ευθυγραμμίσει με το E . Η θέση $\varphi = 0$, όταν το p προς το E αποτελεί θέση ασταθούς ισορροπίας.

Όταν ένα δίπολο κείται στο εσωτερικό ενός ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου και η διάταξη του άξονά του σχηματίζει μια γωνία με την διεύθυνση της E , τότε αναγκαστικά η ροπή της ηλεκτρικής διπολικής δύναμης θα στρέψει το δίπολο και θα εκτελέσει έργο με αντίστοιχη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας. Το έργο dW που εκτελεί μια ροπή τ κατά την διάρκεια μιας απειροστής στροφής κατά $d\Phi$ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$dW = \tau d\Phi = - pE \sin \Phi d\Phi \quad (10).$$

Για μια πεπερασμένη στροφή από φ_1 έως φ_2 , το ολικό έργο που εκτελείται πάνω στο δίπολο είναι :

$$W = \int -pE \sin\Phi d\Phi = pE \cos\Phi_2 - pE \cos\Phi_1$$

Το έργο είναι αντίθετο της μεταβολής της δυναμικής ενέργειας, όπως στην εξίσωση $W = U_1 - U_2$. Συνεπώς η δυναμική ενέργεια του εν λόγω συστήματος είναι

$$U(\Phi) = -pE \cos\Phi \quad (11)$$

Στην εξίσωση αυτή φαίνεται το *βαθμωτό γινόμενο* $p \cdot E = pE \cos\varphi$ και συνεπώς μπορούμε να το αναδιατυπώσουμε ως εξής :

$$U = -p \cdot E \quad (12)$$

Η δυναμική ενέργεια ελαχιστοποιείται στην θέση της ευσταθούς ισορροπίας, όπου $\varphi = 0$ και το p είναι παράλληλο με το E , ενώ γίνεται μέγιστη όταν $\varphi = \pi$ και το p είναι αντιπαράλληλο του E . Για $\varphi = \pi/2$ με το διάνυσμα p κάθετο στο E η δυναμική ενέργεια U μηδενίζεται.

1.2 Ο Νόμος του Gauss και η Ηλεκτρική Ροή

1.2.1 Η ηλεκτρική ροή

Τόσο ο νόμος του Gauss όσο και αυτός του Coulomb είναι δύο διαφορετικές διατυπώσεις μιας μόνον βασικής σχέσης και συγκεκριμένα αυτήν που διέπει την κατανομή ηλεκτρικού φορτίου σε φυσικές δομές και του αντίστοιχου ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται εξ αιτίας του εν λόγω φορτίου. Ο νόμος του Coulomb περιγράφει μαθηματικά το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται σε ένα σημείο P εξ αιτίας ενός φορτίου q το οποίο εδράζεται επί ενός γεωμετρικού σημείου. Για τον υπολογισμό πεδίων προερχομένων από μια εκτεταμένη κατανομή φορτίων, πρέπει να εφαρμόσουμε την αρχή της επαλληλίας θεωρώντας την εν λόγω κατανομή ως ένα σύνολο σημειακών φορτίων διεσπαρμένων σε ένα φυσικό σώμα (γραμμή, επιφάνεια, ή χώρο). Αν θεωρήσουμε την ύπαρξη ενός συνολικού φορτίου κατανεμημένου με κάποιον συγκεκριμένο τρόπο επί ενός φυσικού σώματος και

ταυτοχρόνως περιβάλλουμε το σώμα αυτό με μια γεωμετρική επιφάνεια A τότε ο νόμος του Gauss εκφράζει μια σχέση μεταξύ του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο της επιφάνειας και του ολικού φορτίου το οποίο περικλείεται από την εν λόγω επιφάνεια. Για τη διατύπωση του νόμου του Gauss είναι απαραίτητος ο ορισμός της ηλεκτρικής ροής Φ διά μέσου της θεωρούμενης επιφάνειας A . Ορίζουμε ως ηλεκτρική ροή Φ_E , διερχόμενη δια της επιφανείας A , το γινόμενο της έντασης του πεδίου E επί το εμβαδόν A της θεωρούμενης επιφανείας. Ήτοι :

$$\Phi_E = E.A \quad (13)$$

Η ηλεκτρική ροή μπορεί σχηματικά να απεικονιστεί μέσω του συνόλου των δυναμικών γραμμών του πεδίου που διέρχονται δια της θεωρηθείσας επιφάνειας και συνεπώς αν αυτή είναι μεγαλύτερη τότε ένα μεγαλύτερο πλήθος δυναμικών γραμμών διέρχονται μέσω αυτής, όπως επίσης όταν το ηλεκτρικό πεδίο είναι ισχυρότερο σημαίνει ότι μεγαλύτερο πλήθος δυναμικών γραμμών διέρχεται από τη συγκεκριμένη επιφάνεια, δηλαδή η ηλεκτρική ροή Φ είναι ισχυρότερη. Αν η μικρή επιφάνεια A είναι κάθετη προς το διάνυσμα της έντασης E του πεδίου τότε διέρχεται δι αυτής το μέγιστο των δυναμικών γραμμών, ενώ αν εμφανίζει γωνία με την ένταση του πεδίου τότε ο αριθμός των δυναμικών γραμμών είναι μικρότερος κατά τον παράγοντα $\cos\varphi$. Δηλαδή λαμβάνουμε ως επιφάνεια ηλεκτρικής ροής την προβολή της θεωρούμενης επιφάνειας A επί του κάθετου επιπέδου προς τον φορέα του διανύσματος της έντασης. Συνεπώς ο ορισμός της ηλεκτρικής ροής γενικεύεται ως εξής:

$$\Phi_E = E.A.\cos\varphi \quad (14),$$

όπου $E.\cos\varphi$ είναι η συνιστώσα του διανύσματος E που είναι κάθετη στην επιφάνεια A . Σε αυτή την προσέγγιση θεωρούμε πάντα ότι το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομογενές και συνεπώς η έντασή του έχει σταθερό μέτρο και φορά. Θέτοντας $E.\cos\varphi = E_1$ έχουμε τελικά μια νέα διατύπωση της εξίσωσης 14 ως εξής:

$$\Phi_E = E_1.A \quad (15).$$

Τέλος, εισάγοντας την έννοια του διανυσματικού εμβαδού A , δηλαδή μια διανυσματική ποσότητα με μέτρο A και κατεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια την οποία θεωρούμε εκάστοτε – και η οποία αποδίδει τόσο το μέτρο του εμβαδού της επιφάνειας όσο και τον προσανατολισμό της στον χώρο, η σχέση 15 γράφεται:

$$\Phi_E = E \cdot A \quad (16).$$

Οι μονάδες της ηλεκτρικής ροής στο σύστημα SI είναι ίση προς $1\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}(1)$.

Στις περιπτώσεις όπου το ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι ομογενές, όπως επίσης και η επιφάνεια δεν είναι επίπεδη αλλά καμπύλη, τότε διαιρούμε αυτή σε πολλές μικρές επιφάνειες με στοιχειώδη εμβαδά dA , υπολογίζουμε την ηλεκτρική ροή διά μέσω εκάστου εξ αυτών και ολοκληρώνουμε τα αποτελέσματα προκειμένου να εξάγουμε την ολική ηλεκτρική ροή. Δηλαδή

$$\Phi = \int E \cdot \cos\phi \cdot dA = \int E_{\perp} \cdot dA = \int E \cdot dA \quad (17)$$

Το ολοκλήρωμα αυτό καλείται επιφανειακό ολοκλήρωμα της συνιστώσας $E_{\perp}$ εφ' όλης της επιφανείας, ή εναλλακτικώς επιφανειακό ολοκλήρωμα της ποσότητας $E \cdot dA$. Η ηλεκτρική ροή ως έννοια δεν είναι εύκολο να γίνει αντιληπτή αν και το παράδειγμα της διόδου των δυναμικών γραμμών ενός πεδίου μέσω μιας επιφάνειας καθιστά πιο χειροπιαστό το νόημά της, καθόσον οι δυναμικές γραμμές είναι φυσικές οντότητες που μπορούν να δειχθούν εποπτικώς, όπως ήδη προαναφέραμε. Το μηχανικό ανάλογο της ηλεκτρικής ροής είναι η ροή ενός υγρού, και περισσότερο η έννοια της παροχής dV/dt , η οποία ισούται με το γινόμενο του εμβαδού της διατομής του αγωγού δια μέσου του οποίου λαμβάνει χώρα η ροή, επί την ταχύτητα v της ροής. Γενικώς μπορούμε να θεωρήσουμε την παροχή μέσω μιας οποιασδήποτε επιφανείας ευρισκόμενης μέσα σε ένα ρέον υγρό και η οποία έχει εμβαδόν dA . Αν προσομοιάσουμε την εν λόγω επιφάνεια dA με ένα κλειστό βρόχο ορθογώνιου σχήματος, ο οποίος σχηματίζει μια γωνία ϕ ως προς την διεύθυνση της ροής, τότε η παροχή είναι ίση με $dV/dt = v \cdot dA \cdot \cos\phi$. Αν χρησιμοποιήσουμε το στοιχειώδες εμβαδό dA , η παροχή είναι ίση προς $v \cdot dA$. Όταν $\phi = 0$, τότε η παροχή μηδενίζεται καθόσον το $\cos\phi = 1$. Επίσης $v \cdot \sin\phi$ είναι ίσο προς την κάθετη συνιστώσα $v_{\perp}$ της v στην επιφάνεια dA , ούτως ώστε $dV/dt = v \cdot dA \cdot \sin\phi = v_{\perp} \cdot dA = v \cdot dA$.

Το εν λόγω πηλίκο dV/dt είναι η ποσότητα ροής (παροχή) εντός χρόνου dt διά μέσω της επιφάνειας dA . Η ποσότητα αυτή αποτελεί το υδροδυναμικό ανάλογο της ηλεκτρικής ροής, ωστόσο πρέπει να λαμβάνουμε σταθερά υπόψιν μας ότι στην περίπτωση του ηλεκτρικού πεδίου δεν υπάρχει κάποια ροή ύλης παρά μόνον μια γεωμετρική διαμόρφωση του χώρου – εξ αιτίας ενός ηλεκτρικού φορτίου – εντός του οποίου ασκούνται δυνάμεις επί άλλων φορτίων και συνακόλουθα των υλικών τους φορέων. Εισάγοντας ένα μοναδιαίο διάνυσμα n κάθετο προς την επιφάνεια ροής dA έχουμε $dA = n \cdot dA$. Δεδομένου ότι κάθε στοιχειώδης επιφάνεια εμφανίζει πάντοτε δύο όψεις – τουλάχιστον στην συνήθη γεωμετρία, καθόσον υπάρχει και η γεωμετρικώς μονόπλευρη επιφάνεια της ταινίας του Möbius στην τοπολογία – είναι σημαντικό να διευκρινίζουμε ποιά από τις δύο κατευθύνσεις για το n και το dA επιλέγουμε. Κατά γενικό τρόπο όταν αναφερόμαστε στον νόμο του Gauss εννοούμε πάντα την ολική ροή η οποία διέρχεται μέσω μιας επιφάνειας κλειστής, στην οποία διακρίνουμε πάντοτε την εξωτερική και την εσωτερική όψη. Στην περίπτωση του νόμου του Gauss επιλέγουμε πάντοτε εκείνη την κατεύθυνση του n που οδεύει προς τον εξωτερικό χώρο της θεωρούμενης επιφάνειας και εννοούμε την ροή που διαπερνά προς τα έξω την εν λόγω επιφάνεια.

1.2.2 Ο Νόμος του Gauss

Εφόσον προσδιορίσαμε επαρκώς την έννοια και την φύση της ηλεκτρικής ροής προχωρούμε τώρα στην διατύπωση του νόμου του Gauss ως εξής: *Η ολική ηλεκτρική ροή η οποία διέρχεται μέσω μιας κλειστής επιφανείας οιοδήποτε σχήματος και μεγέθους είναι ανάλογη προς το ολικό φορτίο που εμπεριέχεται στο εσωτερικό της θεωρούμενης επιφανείας.* Αν θεωρήσουμε το πεδίο ενός σημειακού θετικού φορτίου q , βάσει των συμβάσεων που θέσαμε, το εν λόγω πεδίο εκτείνεται μέσα στον χώρο μιας σφαίρας με γεωμετρικό κέντρο τη θέση του συγκεκριμένου φορτίου, οι δυναμικές γραμμές του οποίου έχουν την διεύθυνση των ακτίνων της σφαίρας αποκλίνοντας μεταξύ τους καθώς απομακρύνονται από το κέντρο του σχήματος. Επίσης και η ένταση του πεδίου βαίνει συνεχώς μειούμενη, βάσει του νόμου του Coulomb. Αν η ακτίνα της σφαιρικής επιφάνειας είναι R τότε το μέτρο της έντασης E του ηλεκτρικού πεδίου επί οποιουδήποτε σημείου της θεωρούμενης επιφάνειας εξάγεται από την σχέση:

$$E = 1/4\pi\epsilon_0 \times q/R^2 \quad (18)$$

Λόγω της εξίσωσης προκύπτει ότι η ολική ηλεκτρική ροή που διέρχεται από την σφαιρική επιφάνεια ακτίνας R δίδεται από την ακόλουθη σχέση :

$$\Phi_E = E.A = 1/4\pi\epsilon_0 \times q/R^2 \times (4\pi R^2) = q/\epsilon_0 \quad (19)$$

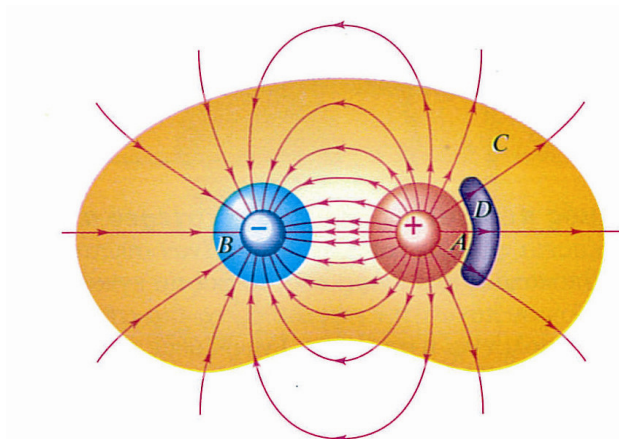
Συνεπώς η ολική ροή είναι ανεξάρτητη από την ακτίνα της σφαίρας και εξαρτάται μόνον από το φορτίο το περικλειόμενο στο εσωτερικό αυτής. Αν θεωρήσουμε την περίπτωση δύο συγκεντρικών σφαιρών με ακτίνες R και 2R και δύο αντίστοιχους στοιχειώδεις σφαιρικούς τομείς επιφανείας dA και $4dA$ οι ηλεκτρικές δυναμικές γραμμές που διέρχονται από την επιφάνεια της μικρής σφαίρας θα διέρχονται και από την μεγεθυμένη προβολή της στην σφαίρα της διπλάσιας ακτίνας, με την διαφορά ότι οι δυναμικές γραμμές του πεδίου θα είναι πιο αραιές εκεί ενώ και η ένταση αυτού θα είναι μειωμένη εφ' όσον ο R^2 παρονομαστής είναι $4R^2$ και όχι R^2 . Ωστόσο η συνολική ηλεκτρική ροή είναι η ίδια διά μέσω και των δύο στοιχειωδών επιφανειών, όπως επίσης και η ολική ηλεκτρική ροή που διέρχεται και από τις δύο συγκεντρικές σφαιρικές επιφάνειες. Αν τέλος θεωρήσουμε μια άλλη κλειστή επιφάνεια σχήματος ακανόνιστου και πάλι η ολική ροή ηλεκτρική ροή θα είναι αμετάβλητη και ίση με εκείνη που διέρχεται από τις δύο προαναφερθείσες συγκεντρικές σφαίρες. Αν τέλος το ηλεκτρικό πεδίο προέρχεται από πολλά σημειακά φορτία, τότε θα ληφθεί, μέσω της αρχής της επαλληλίας, το άθροισμα των επί μέρους πεδίων και των αντίστοιχων ηλεκτρικών ροών που προκαλούν μέσω της κλειστής επιφάνειας. Σε αυτήν την περίπτωση υποθέτουμε ότι η θεωρούμενη κλειστή επιφάνεια καλύπτει όλο το πλήθος των σημειακών φορτίων $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$, ενώ το ολικό συνιστάμενο ηλεκτρικό πεδίο E είναι ίσο προς το διανυσματικό άθροισμα των επί μέρους πεδίων των στοιχειωδών φορτίων ήτοι $E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n$. Αν θεωρήσουμε μια στοιχειώδη επιφάνεια dA της κλειστής επιφάνειας που περιβάλλει τα ηλεκτρικά φορτία και στην οποία το τοπικό διάνυσμα της έντασης του συνιστάμενου πεδίου είναι dE με φορά κάθετη στην στοιχειώδη επιφάνεια dA . Γενικεύοντας αυτήν τη θεώρηση για κάθε σημείο και προσθέτοντας τα αποτελέσματα έχουμε μια γενική διατύπωση του νόμου του Gauss:

$$\oint E.dA = Q/\epsilon_0 \quad (20)$$

όπου το ολοκλήρωμα είναι ένα ολοκλήρωμα κλειστό (κυκλικό) για όλη την θεωρούμενη κλειστή επιφάνεια που περικλείει τα φορτία. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τον ορισμό του $Q_I = q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n$ καθώς και την εξίσωση (17) η ανωτέρω εξίσωση γράφεται με τις ακόλουθες μορφές :

$$\int E \cdot \cos\phi \cdot dA = \int E_{\perp} \cdot dA = \int E \cdot dA = \Sigma q_i / \epsilon_0 = Q_I / \epsilon_0 \quad (21)$$

Στην εξίσωση αυτή το ολικό φορτίο Q_I είναι ίσο με το άθροισμα όλων των στοιχειωδών φορτίων που ευρίσκονται στο εσωτερικό της θεωρούμενης κλειστής επιφάνειας, ενώ το $E_{\perp}$ αντιπροσωπεύει την ολική συνιστάμενη ένταση σε κάθε σημείο της θεωρούμενης επιφάνειας. Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί ότι το συνιστάμενο ολικό πεδίο μπορεί να σχηματίζεται από την αλληλεπίδραση τόσο φορτίων περικλειομένων από την κλειστή επιφάνεια, όσο και από φορτία ευρισκομένων έξωθεν αυτής. Επειδή ακριβώς τα εξωτερικά φορτία δεν συμμετέχουν στην διαμόρφωση της ολικής ηλεκτρικής ροής διά μέσου της επιφανείας αυτό συνεπάγεται ότι η εξίσωση (21) έχει πλήρη ισχύ και στην περίπτωση στην οποία υπάρχουν ηλεκτρικά φορτία εξωτερικά της κλειστής επιφάνειας. Όπως είναι φυσικό τα φορτία αυτά συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό πεδίο το οποίο υπάρχει επί αυτής της επιφάνειας. Από την εξίσωση (21) βλέπουμε ότι ο κρίσιμος παράγοντας αναλογίας της ηλεκτρικής ροής αντιπροσωπεύεται από το ολικό φορτίο Q_I , ενώ η σταθερά ϵ_0 έχει πάντα την ίδια τιμή ($\epsilon_0 = 8,988 \times 10^{-12} \cdot (C^2/N) \cdot m^2$). Όταν το Q_I είναι μηδέν, τότε η ηλεκτρική ροή η διερχόμενη διά της κλειστής επιφάνειας είναι μηδέν. Ωστόσο είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι σε ορισμένα σημεία, ανάλογα με την φύση του φορτίου και την θεώρηση των δύο όψεων της κλειστής επιφάνειας η ροή μπορεί να είναι αρνητική ή θετική. Ένα τυπικώς αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αυτής της κατάστασης δείχνουμε στην Εικόνα 5 (1).



Εικόνα 5 Ο ολικός αριθμός των δυναμικών γραμμών που εξέρχονται από μια κλειστή επιφάνεια είναι ανάλογος προς το ολικό φορτίο που περικλείει

Στην Εικόνα 5 βλέπουμε τη διαμόρφωση της ηλεκτρικής ροής, η οποία διέρχεται μέσω μιας κλειστής επιφανείας που περικλείει δύο ίσα και αντιθέτου φόρτισης ηλεκτρικά φορτία. Συμφώνως με Γ τα ανωτέρω λεχθέντα η ολική ηλεκτρική ροή διά μέσου της επιφανείας είναι ανάλογη με τον αριθμό των ηλεκτρικών δυναμικών γραμμών. Αναλυτικά έχουμε τα εξής: η επιφάνεια A που περικλείει το θετικό φορτίο $+q$ διαπερνάται από μια ηλεκτρική ροή ανάλογη του φορτίου με τις δυναμικές της γραμμές να κατευθύνονται προς το εξωτερικό της επιφανείας. Η επιφάνεια B που περικλείει το αρνητικό φορτίο διαπερνάται επίσης από μια ίση και αντίθεση ηλεκτρική ροή αλλά με φορά στρεφόμενη προς το εσωτερικό της επιφανείας. Η κλειστή επιφάνεια Γ που περιλαμβάνει και τα δύο ίσου μέτρου αλλά αντιθέτου πρόσημου φορτία διαπερνάται από δύο τύπους ηλεκτρικής ροής ίσες κατ' απόλυτον τιμή μεταξύ τους αλλά αντίθετης κατεύθυνσης, ήτοι : μια ηλεκτρική ροή Φ_A οφειλόμενη στο φορτίο $+q$ με κατεύθυνση προς το εξωτερικό της εν λόγω επιφανείας και μια ηλεκτρική ροή Φ_B , οφειλόμενη στο αρνητικό φορτίο $-q$, με κατεύθυνση της προς τα έσω της επιφανείας Γ . Συνεπώς το ολικό άθροισμα των δύο ροών ισούται με το μηδέν. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί το ολικό φορτίο που συντίθεται από την άθροιση των ίσων και αντιθέτων φορτίων $+q$ και $-q$ είναι μηδενικό, λόγω αμοιβαίας εξουδετέρωσης. Συνεπώς $Q_i = 0$. Ο ολικός αριθμός των δυναμικών γραμμών που διέρχονται από την επιφάνεια είναι μηδενικός, όπως επίσης μηδενικό είναι και το ολικό ηλεκτρικό φορτίο. Ωστόσο αν μέσα στο σύμπλεγμα των επιφανειών θεωρήσουμε και μια άλλη επιφάνεια, έστω Δ , επίσης κλειστή, στο δεξιό μέρος της επιφανείας A που περικλείει το θετικό φορτίο, βλέπουμε να διαπερνάται από έναν συγκεκριμένο αριθμό δυναμικών γραμμών κατευθυνόμενων προς τα έξω, αλλά και ένα ίσο αριθμό δυναμικών γραμμών

προερχομένων από το αρνητικό φορτίο. Στην περίπτωση αυτή η ηλεκτρική ροή είναι επίσης μηδενική διότι υπάρχει ένα πλήρες ισοζύγιο εισερχομένης αρνητικής και εξερχομένης θετικής ηλεκτρικής ροής, όπως επίσης το περικλειόμενο φορτίο είναι μηδενικό. Τα σημεία εκείνα στα οποία η ένταση E του πεδίου δεν είναι κάθετη στην επιφάνεια δεν επηρεάζουν τον υπολογισμό του αριθμού των δυναμικών γραμμών.

1.2.3 Εφαρμογές του νόμου του Gauss

Ο νόμος του Gauss είναι απόλυτα γενικός και ισχύει για την οιαδήποτε κατανομή φορτίου σε κάθε δυνατή γεωμετρική επιφάνεια του Καρτεσιανού χώρου. Μπορούμε να πούμε ότι ακόμη και τα πλέον πολύπλοκα σχήματα επιφανειών (π.χ επιφάνειες μεγάλης πτύχωσης, όπως οι φυσικές γεωλογικές και βιολογικές δομές) υπακούουν στον νόμο του Gauss. Δεν μας είναι γνωστό τι ισχύει για επιφάνειες σχημάτων όπως η ταινία του Möbius.

Πρέπει, ωστόσο, να λάβουμε υπ όψιν μας ότι όλα τα γνωστά σχήματα μπορούν να προκύψουν από την θεωρία των καταστροφών του Rene Thom. Ο νόμος του Gauss είναι ιδιαίτερος χρήσιμος όταν ένα σύστημα έχει ιδιότητες συμμετρίας, βάσει των οποίων είναι σχετικά εύκολο να υπολογίσουμε τα ολοκληρώματα ροής. Η αμφίδρομη φύση του νόμου του Gauss μας επιτρέπει να υπολογίσουμε το πεδίο σε συμμετρικές κατανομές φορτίου, όπως επίσης γνωρίζοντας το πεδίο να προσδιορίσουμε την κατανομή του φορτίου, όπως π.χ φορτία επί αγωγίων σωμάτων φυσικού ή τεχνητού τύπου. Στο λήμμα αυτό έχουμε συγκεντρώσει μερικές σημαντικές περιπτώσεις εφαρμογών, οι οποίες συναντώνται πολύ συχνά σε ποικίλα προβλήματα της ηλεκτροστατικής αλλά και γενικότερα του ηλεκτρισμού. Τα ηλεκτρικά πεδία αυτών των απλών κατανομών φορτίου εμφανίζονται στον πίνακα που ακολουθεί στο τέλος του συγκεκριμένου κεφαλαίου. Οι αναφερόμενες περιπτώσεις είναι οι εξής : 1^{ov}) πεδίο μιας αγωγίμης φορτισμένης σφαίρας, 2^{ov}) πεδίο γραμμικού φορτίου (πεδίο γραμμικού αγωγού), 3^{ov}) πεδίου επιπέδου φύλλου απείρων διαστάσεων, 4^{ov}) ομοιόμορφη φορτισμένη σφαίρα, 5^{ov}) πεδίο παράλληλων αγωγίων πλακών με αντίθετα φορτία (που παραπέμπει στην περίπτωση του σπουδαίου κεφαλαίου των πυκνωτών, οι οποίοι είναι και το ηλεκτρικό μοντέλο των κυτταρικών μεμβρανών). Οι σχετικές εξισώσεις και σχήματα φαίνονται στην αντίστοιχη Εικόνα 6 (1).

Κατανομή φορτίου	Σημείο παρατήρησης του ηλεκτρικού πεδίου	Μέτρο ηλεκτρικού πεδίου
Σημειακό φορτίο q	Απόσταση r από το q	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
Φορτίο q πάνω σε επιφάνεια αγωγικής σφαίρας με ακτίνα R	Έξω από τη σφαίρα, $r > R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$
	Μέσα στη σφαίρα, $r < R$	$E = 0$
Μακρύ σύρμα με φορτίο λ ανά μονάδα μήκους	Απόσταση r από το σύρμα	$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$
Μακρύς αγωγίμος κύλινδρος με ακτίνα R και φορτίο λ ανά μονάδα μήκους	Έξω από τον κύλινδρο, $r > R$	$E = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \frac{\lambda}{r}$
	Μέσα στον κύλινδρο, $r < R$	$E = 0$
Συμπαγής μονωτική σφαίρα, με φορτίο Q ομοιόμορφα κατανεμημένο σε όλο της τον όγκο	Έξω από τη σφαίρα, $r > R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$
	Μέσα στη σφαίρα, $r < R$	$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qr}{R^3}$
Δύο αντίθετα φορτισμένες αγωγίμες πλάκες με επιφανειακές πυκνότητες φορτίου $+\sigma$ και $-\sigma$	Οποιοδήποτε σημείο μεταξύ τους	$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$

Εικόνα 6 Πεδία που προκαλούνται από ορισμένες κατανομές φορτίου

1.3 Ηλεκτρομαγνητικά πεδία

Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αποτελείται από κύματα που τα περισσότερα είναι αόρατα. Μόνο ένα μικρό μέρος της ακτινοβολίας αυτής εντοπίζεται από το ανθρώπινο μάτι που αποτελεί το ορατό φως και παράγει τα διάφορα χρώματα του ουράνιου τόξου.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα διατυπώθηκαν ως αξίωμα πρώτη φορά από τον James Clerk Maxwell και έπειτα επιβεβαιώθηκαν από τον Heinrich Hertz.

Ο Maxwell επινόησε έναν ηλεκτρομαγνητικό τύπο από τις εξισώσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου και διαπίστωσε την κυματική φύση τόσο των ηλεκτρικών όσο και μαγνητικών πεδίων, όπως και τη συμμετρικότητά τους. Επειδή η ταχύτητα των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προβλέπεται από την εξίσωση της κυματικής που συμπίπτει με τη μετρούμενη ταχύτητα του φωτός, ο Maxwell κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

Ο Maxwell απέδειξε το 1865 ότι μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή διαδίδεται στον κενό χώρο με ταχύτητα ίση με εκείνη του φωτός και ότι τα κύματα του φωτός είναι κατά

πάσα πιθανότητα, ηλεκτρομαγνητικής φύσεως. Ο Maxwell ανακάλυψε ότι οι βασικές αρχές του ηλεκτρομαγνητισμού διατυπώνονται με τέσσερις εξισώσεις, που τώρα ονομάζουμε εξισώσεις του Maxwell.

Οι τέσσερις εξισώσεις είναι (1) ο νόμος του Gauss για τα ηλεκτρικά πεδία· (2) ο νόμος του Gauss για τα μαγνητικά πεδία, που μας δείχνει ότι δεν υπάρχουν μαγνητικά μονόπολα· (3) ο νόμος του Ampere, που περιέχει το ρεύμα μετατόπισης και (4) ο νόμος του Faraday.

Οι εξισώσεις του Maxwell, στην ολοκληρωματική μορφή είναι

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0} \quad (\text{νόμος του Gauss}),$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (\text{νόμος του Gauss για τον μαγνητισμό}),$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 \left(I_C + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (\text{νόμος του Ampère}),$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (\text{νόμος του Faraday}).$$

Οι εξισώσεις ισχύουν για ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία στο κενό. Όταν υπάρχει κάποιο υλικό, αντικαθιστούμε την ηλεκτρική επιτρεπτότητα ϵ_0 και τη μαγνητική διαπερατότητα μ_0 του κενού με ϵ και μ , όπου ϵ και μ αντίστοιχα η ηλεκτρική επιτρεπτότητα και μαγνητική διαπερατότητα του υλικού (1).

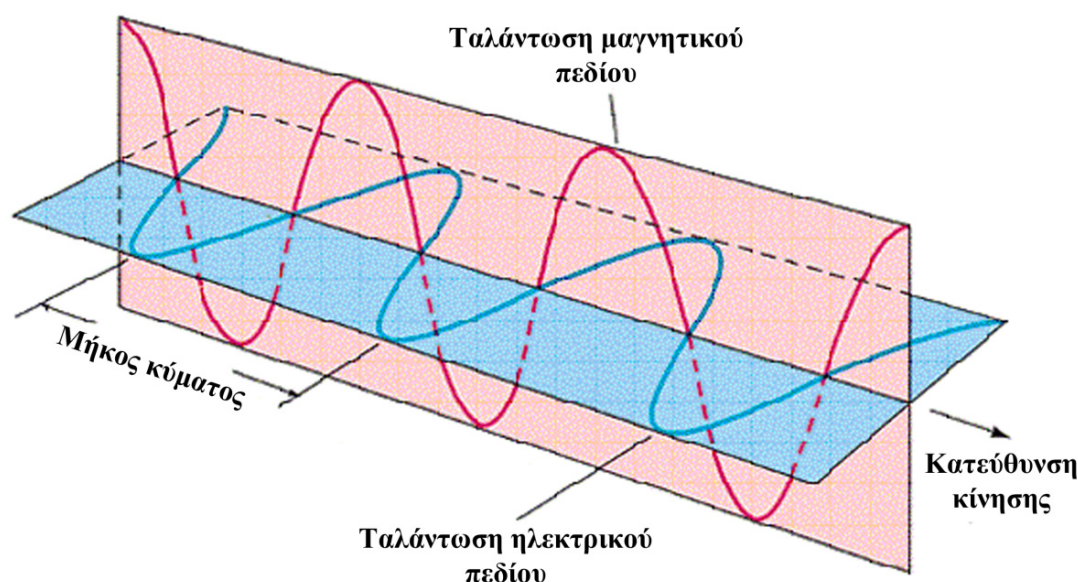
Σύμφωνα με τις εξισώσεις του Maxwell, ένα χωρικά-μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί ένα χρονικά-μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο και το αντίστροφο. Κατά συνέπεια, καθώς ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί ένα ταλαντούμενο μαγνητικό πεδίο, το μαγνητικό πεδίο με τη σειρά του δημιουργεί ένα ταλαντούμενο ηλεκτρικό πεδίο και ούτω καθεξής. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι ένα εγκάρσιο κύμα με την έννοια ότι οι ταλαντώσεις των κυμάτων είναι κάθετες στην κατεύθυνση της μεταφοράς ενέργειας και της κίνησης (Εικόνα 7^α και 7^β). Μια σημαντική πτυχή της φύσης του φωτός είναι η συχνότητα. Η συχνότητα ενός κύματος είναι ο ρυθμός ταλάντωσής του και μετρείται σε hertz, σύμφωνα με το διεθνές σύστημα μετρήσεων (SI), όπου ένα hertz είναι ίσο με μια ταλάντωση ανά δευτερόλεπτο. Διαφορετικές συχνότητες υφίστανται σε διαφορετικές γωνίες διαθλάσεως.

Ένα κύμα αποτελείται από διαδοχικές κορυφές (crests) και κατώτατα σημεία (troughs) και η απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών κορυφών ή κατωτάτων σημείων ονομάζεται μήκος κύματος (wavelength) (Εικόνα 7^α και 7^β). Τα κύματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος διαφέρουν πολύ σε μέγεθος. Για παράδειγμα, στα πολύ υψηλά ραδιοκύματα το μέγεθος του κύματος αντιστοιχεί με το μέγεθος ενός κτιρίου, ενώ στις πολύ χαμηλές ακτίνες γάμμα το μέγεθος είναι μικρότερο από τον πυρήνα ενός ατόμου. Η συχνότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους κύματος, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

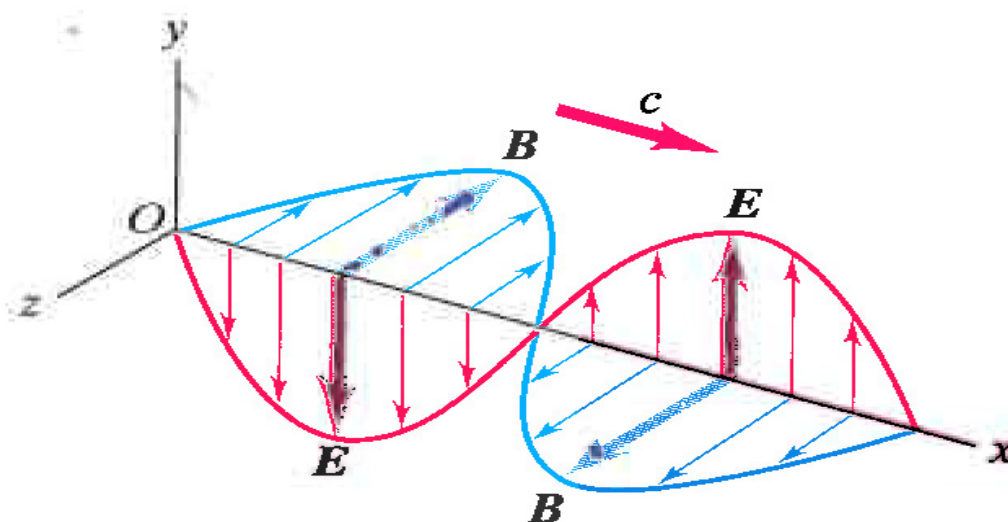
$$f = v / \lambda \text{ (I)}$$

όπου v είναι η ταχύτητα του κύματος, f είναι η συχνότητα και λ το μήκος κύματος.

Ένας κανόνας που ισχύει ανεξάρτητα από τις περιστάσεις: Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο κενό ταξιδεύει πάντα με την ταχύτητα του φωτός ($c=299,792.458 \text{ m/s}$), σε σχέση με τον παρατηρητή, ανεξάρτητα από την ταχύτητα του παρατηρητή (αυτή η παρατήρηση οδήγησε τον Albert Einstein να αναπτύξει τη θεωρία της σχετικότητας)



Εικόνα 7α. Σχηματική απεικόνιση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο χώρο.



Εικόνα 7β. Απεικόνιση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου συναρτήσει του x για γραμμικά πολωμένο ημιτονοειδές επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Φαίνεται ένα μήκος κύματος τη χρονική στιγμή $t=0$. Η κατεύθυνση διάδοσης είναι η κατεύθυνση του $E \times B$. Τα πεδία φαίνονται μόνο σε σημεία πάνω στον άξονα x .

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα ταξιδεύουν γρήγορα, με την ταχύτητα του φωτός. Μεταφέρουν ενέργεια και πληροφορίες (1).

Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (ΗΜΠ), υπάρχουν παντού στο περιβάλλον μας. Μπορεί να είναι φυσικής προέλευσης ή μπορεί να έχουν δημιουργηθεί από τον άνθρωπο. Το ηλεκτρικό ρεύμα δημιουργεί ΗΜΠ. Τα ΗΜΠ μπορεί να είναι υψηλής ή χαμηλής έντασης, συνεχή ή μικρής διάρκειας.

Τα ηλεκτρικά πεδία δημιουργούνται λόγω διαφοράς ηλεκτρικής τάσης. Όσο πιο μεγάλη είναι η διαφορά, τόσο πιο δυνατό θα είναι το ηλεκτρικό πεδίο που προκύπτει. Η μονάδα μέτρησης των ηλεκτρικών πεδίων είναι βολτ ανά μέτρο (V/m).

Τα μαγνητικά πεδία δημιουργούνται όταν υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Όσο πιο υψηλή είναι η ένταση του ρεύματος τόσο πιο δυνατό είναι το μαγνητικό πεδίο. Όταν διακοπεί το ηλεκτρικό ρεύμα, το μαγνητικό πεδίο μηδενίζεται. Μια συσκευή όπως για παράδειγμα ο στεγνωτήρας μαλλιών, παράγει μαγνητικό πεδίο μόνο όταν το ηλεκτρικό ρεύμα τη θέτει σε λειτουργία. Η διακοπή του ρεύματος, εξαφανίζει άμεσα το μαγνητικό πεδίο.

Η μονάδα μέτρησης των μαγνητικών πεδίων είναι αμπέρ ανά μέτρο (A/m). Συνήθως για τη μέτρηση των μαγνητικών πεδίων χρησιμοποιείται μια σχετική μέτρηση, η πυκνότητα ροής microtesla (μT)

Τα μαγνητικά πεδία διαπερνούν τα περισσότερα φυσικά εμπόδια όπως οι τοίχοι. Τα ηλεκτρικά πεδία σταματούν μπροστά σε τοίχους ή άλλα φυσικά εμπόδια. Τα μαγνητικά πεδία μειώνονται πολύ σημαντικά όταν αυξάνεται η απόσταση από την πηγή εκπομπής τους.

Σε βιολογικό επίπεδο, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία προκαλούν ιονισμό και αύξηση της θερμότητας.

1.3.1 Πηγές ΗΜΠ

Οι άνθρωποι υποβάλλονται καθημερινά σε σωρεία ΗΜΠ από εξωγενείς παράγοντες. Το μαγνητικό πεδίο της γης είναι εκείνο που κάνει το δείκτη της πυξίδας να κατευθύνεται στο βορρά. Οι κεραυνοί δημιουργούν ΗΜΠ. Στο ανθρώπινο σώμα υπάρχουν ενδογενώς, φυσικά ΗΜΠ τα οποία μεταφέρουν μηνύματα στο νευρικό σύστημα.

Η λειτουργία της καρδιάς στηρίζεται στη μεταφορά ηλεκτρικών μηνυμάτων και κάθε φορά που υπάρχει μεταφορά ηλεκτρικού φορτίου, δημιουργούνται ΗΜΠ.

Τα ΗΜΠ δημιουργούνται μεταξύ άλλων από τα ακόλουθα:

1. Ηλεκτροφόρα καλώδια ψηλής τάσης
2. Ηλεκτροφόρα καλώδια στις γειτονιές
3. Συστήματα προσγείωσης που προστατεύουν από κεραυνούς ή από ελαττωματικές οικιακές συσκευές
4. Οικιακές συσκευές όπως φούρνοι μικροκυμάτων, στεγνωτήρες μαλλιών, ηλεκτρικοί φούρνοι, ηλεκτρική θέρμανση,
5. Οθόνες ηλεκτρονικών υπολογιστών, ηλεκτρικά ρολόγια, ηλεκτρικές κουβέρτες
6. Κινητά τηλέφωνα, κεραίες σταθμών βάσης, ραντάρ, ραδιοφωνικοί και τηλεοπτικοί σταθμοί
7. Φυσικές πηγές
8. Ακτίνες X
9. Φως του ήλιου
10. Ακτίνες γάμμα
11. Ραδιενέργεια

1.3.2 Τα διάφορα είδη ΗΜΠ

Υπάρχουν πολλών ειδών ΗΜΠ και οι διαφορές μεταξύ τους είναι πολύ σημαντικές. Τα χαρακτηριστικά τους εξαρτώνται από το είδος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων που τα δημιουργούν.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι:

1. Το μήκος κύματος
2. Η συχνότητα
3. Η ενέργεια που μεταφέρουν

Το μήκος κύματος είναι αλληλένδετο με τη συχνότητα. Όσο πιο μικρό είναι το μήκος κύματος, τόσο πιο ψηλή είναι η συχνότητα.

Επίσης ακόμη ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που σχετίζεται με το μήκος κύματος και τη συχνότητα, είναι η ενέργεια που μεταφέρεται.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρονται από τα σωματίδια που ονομάζονται κβάντα. Στην ψηλή συχνότητα (και άρα στα μικρά μήκη κύματος) η κβαντική ενέργεια είναι πολύ μεγάλη.

Όταν η μεταφερόμενη ενέργεια είναι μεγάλη, τότε σπάζουν οι δεσμοί μεταξύ των μορίων. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο. Προκαλούνται αλλοιώσεις του γενετικού κώδικα του DNA. Το αποτέλεσμα είναι η πρόκληση καρκίνου και άλλων σοβαρών ασθενειών.

Ευτυχώς δεν είναι όλα τα είδη ΗΜΠ που μπορούν να προκαλέσουν αλλοιώσεις στο DNA. Μόνο αυτά που χαρακτηρίζονται από ψηλή συχνότητα, μικρό μήκος κύματος και ψηλή ενέργεια μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στο DNA.

Η ακτινοβολία που έχει αυτή τη δυνατότητα ονομάζεται ιονίζουσα ακτινοβολία. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην οποία υποβαλλόμαστε συνήθως και καθημερινά είναι η μη ιονίζουσα ακτινοβολία και δεν έχει τέτοιες δυνατότητες και κινδύνους.

Υπάρχει μόνο μια εξαίρεση στην καθημερινή ακτινοβολία που δεχόμαστε. Πρόκειται για την ιονίζουσα ακτινοβολία που προκαλείται από τις υπεριώδεις ακτίνες του ήλιου. Η έκθεση στο ηλιακό φως και κατά συνέπεια στις υπεριώδεις ακτίνες, είναι αιτία καρκίνου του δέρματος (μελανώματος, ακανθοκυτταρικού και βασεοκυτταρικού καρκινώματος) και άλλων αλλοιώσεων και ρυτίδων.

Τα διάφορα είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και τα πεδία που προκύπτουν, έχουν διαφορετικές επιδράσεις στον ανθρώπινο οργανισμό.

1.3.3 Η ιονίζουσα ακτινοβολία

Η ιονίζουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι αυτή που έχει συχνότητα ψηλότερη από το ορατό φως. Είναι μικρότερου μήκους κύματος και μεταφέρει πολύ υψηλή ενέργεια.

Η ιονίζουσα ακτινοβολία περιλαμβάνει τις υπεριώδεις ηλιακές ακτίνες, την κοσμική ακτινοβολία, τις ακτίνες X και γάμμα (ραδιενέργεια). Η ακτινοβολία αυτή είναι επικίνδυνη διότι μπορεί να προκαλέσει ιονισμό.

Ο ιονισμός είναι η απόσπαση ηλεκτρονίων από τα άτομα. Το φαινόμενο αυτό είναι επικίνδυνο διότι διασπά τους δεσμούς του DNA και είναι αιτία βλαβών που προκαλούν καρκίνο και άλλες ασθένειες.

1.3.4 Η μη ιονίζουσα ακτινοβολία

Η ενέργεια που μεταφέρουν τα κβάντα των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων μεγάλου μήκους κύματος και χαμηλής συχνότητας, δεν είναι αρκετή για να προκαλέσει ιονισμό.

Οι πηγές των ΗΜΠ που έχει κατασκευάσει ο άνθρωπος, στα οποία υποβαλλόμαστε καθημερινά (ραδιοκύματα, μικροκύματα, ηλεκτρισμός), είναι μεγάλου μήκους κύματος και χαμηλής συχνότητας. Δεν μπορούν να προκαλέσουν ιονισμό διότι η ενέργεια που μεταφέρουν τα κβάντα τους είναι μικρή. Δεν μπορούν να σπάσουν χημικούς δεσμούς στα μόρια των κυττάρων.

Τα ΗΜΠ που παράγονται από τα καλώδια ηλεκτρικού ρεύματος και τις ηλεκτρικές συσκευές στο σπίτι, είναι εξαιρετικά χαμηλής συχνότητας που φτάνουν μέχρι 300 Hz. Οι ραδιοσυχνότητες βρίσκονται μεταξύ 10 MHz και 300 GHz.

Η κυριότερη επίδραση των ραδιοκυμάτων (κινητά τηλέφωνα, κεραιές σταθμών βάσης, ραδιοφωνικές και τηλεοπτικές εκπομπές, μικροκύματα) στον ανθρώπινο οργανισμό είναι η αύξηση της θερμότητας στους ιστούς. Για να επέλθει όμως το φαινόμενο αυτό, χρειάζεται μια πολύ ισχυρότερη έκθεση από αυτή που συνήθως συμβαίνει στο καθημερινό μας περιβάλλον.

Στις ραδιοσυχνότητες, επειδή τα μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία σχετίζονται πολύ στενά, η μονάδα μέτρησή τους είναι η πυκνότητα ισχύος (W/m^2).

Τα μικροκύματα μεταφέρουν ψηλές ενέργειες. Όταν διαπερνούν κάτι που περιέχει νερό, προκαλούν δονήσεις των μορίων του νερού και έτσι παράγουν θερμότητα. Είναι αυτή η θερμαντική ιδιότητα των μικροκυμάτων που χρησιμοποιείται στους φούρνους μικροκυμάτων για το ζέσταμα ή το ψήσιμο των φαγητών. (Φούρνοι μικροκυμάτων)

Συνοπτικά βλέπουμε ότι τα ΗΜΠ περιλαμβάνουν την ιονίζουσα ακτινοβολία (ραδιενέργεια, ακτίνες X και γάμμα, υπεριώδης ακτινοβολία) που είναι επικίνδυνη διότι μεταφέρει ψηλές ενέργειες και τη μη ιονίζουσα ακτινοβολία (ραδιοσυχνότητες, κινητά τηλέφωνα, κεραίες σταθμών βάσης, εκπομπές ραδιοφώνου και τηλεόρασης, οικιακές ηλεκτρικές συσκευές και ηλεκτροφόρα καλώδια) που στο περιβάλλον μας είναι χαμηλής ενέργειας και δεν είναι επικίνδυνη για την υγεία μας.

Παρά το γεγονός ότι οι έρευνες μέχρι σήμερα δεν έχουν δείξει ή τεκμηριώσει επικίνδυνες επιδράσεις της μη ιονίζουσας ακτινοβολίας στην υγεία μας, εντούτοις λόγω πιθανών κενών στις γνώσεις μας, είναι προτιμότερο να λαμβάνονται προφυλάξεις και να εφαρμόζονται οι συστάσεις για τα περιβαλλοντικά στάνταρτ που δίνονται από διεθνείς οργανισμούς.

1.4 ΗΜΓνητικά πεδία και ο άνθρωπος

Τα έμβια όντα, μεταξύ των οποίων και ο άνθρωπος, του πλανήτη μας ζουν επί δισεκατομμύρια χρόνια, υπό την επίδραση διάφορων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Η πρώτη επίδραση που ασκείται στα όντα είναι του γήινου μαγνητικού πεδίου με συχνότητα 7-8 Hz και ένταση που κυμαίνεται από 35 mT στον ισημερινό μέχρι 75 mT στους πόλους. Ο ίδιος ο άνθρωπος έχει δικό του μαγνητικό πεδίο συχνότητας περίπου 7.8 Hz (και έντασης μεγέθους μT). Ο πλανήτης μας όμως καθώς και τα έμβια βομβαρδίζεται καθημερινά από ένα τεράστιο εύρος ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών από τα πολύ χαμηλής συχνότητας (ELF & VLF) μέχρι και την ιονίζουσα (ακτίνες X) και την κοσμική ακτινοβολία. Αυτά τα πεδία είναι τα φυσικά πεδία στα οποία το μαγνητικό πεδίο της γης καθώς και η γήινη ατμόσφαιρα (για την κοσμική ακτινοβολία) προσέφερε σημαντική προστασία. Όμως από τις αρχές του 19ου αιώνα η ανθρωπογενής δραστηριότητα προσέθεσε ένα σημαντικό εύρος πεδίων (ηλεκτρισμός, ραντάρ, επικοινωνίες κ.α) που

κάλυψαν το μέχρι τότε κενό εύρος μέχρι τις συχνότητες του ορατού φωτός. Η εξάρτηση των λειτουργιών του ανθρώπου και άλλων μορφών ζωής από τα διάφορα ΗΜΓνητικά πεδία είναι γνωστή από μελέτες ήδη από το 1890 και της υγείας του από τις μεταβολές του μαγνητικού πεδίου που προκαλούνται από τις περιοδικές ηλιακές μαγνητικές καταιγίδες (2).

Φορέας του ΗΜΓνητικού πεδίου είναι το ΗΜΓνητικό κύμα το οποίο περιέχει ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό σκέλος (κύμα) τα οποία διαδίδονται μαζί κάθετα και ισοφασικά το ένα με το άλλο με ταχύτητα (στο κενό) ίση με αυτή του φωτός (c). Σήμερα γνωρίζουμε από τη Φυσική ότι το ΗΜΓνητικό κύμα είναι ταυτόχρονα υλικό και κυματικό φαινόμενο και όπως έχει αποδειχθεί για το φως, εκπέμπεται κατά διακριτά «πακέτα»-κβάντα ενέργειας –τα φωτόνια- που συνδέονται μέσω της εξίσωσης του Einstein $E(\text{ενέργεια})=mc^2$ με τη μάζα τους (m) και μέσω της εξίσωσης του Planck $E=h \cdot \nu$ (όπου h , σταθερά του Planck) με τη συχνότητα (ν) του κύματος. Η κβαντική φυσική έχει αποδείξει με το περίφημο πείραμα των δύο σχισμών, την σωματιδιακή και κυματική συμπεριφορά του φωτός και έχει επιβεβαιώσει την θεωρία του De Broglie για τα Υλικά Κύματα σύμφωνα με την οποία όλα τα στοιχειώδη σωματίδια καθώς και όλα τα «υλικά» αντικείμενα, εμφανίζουν κυματική δομή με μήκος κύματος $\lambda = h/p$, (p =ορμή).

Ο άνθρωπος (και όλα τα έμβια) είναι, πέραν των άλλων και ένα δίκτυο παραγωγής και υποδοχής-διάδοσης και εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Η ηλεκτρική λειτουργία των διαφόρων συστημάτων, τα σωματίδια σιδήρου στα κύτταρα του κωναρίου, η λειτουργία των πρωτεϊνών ως ημιαγωγών των συστατικών της κυτταρικής μεμβράνης (λιπιδίων πρωτεϊνών κ.α) και του ενδο- και εξωκυττάριου νερού ως «υγρών κρυστάλλων», στοιχειοθετούν την άποψη του παραγωγού, πομπού και δέκτη ηλεκτρομαγνητικής πληροφορίας. Είναι σήμερα γνωστό ότι οι κυτταρικοί-σωματικοί μικροσωληνίσκοι είναι αγωγοί ΗΜΓνητικών κυμάτων ($f=10^{13}$ Hz και των αρμονικών τους, σε $\lambda = \text{mm}$) που συντονίζουν τις κυτταρικές λειτουργίες ,τα κεντροσώματα περιέχουν οξειδία του πυριτίου και εκπέμπουν και δέχονται ΗΜΓνητικά «σήματα». Το ανθρώπινο σώμα παράγει μια σειρά θεμελιωδών ΗΜΓνητικών συχνοτήτων χαρακτηριστικών της δομής και της λειτουργίας του (3). Οι μετρήσεις των διαφόρων λειτουργιών με τα σύγχρονα μαγνητόμετρα (SQUIDS) και με τις συσκευές Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού (NMR, MRI) είναι σήμερα γεγονός. Το 1960 οι Moskalenko et al, κοινοποίησαν μια ηλεκτρονική συσκευή μεγάλης εμβέλειας εκπομπής και καταγραφής ραδιοσυχνοτήτων στο ανθρώπινο σώμα (συχνότητες από 6 GHz, $\lambda = \text{mm-microwaves}$) και έδειξαν ότι η διαφορά

μεταξύ εκπεμπόμενης και απαντώμενης συχνότητας μπορεί να δώσει διαγνωστικές πληροφορίες (4).

Το 1970 Ρώσοι και Ουκρανοί ραδιοφυσικοί ανακάλυψαν ότι υπάρχει συντονισμός των ιστών και κυττάρων με πολύ υψηλής συχνότητας και χαμηλής έντασης Ραδιοκύματα. Έτσι για πρώτη φορά καταγράφηκαν οι ειδικές ραδιοσυχνότητες συντονισμού ανθρώπων, ζώων αλλά και άλλων συστατικών (βιολογικών και χημικών ουσιών) (5;6). Η εκπομπή και καταγραφή πολύ χαμηλής έντασης φωτονίων (βιοφωτονίων) από το ανθρώπινο σώμα, διαφορετικής συχνότητας για κάθε όργανο, είναι μια ακόμη σημαντική ένδειξη (7).

Η βιοπληροφορική έχει δείξει ότι η επικοινωνία, -η γλώσσα του σώματος -είναι ηλεκτρική και χημική. Οι νευρικές ηλεκτρικές διεγέρσεις περιέχουν πληροφορία, οι (βιο)χημικές ενώσεις-σήματα περιέχουν πληροφορία προς εκτέλεση, κωδικοποιημένη στη δομή τους. Τα κύτταρα είναι γεμάτα αποδέκτες της πληροφορίας(υποδοχείς) και περιέχουν όλες τις λειτουργικές δομές και τα βιοχημικά μονοπάτια, μετάφρασης και μεταγωγής της πληροφορίας αυτής στον πυρήνα προς εκτέλεση της εντολής . Είναι όμως μόνο οι αυτά τα δύο πληροφοριακά συστήματα που αποτελούν την γλώσσα του σώματος; Μήπως τα έμβια –και ο ανθρώπινος οργανισμός- επικοινωνούν παράλληλα και ηλεκτρομαγνητικά; Μπορεί μια εντολή κωδικοποιημένη ΗΜΓνητικά-ηλεκτρονικά να εκτελεστεί από τον οργανισμό ή και τα κύτταρα των εμβίων όντων ;

Το 1995 οι Edler και συν έδειξαν ότι οι βάτραχοι εκτελούν την μη μοριακή ηλεκτρονική εντολή της θυροξίνης και γίνονται υπερθυρεοειδικοί , ενώ το 2000 οι Thomas και συν. έδειξαν ότι τα ουδετερόφιλα μπορεί να ενεργοποιηθούν και να παράγουν δραστικές μορφές οξυγόνου (ελεύθερες ρίζες) με ηλεκτρονική εκπομπή της οξικής μυριστικής φορβόλης. Το 2005 δείξαμε ότι η ταυτόχρονη εκπομπή του ραδιοφωνικού φάσματος συντονισμού του NGF, σε κακοήθη κύτταρα μυελού των επινεφριδίων (PC12) προκαλεί τη διαφοροποίησή τους προς νευρώνες όπως και ο ίδιος ο NGF (8). Και δείξαμε ακόμη ότι κύτταρα HeLa με αδρανοποιημένο το γονίδιο της πρωτεΐνης του θερμικού σοκ (heat shock protein 70) γίνονται θερμοάντοχα αν εκτεθούν στο ΗΜΓνητικό φάσμα της εν λόγω πρωτεΐνης. Αυτά είναι μερικά από τα πειραματικά δεδομένα που συνηγορούν ότι πιθανώς η ηλεκτρομαγνητική είναι μία από τις γλώσσες του σώματος.

Η καρκινογένεση σήμερα αποδίδεται σε σημειακές μεταλλαγές κυρίως ογκοκατασταλτικών και ογκογόνων γονιδίων ή γενετική αστάθεια από σοβαρές βλάβες χρωμοσωμάτων («χαοτικό γονιδίωμα» που οδηγεί σε ανευλοειδία) ή ακόμα σε πρωταρχικές γονιδιακές βλάβες βλαστοκυττάρων που σχηματίζουν τον κακοήθη κλώνο.

Για να προσεγγίσουμε όμως τη νόσο αυτή από ΗΜΓγνητική άποψη πρέπει να διερευνήσουμε μερικά ειδικά χαρακτηριστικά των κακοήθων κυττάρων.

Τα κακοήθη κύτταρα σε σύγκριση με τα φυσιολογικά, έχουν τα εξής χαρακτηριστικά που καθορίζουν τις ηλεκτρομαγνητικές τους ιδιότητες:

- Χαμηλότερη παραγωγή ενέργειας από τη μιτοχονδριακή αναπνοή και δυσλειτουργία της K^+-Na^+ - ΑΤΡάσης
- Μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νερό (15-25%)
- Ανώμαλη μοριακή σύσταση ενδοκυττάριου νερού (μειωμένος πολυμερισμός, τυχαία διάταξη διπόλων του H_2O)
- Χαμηλή και ευαίσθητη οξειδοαναγωγική ισορροπία (redox)
- Κάθετη διάταξη κεντροσωματίω (περιέχουν οξείδιο του πυριτίου και λει-τουργούν ως quartz)

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθορίζουν και τις ιδιαίτερες ΗΜΓνητικές ιδιότητες των κακοήθων κυττάρων, που συνοπτικά είναι (9).

- Χαμηλό δυναμικό ηρεμίας [-15mV έως -40mV]
- Μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά [περίπου 10X]
- Χαμηλότερη παλμικότητα κυτταρικής μεμβράνης
- Μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα
- Απώλεια της αρνητικής συμβολής των εκπεμπομένων φωτονίων και εκπομπή φωτονίων υψηλών συχνοτήτων
- Μεγαλύτερη «πολικότητα» νεόπλαστων αγγείων

Έτσι η Ηλεκτρομαγνητική προσέγγιση της Καρκινογένεσης υποστηρίζει την παρακάτω αλληλουχία γεγονότων:

- Κατά πρώτον επέρχεται βλάβη της κυτταρικής μεμβράνης (αρχιτεκτονικής, σύνθεσης, οργάνωσης) με αποτέλεσμα εκροή ηλεκτρονίων και πρωτονίων(H^+), λόγω και της δυσλειτουργίας του αντιρρεύματος(αντλίας Na^+-H^+) και της K^+-Na^+ - ΑΤΡάσης
- Απώλεια των μηχανισμών παλίνδρομης ρύθμισης της διαρροής ιόντων.
- Αυξανόμενη ενδοκυττάρια πενία ηλεκτρονίων & πρωτονίων → αύξηση του ενδοκυττάριου pH και μείωση του εξωκυττάριου.
- Αύξηση της ηλεκτραρνητικότητας του εξωτερικού της πλασματικής μεμβράνης → μείωση του δυναμικού ηρεμίας

- Η ενδοκυττάρια αλκάλωση επιταχύνει τη γλυκόλυση, μεταβάλλει την έκφραση γονιδίων, παραβιάζει τα επιδιορθωτικά ένζυμα, προάγει την γενετική αστάθεια → αύξηση των γενετικών βλαβών → Περαιτέρω αποσταθεροποίηση των μεμβρανών και παρεμπόδιση της ενδοκυττάριας επικοινωνίας (θετικό αναδραστικό κύκλωμα)
- Το χαμηλό εξωκυττάριο pH ευνοεί εκλεκτικά την επιβίωση των κακοήθων κυττάρων, εις βάρος των φυσιολογικών και διαταράσσει την εξωκυττάρια επικοινωνία (θετικό ανατροφοδοτικό κύκλωμα)
- Οι παραπάνω μεταβολές οδηγούν σε ένα μορφολογικά ετερογενή κυτταρικό πληθυσμό από τον οποίο η πλεονεκτική θέση των κακοήθων κυττάρων στο διαταραγμένο μικροπεριβάλλον, προάγει την επιβίωση και ανάπτυξη μιας τροποποιημένης (κακοήθους) κυτταρικής σειράς η οποία αναπτύσσεται σε κακοήθη όγκο (10).

Ποια όμως μπορεί να είναι η πιθανή «θεραπευτική δράση» ΗΜΓνητικών πεδίων στην κακοήθεια;

Μέχρι τώρα έρευνες υποστηρίζουν ότι η έκθεση κακοήθων κυττάρων και πειραματοζώων με όγκους σε συντονισμένα, χαμηλής έντασης και ραδιοφωνικής συχνότητας, πεδία μπορεί να οδηγήσει τα κακοήθη κύτταρα σε απόπτωση ή θάνατο και τους όγκους σε υποστροφή. Οι μέχρι τώρα εφαρμογές της μεθόδου αυτής σε περιορισμένο αριθμό ασθενών τελικού σταδίου με κακοήθειες, αν και δεν έχει ολοκληρωθεί, φαίνεται ότι υπόσχεται μιας μορφής αντιμετώπιση. Παλμικά και στατικά ΗΜΓνητικά κύματα φαίνεται επίσης ότι έχουν αναλγητική δράση σε ανθρώπους με πόνους φλεγμονώδους αιτιολογίας.

Θεωρώ ότι πρέπει να κλείσω αυτή την σύντομη περιγραφή του θέματος με την κατάληξη των Johnson et al. στο άρθρο τους με τίτλο “Noninvasive treatment using electromagnetic fields: current and emerging therapeutic potentials”: «*Η Ηλεκτρομαγνητική Αγωγή (EMF Treatment) για την θεραπεία του πόνου, του καρκίνου, της επιληψίας, της ΣΚΠ, της ρευματοειδούς αρθρίτιδος και των φλεγμονωδών παθήσεων βρίσκεται υπό συνεχή έρευνα. Η μακροπρόθεσμη επιτυχία αυτής της νέας επιστημονικής προσέγγισης είναι ακόμη άγνωστη. Αισιοδοξούμε ότι η Ηλεκτρομαγνητική Αγωγή έχει τη δύναμη να επιφέρει επαναστατικές μεταβολές στην ιατρική πρακτική, που μέχρι τώρα δυναστεύεται από την φαρμακοθεραπεία και τις χειρουργικές επεμβάσεις. Νέα θεραπευτικά εργαλεία που αναπτύσσονται και θα αναπτυχθούν στο μέλλον, παρέχουν δυνατότητες μη-επεμβατικών*

θεραπειών με χαμηλό βαθμό κινδύνου και χωρίς προβλήματα φαρμακευτικών παρενεργειών και αλληλεπιδράσεων» (11).

1.5 Ιστορική αναδρομή της Μαγνητοηλεκτροθεραπείας

Η πιο πρώιμη καταγραφή της ηλεκτροθεραπείας αφορά το έτος 2750π.Χ. όπου ασθενείς εκτίθεντο σε ηλεκτρικά shock που προκαλούσαν τα ηλεκτρικά χέλια (12). Μαγνήτες επίσης χρησιμοποιούνταν και από τους αρχαίους Αιγύπτιους, τους Κινέζους και αργότερα τους Έλληνες (13). Το 1773 ο Franz Anton Mesmer άρχισε να χρησιμοποιεί μαγνήτες για θεραπείες (14). Ιατρική χρήση του ηλεκτρισμού εμφανίστηκε κατά τη χρυσή εποχή από τα τέλη του 1700 ως τις αρχές του 1900 μ.Χ. όπου αναπτύχθηκαν μια σειρά από ηλεκτρικές συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν για θεραπείες διαφόρων παθήσεων από ιατρούς (15). Κατά την περίοδο αυτή χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τύποι ηλεκτρικής ενέργειας:

- Στατικός ηλεκτρισμός
- Γαλβανικά ρεύματα
- Φαραδικά ρεύματα
- Υψηλής Συχνότητας ή d'Arsonval ρεύματα

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και τις αρχές του 20^{ου} αιώνα άρχισαν οι μελέτες των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των ζώντων οργανισμών. Κατασκευάστηκαν συσκευές που κατέγραψαν τα ηλεκτρικά πεδία που παράγονται από διάφορα όργανα όπως η καρδιά, τα μάτια και ο εγκέφαλος. Έτσι άρχισε να αναβιώνει η Ηλεκτρομαγνητική Ιατρική χωρίς ωστόσο να υποστηρίζεται από μια βασική επιστημονική θεωρία. Παράλληλα άρχισε η έρευνα που προσπάθησε να διερευνήσει τον ρόλο του ηλεκτρισμού στην ανάπτυξη και αύξηση του πολλαπλασιασμού, χωρίς τον κίνδυνο απόλυσης των ερευνητών από τις ακαδημαϊκές θέσεις τους.

Ένας από τους πρωτοπόρους ερευνητές αναδείχθηκε ο καθηγητής Ιατρικής του πανεπιστημίου του Yale, Harold Saxton Burr το 1929. Ως προϊόν της έρευνας του (93 εργασίες) ο Burr έγραψε ένα βιβλίο με τίτλο: Blueprint for immortality (Γαλάζιο βιβλίο για την αθανασία) (16). Ο Burr είχε πειστεί ότι όλα τα όντα από τα ποντίκια ως τους ανθρώπους, από τους σπόρους ως τα δέντρα, σχηματίζονται και ελέγχονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία τα οποία μπορεί να μετρηθούν με ειδικούς ανιχνευτές. Επίσης

διατύπωσε την άποψη ότι με τις καταγραφές αυτές μπορεί να γίνουν διαγνώσεις των διαφόρων παθήσεων.

Το 1974 κατατέθηκε στις ΗΠΑ ένα δίπλωμα ευρεσιτεχνίας βασισμένο στις ανακαλύψεις του Burr, που ήλεγχε τις γόνιμες ημέρες των θήλεων. Η συσκευή κατέγραφε τους ρυθμούς του καταμήνιου κύκλου υπό μορφή ηλεκτρικών σημάτων σύμφωνα με τα οποία ο ηλεκτρικός ρυθμός πριν και μετά την ωορρηξία έχει αρνητικά δυναμικά ενώ περίπου 5-6 ημέρες πριν την ωορρηξία τα δυναμικά αναστρέφονται και αυξάνονται σε θετικά κατά την ωορρηξία (17). Στα τέλη του 1940 ενώ ο Burr περιόριζε την έρευνα του στον καρκίνο ο Reinhold Voll στη Γερμανία δοκίμαζε την μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης σε σημεία του βελονισμού και προσπαθούσε να συσχετίσει τις αγωγιμότητες των ιστών με διάφορες παθολογικές καταστάσεις. Υποστήριζε ότι η φλεγμονές αυξάνουν την αγωγιμότητα ενώ η εκφύλιση των οργάνων και η ιστική νέκρωση την μειώνουν. Ο συνεργάτης του Voll, Schimmel δημοσίευσε τα δεδομένα της αγωγιμότητας και τεκμηρίωσε τα ευρήματα του Voll (18). Το 1987 λεπτομερείς μελέτες έδειξαν ότι οι μεταβολές της αγωγιμότητας σε περιπτώσεις καρκίνου έχουν υψηλή συσχέτιση με τη συχνότητα. Στα αρχικά στάδια οι αγωγιμότητες αυξάνονται σημαντικά (6.0-7.5 φορές) σε σχέση με αυτές των φυσιολογικών ιστών. Στα τελικά στάδια τόσο του καρκίνου όσο και του AIDS, καθώς οι ιστοί νεκρώνονται, οι αγωγιμότητες πέφτουν (19, 20).

Έκτοτε μια σειρά ερευνητών (21,22), δημοσίευσαν ανάλογες μελέτες σε καρκίνους μαστού, παχέος εντέρου κ.α. Οι μελέτες έδειξαν ότι οι αλλαγές στην αγωγιμότητα οφείλονται στο ότι κύτταρα με ταχύ πολλαπλασιασμό και διαφοροποιούμενα, έχουν χαμηλότερα δυναμικά ηρεμίας από τα φυσιολογικά. Τα αλλοιωμένα αυτά δυναμικά εκτείνονται από την περιοχή του καρκίνου μέχρι το υπερκείμενο της βλάβης δέρμα. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα υπό μορφή πληροφορίας κυκλοφορούν στην ζώσα θεμέλια ουσία (matrix) των έμβιων όντων. Η ζώσα θεμέλια ουσία σχηματίζει δύο δίκτυα στα σώματα των έμβιων όντων ένα ηλεκτρονικό και ένα φωτονικό. Σημαντική προσφορά στο θέμα αυτό έδωσαν οι παρακάτω ερευνητές:

Ο Albert Szent-Gyorgyi ο οποίος τιμήθηκε με το Nobel το 1937 για την ανακάλυψη της βιταμίνης C, πρότεινε το 1941 ότι οι πρωτεΐνες στα σώματα των βιολογικών όντων λειτουργούν ως ημιαγωγοί. Οι ημιαγωγοί είναι σώματα μεταξύ των καλών και κακών αγωγών του ηλεκτρισμού, των οποίων η αγωγιμότητα μπορεί να ελεγχθεί πλήρως. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία μαζί με το νερό που περιβάλλει τις πρωτεΐνες μπορεί να δημιουργήσουν δομές μέσω των οποίων κυκλοφορεί η ενέργεια. Κάθε ένα της ζώσας

θεμέλιας ουσίας και έξω και μέσα στα κύτταρα και τον πυρήνα περιβάλλεται από οργανωμένες στοιβάδες νερού οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν σαν ξεχωριστά κανάλια επικοινωνίας και ροής ενέργειας. Όταν τα ηλεκτρόνια κυκλοφορούν μέσα στις ίνες (ηλεκτρισμός) πρωτόνια ρέουν μέσα στις στοιβάδες νερού (23, 24).

Σε μια σειρά άρθρων του ο Robert Becker περιέγραψε τις ιδιότητες του συνδετικού ιστού που περιβάλλει το νευρικό σύστημα, του περινευρίου που καλύπτει κάθε νευρική ίνα από την έκφυση μέχρι την τελική απόληξη της. Ο Becker μίλησε πρώτος για «διπλό νευρικό σύστημα» τονίζοντας ότι οι νευρικές ίνες άγουν τα συνεχή ρεύματα που παράγονται στον εγκέφαλο, ενώ το περινεύριο άγει τα μαγνητικά πεδία και συμπεριφέρεται ως ημιαγωγός (25).

Στα τέλη του 1960 ο Herber Frolich πρότεινε ότι η ζώσα θεμέλια ουσία μπορεί να παράγει συνεκτικές ή όμοιες με laser ταλαντώσεις. Αυτές οι ταλαντώσεις έχουν διαφορετικές συχνότητες που εντάσσονται στο ορατό και κοντά στο ορατό πεδίο. Οι συνεκτικές αυτές ταλαντώσεις δεν έχουν τους φραγμούς στην επιφάνεια των μορίων των κυττάρων ή τον οργανισμό. Οι ταλαντώσεις αυτές είναι βήματα που ολοκληρώνουν λειτουργίες που αφορούν την αύξηση, την επιδιόρθωση τραυμάτων, την άμυνα και τη λειτουργία ενός οργανισμού ως σύνολο. Κάθε μόριο, κύτταρο, ιστός και όργανο έχει μια ιδανική συνεκτική συχνότητα συντονισμού η οποία ρυθμίζει τις δράσεις του. Ο χειρισμός και η εξισορρόπηση των παλμικών αυτών κυκλωμάτων επηρεάζει την συστηματική άμυνα του σώματος και τους μηχανισμούς επιδιόρθωσης του (26).

Ο φυσικός Fritz-Alber Popp ήταν ο πρώτος που περίγραψε την εκπομπή φωτονίων από το ανθρώπινο σώμα. Ο Popp ισχυρίζεται ότι η πηγή των εκπεμπόμενων φωτονίων τα οποία ονόμασε βιοφωτόνια, είναι το DNA των εμβίων οργανισμών. Τα φωτόνια θέτουν σε λειτουργία τις διαδικασίες του σώματος, ανάλογα με τη συχνότητα κάθε φωτονίου. Ο Popp ανακάλυψε ότι τα μόρια των κυττάρων ανταποκρίνονται σε ορισμένες συχνότητες και ότι ένα φάσμα δονήσεων των φωτονίων, παράγει διάφορες συχνότητες στα άλλα μόρια του σώματος. Οι εκπομπές (βιο)φωτονίων από τα σώματα είναι ένα τέλειο σύστημα επικοινωνίας για τη μεταφορά πληροφοριών σε πολλά κύτταρα του οργανισμού. Ο Popp απέδειξε πειραματικά ότι αυτές οι αδύναμες εκπομπές φωτός (τα βιοφωτόνια) είναι αρκετές για να συντονίσουν τις λειτουργίες του σώματος. Οι ΗΜΓνητικές αυτές εκπομπές πρέπει να είναι χαμηλής έντασης διότι οι επικοινωνίες αυτές συμβαίνουν σε κβαντικό επίπεδο (27).

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 (1984) ο Γαλλοεβραίος επιστήμονας Jacques Benveniste μελέτησε την αντίδραση ορισμένων αιμοσφαιρίων με την προσθήκη αλλεργιογόνων. Ειδικότερα χρησιμοποίησε την αντίδραση των βασεόφιλων λευκών αιμοσφαιρίων που φέρουν στην κυτταρική του επιφάνεια αντισώματα ανοσοσφαιρίνης E (IgE), στην προσθήκη αντι-IgE αντισωμάτων που τροποποιούν τα βασεόφιλα έτσι ώστε να μην απορροφάει τη βαφή της κυανής τολουιδίνης. Ο Benveniste και οι συνεργάτες του ανακάλυψαν ότι το φαινόμενο αυτό μπορούσε να συμβεί ακόμη και όταν τα αντισώματα IgE αραιώνονταν και δονούσαν διαδοχικά με πολύ υψηλές αραιώσεις (10^{-32}) έτσι ώστε το τελικό διάλυμα τους να μην περιέχεται ούτε ένα μόριο της αρχικής ουσίας (αντισώματα IgE) (28). Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής δημοσιεύτηκαν στο έγκυρο περιοδικό Nature το 1988 και επιβεβαιώθηκαν από άλλα πέντε ανεξάρτητα ερευνητικά εργαστήρια. Οι ερευνητές αυτοί κατέληξαν ότι κατά την διαδικασία αραιώσης/αναταραχής ορισμένες πληροφορίες πρέπει να μεταφέρονται στο νερό μέσω ενός απείρου δικτύου, συνέχεται από το H_2O ή μέσω ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, έτσι ώστε το νερό να λειτουργεί ως πρότυπο για το μόριο. Ο Benveniste κατανόησε η ανακάλυψη του μπορούσε να εξηγήσει πως τα κύτταρα επικοινωνούν μεταξύ τους αν λάβουμε υπόψη πως σε κάθε κύτταρο αντιστοιχούν 10.000 μόρια νερού για κάθε μόριο πρωτεΐνης. Τα πειράματα που έκανε ο Benveniste μετά την ανάκληση της εργασίας του από το Nature, απέδειξαν οριστικά πως τα μόρια και τα κύτταρα έχουν τις δικές τους μοναδικές συχνότητες, με τις οποίες επικοινωνούν μεταξύ τους ή εκτελούν τις λειτουργίες τους, οι οποίες αντιστοιχούν σε συχνότητες μικρότερες των 20 KHz.

Παράλληλα δύο Ιταλοί φυσικοί του Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του Μιλάνου, ο Giuliano Preparata και ο Emilio Del Giudice απέδειξαν ότι όταν τα άτομα και τα μόρια είναι πολύ κοντά μεταξύ τους σχηματίζουν συνεκτικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία (coherent domains) όπως μια ακτίνα Laser και ότι αυτό το φαινόμενο αφορά και τα μόρια του νερού.

Αυτά τα μοναδικά μήκη κύματος του νερού φαίνεται να λαμβάνουν πληροφορίες από άλλα μόρια που είναι παρόντα, τείνουν δηλαδή να πολώνονται γύρω από ένα φορτισμένο μόριο αποθηκεύοντας και μεταφέροντας την συχνότητα του, ώστε να μπορεί να διαβιβαστεί από απόσταση. Άρα το νερό μπορεί να λειτουργήσει ως μαγνητόφωνο που καταγράφει και μεταφέρει την πληροφορία ενός μορίου, ανεξάρτητα εάν το μόριο είναι παρόν ή όχι στο νερό (29).

II. ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο στόχος της παρούσας διατριβής είναι να διερευνήσει την επίδραση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων συντονισμού τόσο σε κακοήγη κύτταρα λειομυοσαρκώματος όσο και σε επίμυες Wistar που ανέπτυξαν μετά από ενοφθαλμισμό κακοήθεις όγκους λειομυοσαρκώματος. Από τα αποτελέσματα αναμένεται να εξαχθούν συμπεράσματα για τις πιθανές θεραπευτικές ιδιότητες των συντονισμένων ΗΜΓνητικών πεδίων σε όγκους σαρκώματος που εμφανίζουν αντοχή στη χημειοθεραπεία.

3. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

3.1 *In vitro* μελέτη

3.1.1 Χημικά και αντιδραστήρια

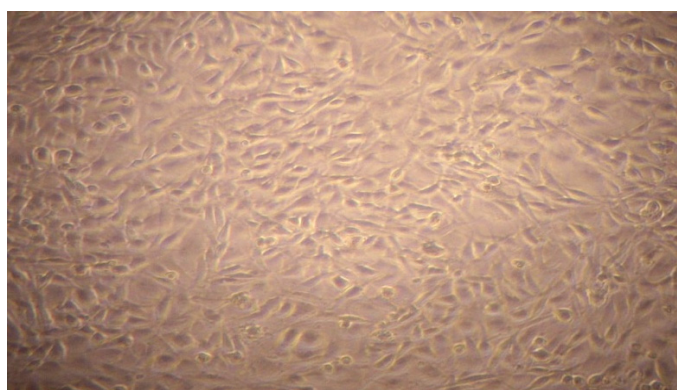
1. Dulbeco's Modified Eagle Medium (DMEM), Low glucose (1gr/lt), PAA
2. Phosphate Buffer Saline (PBS), P4417, Sigma
3. Trypsin-EDTA, 0.05%/0.02% in D-PBS, L11-004, PAA
4. Penicillin-Streptomycin, P11-010, PAA
5. L-glutamine, 200mM, M11-004, PAA
6. Fetal bovine serum (FBS), A15-101, PAA
7. Trypan blue, powder, cell culture tested T6146, Sigma
8. Dimethylsulfoxid, 60153, Riedel-de Haen
9. Annexin V-FITV, 556420, BD PharmingenTM
10. Propidium Iodide solution, P4864, Sigma

3.1.2 Λειομυοσαρκωματικά κύτταρα του επίμυος Wistar

Τα λειομυοσαρκωματικά κύτταρα του επίμυος Wistar που χρησιμοποιήθηκαν παρήχθησαν ως εξής: Από μία ομάδα συγγενών πειραματόζωων η οποία ανήκει στην 7η γενεά ομομικτικής αναπαραγωγής ελήφθησαν 3 αρσενικά και 3 θηλυκά ζώα στα οποία χορηγήθηκε κατόπιν αναισθητοποίησης ποσότητα B[a]P (βενζοπυρένιο) (30,31). Μετά την παρέλευση 110-135 ημερών όλα τα ζώα ανέπτυξαν όγκους, οι οποίοι στην πλειοψηφία τους χαρακτηρίστηκαν ιστολογικά ως λειομυοσαρκώματα. Οι βιοψίες σε όλα τα ζώα έγιναν κατόπιν αναισθητοποίησης με διαιθυλικό αιθέρα και τα κακοήγη κύτταρα ελήφθησαν με βιοπτική βελόνα. Από τους όγκους των ζώων που είχαν χαρακτηριστεί ως λειομυοσαρκώματα ελήφθησαν (κάτω από άσηπτες συνθήκες και κατόπιν αναισθητοποίησης με κεταμίνη – μιδαζολάμη) τεμάχια μεγέθους 0.5 cm² τα οποία ετέθησαν αμέσως σε ψυχρό διάλυμα Ringer.

Κατόπιν τα ιστοτεμάχια κατατημήθηκαν περαιτέρω ώστε να προκύψουν τεμαχίδια μεγέθους περί το 1 mm² τα οποία ελήφθησαν άσηπτα από το Ringer και ετέθησαν σε 20 ml διαλύματος θρυψίνης 0.25%. Η επώαση των τεμαχίων γινόταν υπό ήπια ανάδευση και

ανά 15 min λαμβανόταν το υπερκείμενο το οποίο τίθετο σε άσηπτους πλαστικούς σωλήνες (falcon) για περαιτέρω επεξεργασία (φυγοκέντρηση – τέλος 1ου κύκλου θρυψινισμού). Σε κάθε δοκιμαστικό σωλήνα προστέθηκε 1 ml Fetal Bovine Serum (FBS) για να σταματήσει η δράση της θρυψίνης και ακολουθούσε φυγοκέντρηση. Το ίδιο χρονικό διάστημα, πριν από την έναρξη του 2ου κύκλου θρυψινισμού, προκειμένου τα τεμαχίδια του όγκου να παραμείνουν βιώσιμα προστέθηκαν 10 ml DMEM ώστε η δράση της θρυψίνης να ανασταλεί. Ταυτοχρόνως οι προηγούμενοι δοκιμαστικοί σωλήνες που περιείχαν το εναιώρημα των δια θρυψινισμού εκ του όγκου αποκολληθέντων καρκινικών κυττάρων φυγοκεντρούνταν στις 1200 rpm για 5 min ώστε τα αιωρούμενα καρκινικά κύτταρα να καταπέσουν στον πυθμένα. Μετά το πέρας της φυγοκέντρησης απορρίπτονταν το υπερκείμενο, προστίθετο 10 ml PBS, επανααιωρούταν τα κύτταρα με ήπιες αναροφητικές κινήσεις της πιπέτας και ακολουθούσε φυγοκέντρηση τους στις ίδιες συνθήκες. Απορρίπτοταν ξανά το υπερκείμενο, προστίθετο 10 ml DMEM με 10% FBS και κατόπιν πραγματοποιούταν σπορά του νέου εναιωρήματος ώστε 1 ml αυτού να τίθεται σε τρυβλίο Petri με 9 ml DMEM με 10% FBS (τελικός όγκος καλλιέργειας 10 ml). Τα κύτταρα επωάζονταν σε επωαστή (37°C, 95% O₂, 5% CO₂) και ελέγχονταν οπτικά μία φορά την ημέρα (Εικόνα 8). Όταν δημιουργούσαν πλήρες ταπήτιο γινόταν έκπλυση με 10 ml PBS, αποκόλληση των κυττάρων με 1 ml διαλύματος θρυψίνης και επανασπορά σε καινούργια τρυβλία.



Εικόνα 8 Κύτταρα LMS

Ο έλεγχος της φύσης των εν λόγω κυττάρων έγινε με δύο τρόπους:

- Με τυπικό μικροσκοπικό έλεγχο
- Με βιολογική δοκιμασία

Η βιολογική δοκιμασία της νεοπλασματικής φύσης των εν λόγω κυττάρων γινόταν ως εξής: Από πρόσφατες κυτταροκαλλιέργειες των οποίων τα κύτταρα ήταν σε μεγάλο ποσοστό βιώσιμα γινόταν λήψη μεγάλων αριθμών κυττάρων τα οποία ενοφθαλμιζόνταν σε επίμυες Wistar που ανήκαν στην ομομικτική σειρά ζώων από τους οποίους είχε γίνει η λήψη του αρχικού όγκου. Πριν τον ενοφθαλμισμό κάθε ένα από τα ζώα – λήπτες αναισθητοποιείτο με κεταμίνη – μιδαζολάμη και υποβαλλόταν σε χειρουργική τομή κατά πρώτο σκοπό. Το μήκος της τομής ήταν περίπου 2 cm. Οι υποδόριοι ιστοί παρεκτοπίζονταν μέσω απώθησης με λαβίδα και κατόπιν η αποκαλυφθείσα μυϊκή στοιβάδα τραυματιζόταν με ήπιους νυγμούς ώστε να προκαλείται μικρή τοπική αιμορραγία. Επί της δημιουργηθείσας μικρής πληγής γινόταν εναπόθεση των καρκινικών κυττάρων ($4-8 \times 10^6$ κύτταρα/ml διαλύματος Hank). Μετά τον ενοφθαλμισμό των κυττάρων γινόταν σφικτή συρραφή της τομής. Τόσο η διάνοιξη της τομής, όσο και η σύγκλισή της γινόταν υπό άσηπτες συνθήκες. Επιτυχής ενοφθαλμισμός των καρκινικών κυττάρων οδηγούσε σε ταχεία ανάπτυξη όγκου στην περιοχή (10-20 ημέρες). Από τους αναπτυχθέντες όγκους γινόταν κατόπιν αναισθητοποίησης λήψη δείγματος με βιοπτική βελόνη και ιστοπαθολογικός έλεγχος των κυττάρων. Σε όλες τις περιπτώσεις το αποτέλεσμα της βιοψίας ήταν θετικό για λειομυοσάρκωμα. Επίσης τα επιτυχώς ενοφθαλμισμένα με καρκινικά κύτταρα ζώα ανέπτυξαν όλα τα χαρακτηριστικά της νεοπλασματικής νόσου τόσο σε τοπικό όσο και σε συστηματικό επίπεδο (τοπική αύξηση όγκου, νεοαγγειογένεση, διήθηση παρακείμενων ιστών, αιματογενή διασπορά, διήθηση λεμφαδένων, απομακρυσμένη μετάσταση, απίσχναση, αναιμία, θάνατος). Οι όγκοι κατά τη στιγμή του θανάτου είχαν μέγεθος που προσέγγιζε από 38-45 % της συνολικής μάζας του σώματος.

3.1.3 Λεία μυϊκά κύτταρα

Τα λεία μυϊκά κύτταρα απομονώθηκαν από την αορτή των επίμυων Wistar.

3.1.4 Κυτταρική καλλιέργεια

Τα LMS και SMC κύτταρα καλλιεργήθηκαν σε θρεπτικό υλικό Dulbeco's Modified Eagle Medium (DMEM), Low glucose (1gr/lit), με την προσθήκη 10% εμβρυϊκού βοδινού ορού

(Fetal Bovine Serum), 1% πενικιλίνης-στρεπτομυκίνης και 0.5% L-γλουταμίνης. Τα κύτταρα διατηρήθηκαν σε επωαστικό θάλαμο σε συνθήκες 37°C και 5% CO₂.

3.1.5 Ενοφθαλμισμός κυττάρων σε επίμυες Wistar

Ο ενοφθαλμισμός είναι ένα ταχύ και με μεγάλο ποσοστό επιτυχίας μοντέλο ανάπτυξης όγκων σε πειραματόζωα για να μπορέσουμε να μελετήσουμε την αντικαρκινική δράση των διαφόρων συμπλόκων χωρίς να περιμένουμε αρκετούς μήνες όπως αυτό συμβαίνει στο μοντέλο της χημικής καρκινογένεσης. Καλλιεργήθηκαν τα LMS σε τρυβλία 96mm και αφέθηκαν να φτάσουν σε πλήρη ανάπτυξη. Έπειτα αποκολλήθηκαν τα κύτταρα και συλλέχθηκαν σε falcon, ενώ πραγματοποιήθηκε μέτρηση για να υπολογιστεί ο ακριβής αριθμός τους. Στη συνέχεια φυγοκεντρήθηκαν και το κυτταρικό ίζημα επαναιωρήθηκε σε Hank's balanced solution έτσι ώστε να υπάρχουν $3.5-4 \times 10^6$ LMS κύτταρα / ml διαλύματος. Το διάλυμα των κυττάρων τοποθετήθηκε σε αποστειρωμένη σύριγγα (5G) των 5ml. Για την αναισθητοποίηση του κάθε πειραματόζωου χρησιμοποιήθηκαν 0.5-1 ml αναισθητικού (10% ketamine, 40% midazolame και 50% φυσιολογικός ορός 0.9%). Μετά την αναισθητοποίηση, ακινητοποιήθηκε το πειραματόζωο και έγινε μια μικρή τομή στο ανώτερο δεξιό τμήμα της ωμοπλάτης. Κατόπιν το πειραματόζωο τραυματίστηκε ελαφρά εσωτερικά της τομής και προκλήθηκε αιμορραγία. Εκείνη τη στιγμή έγινε έγχυση 1ml του κυτταρικού διαλύματος. Μια ποσότητα κυτταρικού διαλύματος προστέθηκε ξανά σε καλλιεργητικό υγρό (DMEM) και πραγματοποιήθηκε παράλληλα έλεγχος για την ικανότητα ανάπτυξης και πολλαπλασιασμού των κυττάρων. Έγινε προσεκτική συρραφή της τομής με ράμματα V7 και στη συνέχεια το κάθε πειραματόζωο τοποθετήθηκε σε ξεχωριστό κλουβί μέχρι να συνέλθει από την αναισθησία. Αυτό έγινε για να αποφευχθεί το φαινόμενο του «κανιβαλισμού», όπου το ένα πειραματόζωο τρώει το άλλο. Τα πειραματόζωα ελέγχονταν δύο φορές την ημέρα για τις πρώτες 10 ημέρες όπου και υπήρξαν οι πρώτοι ψηλαφητοί όγκοι.

3.1.6 Συσκευή Εκπομπής Ηλεκτρομαγνητικών Πεδίων

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για όλες τις *in vitro*, *ex vivo* και *in vivo* πειραματικές διαδικασίες έκθεσης ονομάζεται Multi Channel Dynamic Exciter (MCDE) και αποτελείται

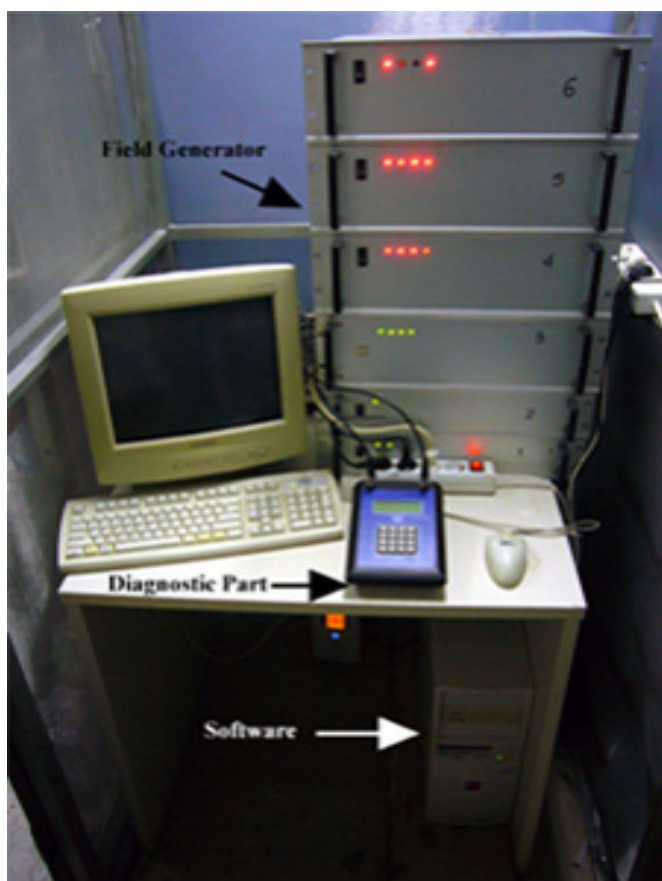
από δύο μέρη: Α) Το αποθηκευτικό σύστημα και Β) τη γεννήτρια παραγωγής πεδίων. Το αποθηκευτικό σύστημα είναι ένας υπολογιστής ο οποίος περιέχει ένα εξειδικευμένο λογισμικό μέσω του οποίου είναι δυνατόν να καταγράψουμε, να αποθηκεύσουμε και να τροποποιήσουμε τις οποιεσδήποτε συχνότητες θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε ή να επεξεργαστούμε (Εικόνα 9). Ένα τμήμα του λογισμικού αφορά την εξαγωγή της κυματοσυνάρτησης η οποία αντιστοιχεί στην εκπομπή που προέρχεται από ένα χημικό σώμα. Εφόσον η συνάρτηση προσδιοριστεί είμαστε σε θέση να εφαρμόσουμε επί αυτής μια σχέση η οποία την μετατρέπει σε άλλη συνάρτηση. Η νέα συνάρτηση μπορεί κατόπιν να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σύμφωνα με το δικό της μαθηματικό πρότυπο. Με τη χρησιμοποίηση κάποιων αλγόριθμων που δε θα περιγράψουμε εδώ το φάσμα ραδιοφωνικών συχνοτήτων συντονισμού είναι σε θέση να μετατραπεί στο κατοπτρικό του, να αποθηκευτεί και κατόπιν να εκπεμφθεί επί του αρχικού μοριακού στόχου από τον οποίο προέρχεται. Η γεννήτρια παραγωγής πεδίων χρησιμοποιεί τις κυματοσυναρτήσεις που προαναφέραμε όπως επίσης και τις αλγοριθμικές μετατροπές τους για την παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στις συχνότητες που αντιστοιχούν σε συντονισμούς. Τα κύματα αυτά μπορούν να εκπεμφθούν πάνω στο σύστημα στόχο και να προκαλέσουν ποικίλα φαινόμενα διέγερσης και αυτοδιέγερσης τους, όπως για παράδειγμα θάνατο καρκινικών κυττάρων, επαγωγή γονιδίων, καταστολή φαινοτύπων, μίμηση δράσης ιδιοτήτων βιολογικώς ενεργών ουσιών.

Με τη συγκεκριμένη συσκευή μετρήθηκαν, με την αναδραστική (fee-back) ΗΜΓνητική μέθοδο, οι συχνότητες συντονισμού τόσο των λείων μυϊκών κυττάρων, όσο και των λειομυοσαρκωματικών κυττάρων. Η μέτρηση εκτελούνται μέσω γεννήτριας εκπομπής ηλεκτρομαγνητικών συχνοτήτων οι οποίες εκπέμπονται μέσω ενός ηλεκτροδίου προς την καλλιέργεια των κυττάρων και η παλμικότητα των κυττάρων καταγράφεται μέσω ενός ηλεκτροδίου υποδοχής που είναι συνδεδεμένο με παλμογράφο. Κάθε εκπεμπόμενη συχνότητα προκαλεί διέγερση της παλμικότητας των κυττάρων, και οι συχνότητες συντονισμού προκαλούν τα υψηλότερα επίπεδα παλμικότητας του δείγματος (5, 6).

Με τη συγκεκριμένη μέθοδο μετρήθηκαν οι συχνότητες συντονισμού των λειομυοσαρκωματικών κυττάρων (LMS) και των λείων μυϊκών κυττάρων της αορτής (SMC) από την εξαλλαγή των οποίων προέρχονται τα LMS κύτταρα. Με βάση αυτά τα δύο δεδομένα κατασκευάστηκε πρόγραμμα σε H/Y, που καθοδηγούσε τις γεννήτριες ΗΜΓνητικών κυμάτων να εκπέμπουν κατ'αρχήν τις συχνότητες συντονισμού των LMS κυττάρων και εν συνεχεία να μειώνονται σταδιακά καταλήγοντας στην εκπομπή των

συχνότητων συντονισμού των SMC κυττάρων, στην προσπάθεια να συντονιστούν τα LMS κύτταρα ώστε να εκπέμπουν ΗΜΓνητικές συχνότητες όσο το δυνατόν παρόμοιες με τις συχνότητες συντονισμού των SMC κυττάρων.

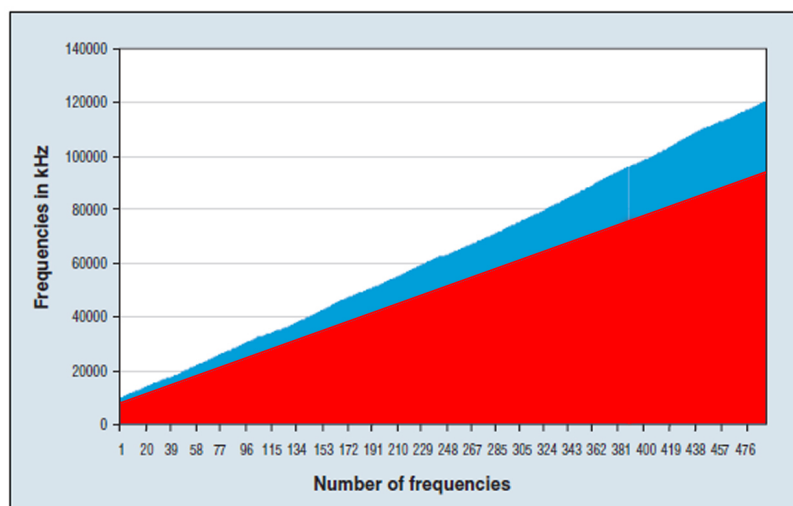
Η γεννήτρια των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία δημιουργούσε πεδία εντάσεων από 1.1 μέχρι 1.11 ± 0.01 V/m για το ηλεκτρικό πεδίο και 0.0027 μέχρι 0.0029 ± 0.00005 A/m για το μαγνητικό πεδίο. Επίσης οι ραδιοσυχνότητες που παρήγαγε ξεκινούσαν από τα 10 Hz έως 1 MHz. Η συσκευή είχε ελεγχθεί από εξειδικευμένο εργαστήριο του Κέντρου Φυσικών Ερευνών «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» του Ελληνικού Τμήματος της Διεθνούς Επιτροπής Ατομικής Ενέργειας για τον προσδιορισμό των ανώτερων ορίων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπει και βρέθηκε ότι οι εκπομπές της ήταν ασφαλείς για παρατεταμένη έκθεση ανθρώπων, ζώων και άλλων βιολογικών οργανισμών (32).



Εικόνα 9 Συσκευή MCDE

3.1.7 Υπολογισμός των Ηλεκτρομαγνητικών Συχνοτήτων Συντονισμού των LMS και SMC κυττάρων

Τα ηλεκτρομαγνητικά αποτυπώματα συντονισμού των LMS και SMC κυττάρων καταγράφηκαν πριν και μετά την έκθεση τους στα EMF (10 KHz-120 KHz). Οι ERF των ηλεκτρομαγνητικών αποτυπωμάτων των LMS τροποποιήθηκαν χρησιμοποιώντας ειδικό λογισμικό και μετά τα καρκινικά κύτταρα εκτέθηκαν σε αυτές τις ηλεκτρομαγνητικές συχνότητες για 45 λεπτά. Η βιωσιμότητα των κυττάρων καθώς και η μορφολογία τους ελεγχόταν κάθε 24 ώρες. Συνολικά καταγράφηκαν 492 διαφορετικές συχνότητες που εκπέμφθηκαν από τα LMS κύτταρα (Γράφημα 1).



Γράφημα 1 Τα ηλεκτρομαγνητικά αποτυπώματα συντονισμού των LMS κυττάρων καταγράφηκαν πριν την έκθεση τους στα EMF (10 KHz-120 KHz). Συνολικά καταγράφηκαν 492 διαφορετικές συχνότητες που εκπέμφθηκαν από τα LMS κύτταρα (ΜΠΛΕ) και οι ανάλογες συχνότητες των SMC (ΚΟΚΚΙΝΟ)

3.1.8 Έκθεση των LMS και SMC κυττάρων στα EMF

Τα κύτταρα LMS (10^5 κύτταρα/10 ml) καλλιεργήθηκαν σε θρεπτικό υλικό Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM), Low glucose (1gr/l), με την προσθήκη 10% εμβρυϊκού βοδινού ορού (Fetal Bovine Serum), 1% πενικιλίνης-στρεπτομυκίνης και 0.5% L-γλουταμίνης. Τα κύτταρα διατηρήθηκαν σε επωαστικό θάλαμο σε συνθήκες 37°C και 5% CO₂ για 48 ώρες. Στη συνέχεια το θρεπτικό υλικό αντικαταστάθηκε με καινούργιο. Μετά

από 24 ώρες (72 ώρες από την έναρξη) 6 καλλιέργειες κυττάρων (κύτταρα EMF) τοποθετήθηκαν σε κλωβό Faraday σε θερμοκρασία δωματίου και εκτέθηκαν σε ΗΜΓνητικές συχνότητες (από 10 ως 120 KHz και έντασης 1.1 ως 1.11 ± 0.01 V/m για το ηλεκτρικό πεδίο και 0.0027 ως 0.0029 ± 0.00005 A/m για το μαγνητικό πεδίο) για 45 λεπτά. Συνολικά 492 συχνότητες χρησιμοποιήθηκαν για την έκθεση των LMS στα EMF. Οι συχνότητες αυτές προέκυψαν από την τροποποίηση των 492 συχνοτήτων που καταγράφονταν από τα LMS κύτταρα (Γράφημα 1) χρησιμοποιώντας ένα συγκεκριμένο αλγόριθμο

$$\Sigma f(r) + f(em) = c,$$

όπου $f(r)$ = κατεγραμμένη συχνότητα, $f(em)$ = εκπεμπόμενη συχνότητα και c = μια σταθερά

Έξι ακόμα τρυβλία με LMS κύτταρα (control cells) παρέμειναν σε θερμοκρασία δωματίου για το ίδιο χρονικό διάστημα χωρίς να εκτεθούν σε ΗΜΓνητικές συχνότητες (Τυχαία έκθεση). Τόσο το control όσο και τα EMF κύτταρα επωάστηκαν πάλι στις ίδιες συνθήκες που αναφέρονται παραπάνω για επτά ακόμα ώρες. Στις 79 και 96 ώρες από την έναρξη του πειράματος μετρήθηκε ο κυτταρικός πληθυσμός και καλλιεργήθηκαν πάλι σε πυκνότητα 10^5 κύτταρα/τρυβλίο 10 ml στις ίδιες συνθήκες. Στις 120 ώρες από την έναρξη του πειράματος τα EMF κύτταρα εκτέθηκαν και πάλι στις συχνότητες EMF όπως και προηγουμένως και 24 ώρες μετά μετρήθηκε ο αριθμός τόσο των EMF όσο και των control κυττάρων ενώ παρατηρήθηκε και η μορφολογία τους σε οπτικό μικροσκόπιο. Για να εξεταστεί η ικανότητα πολλαπλασιασμού τους σε σχέση με το χρόνο και οι δύο ομάδες κυττάρων καλλιεργήθηκαν ξανά και επωάστηκαν στις προαναφερθείσες συνθήκες. Αφού αναπτύχθηκαν πλήρως τα κύτταρα συλλέχθηκαν και αποθηκεύτηκαν σε υγρό άζωτο.

Τα SMC που απομονώθηκαν από την αορτή των επίμυων Wistar καλλιεργήθηκαν στις ίδιες συνθήκες με τα LMS κύτταρα όπως περιγράφονται παραπάνω και εκτέθηκαν στις αντίστοιχες ΗΜΓνητικές συχνότητες που εκτέθηκαν τα LMS. Τα πειράματα σε LMS και SMC κύτταρα επαναληφθήκαν 5 φορές.

3.1.9 Χειρισμός των LMS κυττάρων – Κυτταρομετρία ροής

Τα κύτταρα LMS που είχαν αποθηκευτεί στο υγρό άζωτο (EMF και control) αφού αποψύχθηκαν καλλιεργήθηκαν ξανά. Καλλιεργήθηκαν 12 τρυβλία με το ίδιο αριθμό κυττάρων LMS για 24 ώρες. Τα EMF κύτταρα εκτέθηκαν και πάλι σε ΗΜΓνητικές συχνότητες για 45 λεπτά μετά από 24 και 48 ώρες, έξι ώρες μετά το πέρας της τελευταίας έκθεσης συλλέχθηκαν δείγματα ώστε να πραγματοποιηθεί ανάλυση του κυτταρικού κύκλου σε κυτταρόμετρο Becton Dickinson, FACScan system (Becton Dickinson, USA, California).

3.1.10 Αιμοπεταλιακή συσσώρευση

Η ικανότητα των LMS κυττάρων να προκαλούν τη συσσώρευση των αιμοπεταλίων πριν και μετά την έκθεση τους σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία μελετήθηκε χρησιμοποιώντας το συσσωρευμόμετρο CA-500, (Cronolog Co, USA), και το κιτ Cronolog για συσσώρευση των αιμοπεταλίων. Πραγματοποιήθηκαν 120 δοκιμασίες από δείγματα αίματος που λήφθηκαν από 120 εθελοντές οι οποίοι απείχαν από τα ναρκωτικά και το αλκοόλ για δέκα ημέρες πριν από τις εξετάσεις. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε πλάσμα πλούσιο σε αιμοπετάλια (platelet rich plasma, PRP) που απομονώθηκε από τα δείγματα αίματος μετά την εναιώρηση με 5×10^5 κύτταρα που είτε είχαν εκτεθεί είτε όχι σε EMF.

3.1.11 Έλεγχος κυτταρικής βιωσιμότητας με τη χρήση χρωστικής Trypan Blue Exclusive Assay

Η μέτρηση των κυττάρων πραγματοποιείται με την τεχνική χρώσης Trypan Blue. Αφού γίνει αναρρόφηση του θρεπτικού υλικού και πλύση των κυττάρων με PBS τα κύτταρα αποκολλούνται με προσθήκη 0.5 ml θρυψίνης. Έπειτα, προστίθενται 0.5 ml PBS και 1 ml Trypan Blue και τα κύτταρα επωάζονται για 5 λεπτά σε συνθήκες δωματίου. Η μέτρηση των κυττάρων γίνεται με χρήση πλάκας NeuBauer. Τα κύτταρα που επιβίωσαν είναι αρνητικά στη χρώση. Το ποσοστό της βιωσιμότητας των κυττάρων στα φρεάτια δοκιμής της ουσίας εκφράζεται σε εκατοστιαίες μονάδες συγκρινόμενο με το αντίστοιχο ποσοστό των βιώσιμων κυττάρων των φρεατίων ελέγχου.

3.2 *In vivo* Μελέτη

3.2.1 Καταγραφή των ΗΜΓνητικών Συχνοτήτων των LMS και SMC

Οι συχνότητες των LMS και SMC κυττάρων καταγράφηκαν όπως αναφέρεται παραπάνω. Οι ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού καταγράφηκαν και για τα κύτταρα LMS που επιβίωσαν μετά την έκθεση τους στα ΗΜΓνητικά πεδία για δύο συνεχόμενες ημέρες. Τόσο οι συχνότητες των LMS όσο και των SMC χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία ενός συγκεκριμένου αλγόριθμου. Χρησιμοποιώντας αυτόν τον αλγόριθμο, το ΗΜΓνητικό αποτύπωμα των LMS κυττάρων μετασχηματίστηκε σε μια μειούμενη αλληλουχιών συχνοτήτων, με σκοπό τη σταδιακή προσαρμογή του ΗΜΓνητικού μοτίβου συντονισμού των LMS κυττάρων *in vitro*, στο μοτίβο συντονισμού των SMC των επίμυων Wistar. Τα SMC επιλέχθηκαν γιατί τα LMS κύτταρα προέρχονται από SMC κύτταρα μέσω πρόκλησης χημικής καρκινογένεσης.

3.2.2 Έκθεση των LMS και SMC κυττάρων στα EMF

Βλέπε Μεθοδολογία, *In vitro* Μελέτη, Παράγραφος 3.1.8

3.2.3 Έκθεση των επίμυων Wistar στα EMF

Στα πειραματόζωα πραγματοποιήθηκε ενοφθαλμισμός με κύτταρα LMS που δεν είχαν εκτεθεί σε EMF. Μετά την εμφάνιση ψηλαφητού όγκου τα ζώα εκτέθηκαν στις ίδιες ΗΜΓνητικές συχνότητες για 5 ώρες καθημερινά μέσα σε ένα κλωβό Faraday, ως το θάνατο τους. Η απόσταση μεταξύ των πειραματόζωων και της κεραίας εκπομπής της συσκευής MCDE ήταν 50 εκατοστά. Κατά την έκθεση στις συχνότητες συντονισμού κάθε κλουβί περιείχε 3 πειραματόζωα. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε και για την ομάδα ελέγχου.

3.2.4 Περαιτέρω μελέτες στα Πειραματόζωα

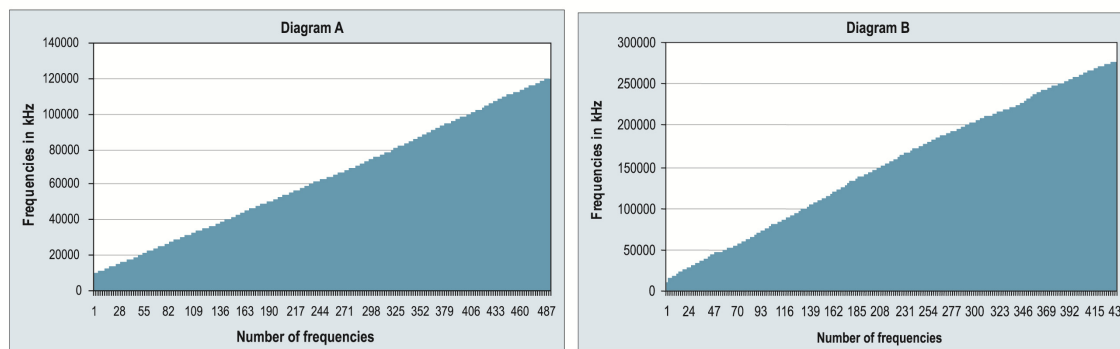
Είκοσι εννέα επίμυες τοποθετήθηκαν τυχαία σε τρεις ομάδες μετά τον ενοφθαλμισμό τους με μη εκτεθειμένα στις συχνότητες συντονισμού κύτταρα LMS: α) Η Ομάδα Ελέγχου (control group, CG), β) η Πειραματική Ομάδα Ελέγχου (experimental control group, ECG) και η Ομάδα Πειράματος (experimental group, EG-I). Συνολικά 39 θηλυκοί επίμυες

Wistar, ηλικίας 3 μηνών και βάρους 250 ± 15 γραμμαρίων τοποθετήθηκαν σε 4 Ομάδες. Τα πειραματόζωα που ανήκαν στην τέταρτη Ομάδα ενοφθαλμίστηκαν με εκτεθειμένα στις ΗΜΓνητικές συχνότητες κύτταρα LMS (4×10^6 κύτταρα) και χωρίστηκαν: Στην Ομάδα Ελέγχου (control group, CG) που αποτελούνταν από 11 επίμυες. Τα πειραματόζωα τοποθετήθηκαν στο κλωβό Faraday ως το θάνατο τους, β) την Πειραματική Ομάδα Ελέγχου (experimental control group, ECG) που αποτελούνταν από 9 επίμυες και εκτέθηκαν σε χαμηλής έντασης, συχνότητες μη-συντονισμού (non-resonant radiofrequencies, NRRF) για 5 ώρες καθημερινά ως το θάνατο όλων των πειραματόζωων. Το εύρος των συχνοτήτων ήταν από 10 KHz ως 120 KHz και έντασης 1.1 ως 1.11 ± 0.01 V/m για το ηλεκτρικό πεδίο και 0.0027 ως 0.0029 ± 0.00005 A/m για το μαγνητικό πεδίο), γ) την Ομάδα Πειράματος I (experimental group, EG-I) που αποτελούνταν από 9 επίμυες και εκτέθηκαν σε συχνότητες συντονισμού για 5 ώρες καθημερινά για 60 ημέρες (Πίνακας 1). Το εύρος των συχνοτήτων ήταν από 10 KHz ως 120 KHz και έντασης 1.1 ως 1.11 ± 0.01 V/m για το ηλεκτρικό πεδίο και 0.0027 ως 0.0029 ± 0.00005 A/m για το μαγνητικό πεδίο). Οι συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο Γράφημα 1, και δ) την Ομάδα Πειράματος II (experimental group, EG-II) που αποτελούνταν από 10 επίμυες και εκτέθηκαν στις ΗΜΓνητικές συχνότητες όπως αναφέρεται προηγουμένως.

Πίνακας 1 Χρόνος έκθεσης (ώρες) στις ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού για κάθε πειραματόζωο της Ομάδας EG-I

Αριθμός πειραματόζωων	Χρόνος έκθεσης (ώρες)
1	300
2	300
3	215
4	250
5	295
6	300
7	90
8	100
9	300
Μέση Τιμή	238.9

Τιμές χρόνου έκθεσης < 300 ώρες (< 60 ημέρες) καταγράφηκαν και οφείλονται στο θάνατο του πειραματόζωου



Γράφημα 2 Οι συχνότητες που χρησιμοποιήθηκαν στους καρκινοπαθείς επίμυες Wistar των ομάδων EG-I και EG-II. Το κάθε διάγραμμα (A και B) αποτελείται από 500 περίπου συχνότητες συντονισμού.

3.2.5 Ενοφθαλμισμός επίμυων Wistar

Τα εκτεθειμένα και μη κύτταρα LMS στις ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού επαναιωρήθηκαν σε Hank's balanced solution έτσι ώστε να υπάρχουν 4×10^6 LMS κύτταρα/ml διαλύματος. Το διάλυμα των κυττάρων τοποθετήθηκε σε αποστειρωμένη σύριγγα (5G) των 5ml. Για την αναισθητοποίηση του κάθε πειραματόζωου χρησιμοποιήθηκαν 3 mg/κίλο ΣΒ ketamine και 3.5mg/κίλο ΣΒ midazolame. Μετά την αναισθητοποίηση, ακινητοποιήθηκε το πειραματόζωο και έγινε μια μικρή τομή στο ανώτερο δεξιό τμήμα της ωμοπλάτης. Κατόπιν το πειραματόζωο τραυματίστηκε ελαφρά εσωτερικά της τομής και προκλήθηκε αιμορραγία. Εκείνη τη στιγμή έγινε έγχυση 1 ml του κυτταρικού διαλύματος. Έγινε προσεκτική συρραφή της τομής με ράμματα V7 και στη συνέχεια τοποθετήθηκαν 2 πειραματόζωα ανά ένα κλουβί, σε σταθερή θερμοκρασία δωματίου ($19 \pm 1.2^\circ\text{C}$), και σε ρυθμισμένες συνθήκες φωτισμού ώστε να υπάρχει σταθερός κύκλος φως: σκοτάδι 12:12 ώρες. Τα ζώα είχαν ελεύθερη πρόσβαση σε καθορισμένης σύστασης τροφή (Viozois S.A., Animal Feed Company of Epirus, Greece) και σε πόσιμο νερό.

Το μέγεθος των όγκων που αναπτύχθηκαν μετρήθηκε με τη χρήση διαστημόμετρου τύπου δαγκάνας. Όλα τα πειραματόζωα ελέγχονταν μία φορά την ημέρα. Μετά τον θάνατο του κάθε ζώου, καταγράφηκε η ημερομηνία, πραγματοποιήθηκε αυτοψία, τα εσωτερικά όργανα μονιμοποιήθηκαν σε φορμαλδεΰδη 10% και πραγματοποιήθηκε ιστοπαθολογική μελέτη. Βάσει των ημερομηνιών θανάτου, υπολογίστηκαν και για τις δύο ομάδες ο μέσος όρος επιβίωσης (MST), το μέσο βάρος του όγκου (MTW) και ο μέσος ρυθμός ανάπτυξης

του όγκου (MTGR). Ο ρυθμός ανάπτυξης του όγκου (TG) για κάθε πειραματόζωο υπολογίστηκε από τη σχέση: $TGR (g/d) = tumor\ weight\ (grams)/survival\ time\ (days)$

3.3 Στατιστική ανάλυση

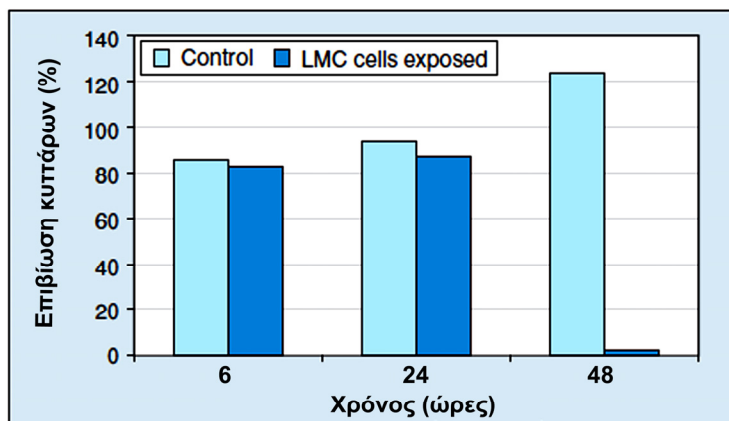
Όλα τα αποτελέσματα εκφράζονται ως μέσοι όροι $\pm$ σταθερή απόκλιση. Όλες οι στατιστικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το στατιστικό πακέτο SPSS 16.0 (SPSS Inc. Chicago, Illinois, USA). Τιμές $p < 0.05$ θεωρήθηκαν στατιστικά σημαντικές.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

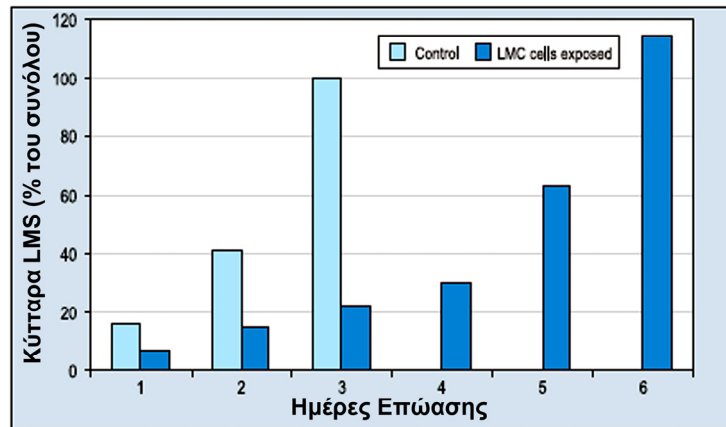
4.1 *In vitro* μελέτη

4.1.1 Πολλαπλασιασμός των κυττάρων

- i. 24 ώρες μετά την πρώτη και τη δεύτερη έκθεση των κυττάρων στα ΗΜΓνητικά πεδία ο ρυθμός πολλαπλασιασμού των κυττάρων είχε ελαφρώς μειωθεί σε σχέση με τα κύτταρα control ($p<0.05$). Η μικροσκοπική εξέταση έδειξε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των LMS κυττάρων ήταν σε στρες, τα κύτταρα είχαν στρογγυλό σχήμα με θνησιγενή ψευδοπόδια και κύστες στη πυρηνική μεμβράνη.
- ii. Ο ρυθμός πολλαπλασιασμού των ακτινοβολημένων LMS κυττάρων μειώθηκε δραματικά μετά από 48 ώρες επώαση, κατά 98% σε σχέση με τα κύτταρα control ($p<0.0001$) και τα περισσότερα κακοήθη κύτταρα ήταν ήδη νεκρά (απόπτωση) ή σε σοβαρό στρες: στρογγυλό σχήμα, χωρίς ψευδοπόδια και με κύστες στη πυρηνική μεμβράνη (Γράφημα 3).
- iii. Τα κύτταρα που επιβίωσαν μετά την 1^η περίοδο έκθεσης στα ΗΜΓνητικά πεδία έδειξαν μεγάλη δυσκολία στο να πολλαπλασιαστούν σε σχέση με τα control κύτταρα (χρειάστηκαν 6 ημέρες για να καλύψουν το ταπήτιο του τρυβλίου ενώ τα control 3 ημέρες) (Γράφημα 4). Επίσης τα κύτταρα που επιβίωσαν ανέταξαν σημαντική αντίσταση στα ΗΜΓνητικά πεδία, παρουσιάζοντας μόλις 20% μείωση του πολλαπλασιασμού τους σε σχέση με την πολύ υψηλή μείωση που καταγράφηκε μετά την πρώτη έκθεσή τους (98%).



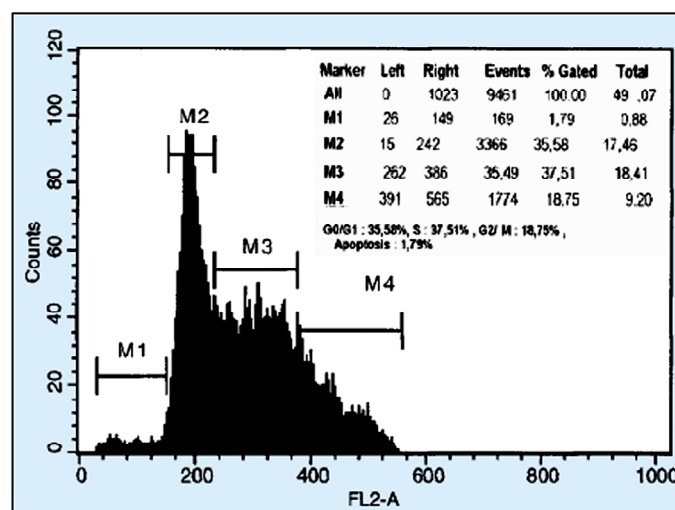
Γράφημα 3 Επιβίωση των LSC κυττάρων 48 ώρες μετά την έκθεση σε EMF



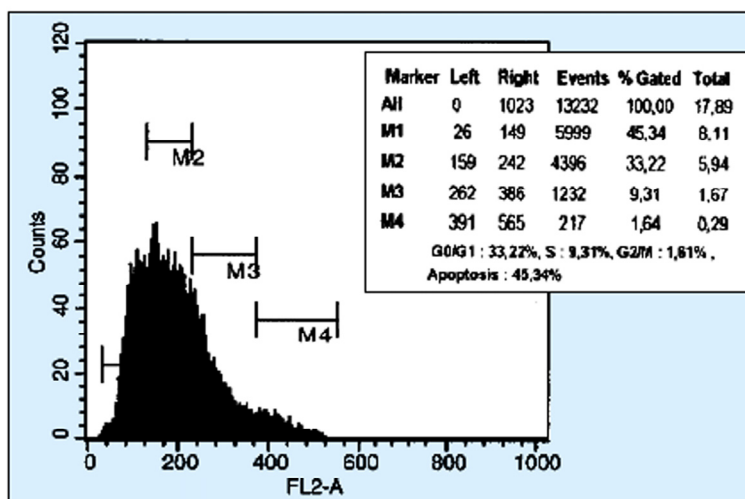
Γράφημα 4 Ικανότητα των LSC κυττάρων να πολλαπλασιάζονται μετά την έκθεση σε EMF

4.1.2 Κατανομή των LMS κυττάρων στις φάσεις του κυτταρικού κύκλου

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της κυτταρομετρίας ροής η κατανομή των κυττάρων μετά την 4^η έκθεση τους στις ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού είναι η εξής: 33% στη φάση G0/G1, 9% στη φάση S, 2% στη φάση M και 45% στη φάση SubG1 (απόπτωση). Εν αντιθέσει στα control κύτταρα η κατανομή ήταν η ακόλουθη: 36% στη φάση G0/G1, 38% στη φάση S, 19% στη φάση M και 2% στη φάση SubG1 (Γράφημα 5 και 6).



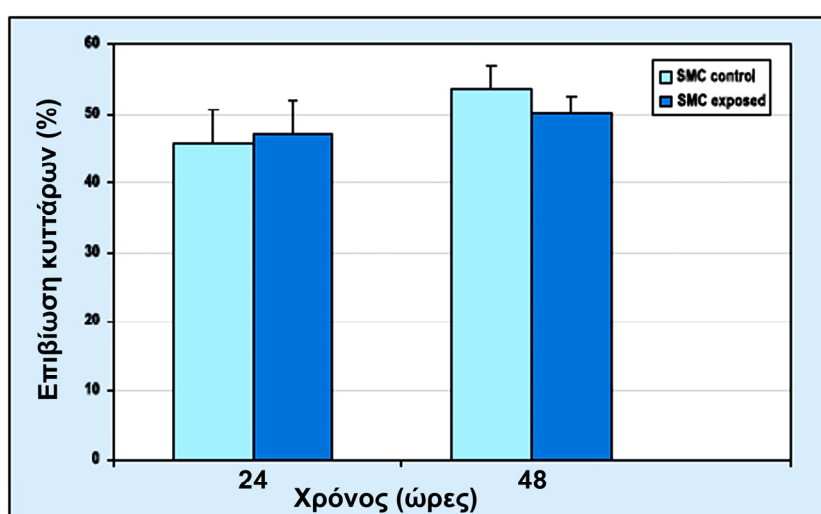
Γράφημα 5 Κυτταρομετρία ροής μη-εκτεθειμένων σε EMF κυττάρων σαρκώματος



Γράφημα 6 Κυτταρομετρία ροής εκτεθειμένων σε EMF κυττάρων σαρκόματος

4.1.3 Επιβίωση των SMC κυττάρων μετά από έκθεση στις ΗΜΓνητικές Συχνότητες Συντονισμού

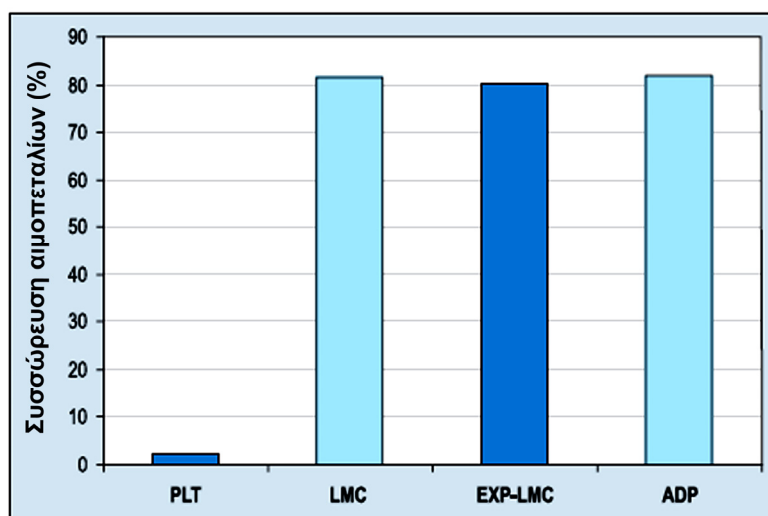
Τα κύτταρα SMC δεν επηρεάστηκαν από την έκθεση στις ΗΜΓνητικές συχνότητες όπως φαίνεται κατά την μέτρηση της επιβίωσης τους 24 και 48 ώρες μετά την έκθεση τους (Γράφημα 7). Τα κύτταρα SMC που είχαν εκτεθεί στις ΗΜΓνητικές συχνότητες είχαν κατά 10% μικρότερο ρυθμό πολλαπλασιασμού από τα μη-ακτινοβολημένα κύτταρα, χωρίς ωστόσο αυτή η διαφορά να είναι στατιστικά σημαντική.



Γράφημα 7 Ικανότητα πολλαπλασιασμού κυττάρων SMC μετά από έκθεση σε EMF

4.1.4 Αναστολή της συσσώρευσης των αιμοπεταλίων

Η ικανότητα συσσώρευσης τόσο των κυττάρων control όσο και των κυττάρων EMF ήταν σχεδόν 78% και σχεδόν αντίστοιχη με την ικανότητα πρόκλησης συσσώρευσης της διφωσφορικής αδενοσίνης (82%). Επομένως, η έκθεση των κυττάρων στα φάσματα συντονισμού δεν μεταβάλλει σημαντικά την ικανότητα συσσώρευσης αιμοπεταλίων και άρα την «εν δυνάμει μεταστατική τους δράση» (Γράφημα 8).



Γράφημα 8 Αναστολή συσσώρευσης των αιμοπεταλίων από τα ακτινοβολημένα κύτταρα

4.1.5 Υπολογισμός των Ηλεκτρομαγνητικών Συχνοτήτων Συντονισμού των κυττάρων

Οι ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού των: α) μη-εκτεθειμένων κυττάρων LMS ήταν μεταξύ των 10.5 και 120.5 KHz, β) εκτεθειμένων κυττάρων LMS μεταξύ των 10 και 120 KHz και γ) SMC μεταξύ των 10 και 120 KHz. Η ανάλυση του ΗΜΓνητικού φάσματος έδειξε ότι οι συχνότητες συντονισμού των κυττάρων LMS τα οποία έχουν ακτινοβοληθεί με ΗΜΓνητικά πεδία συντονισμού παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από τα κύτταρα LMS που δεν έχουν ακτινοβοληθεί. Εμφανίζουν όμως (τα μη ακτινοβολημένα) κύτταρα LMS συχνότητες συντονισμού κατά 70% παρόμοιες με αυτές των SMC κυττάρων.

4.2 In vivo μελέτη

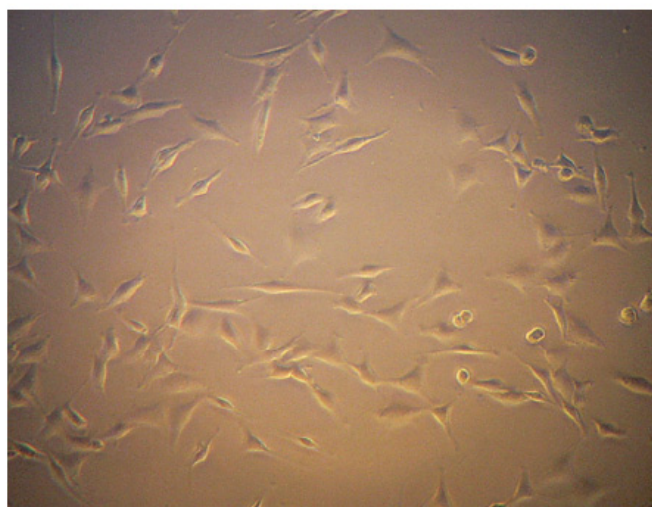
4.2.1 Υπολογισμός των Ηλεκτρομαγνητικών Συχνοτήτων Συντονισμού των κυττάρων

Βλέπε Αποτελέσματα, *In vitro* Μελέτη, Παράγραφος 4.1.5

4.2.2 Αναστολή της ανάπτυξης των όγκων σε επίμυες Wistar

Όλα τα πειραματόζωα της Ομάδας Ελέγχου, τα οποία ενοφθαλμίστηκαν με μη ακτινοβολημένα κύτταρα LMS ανέπτυξαν στο σημείο του ενοφθαλμισμού ως την 14^η ημέρα, ψηλαφητούς όγκους διαστάσεων περίπου 22.8x24.3 mm. Οι όγκοι αυτοί αναγνωρίστηκαν ιστολογικά ως λειομυοσαρκώματα (Εικόνα 10). Ο MST των της Ομάδας Ελέγχου ήταν 20.36±3.23 ημέρες ενώ το MTW 86.7±27.6 γραμμάρια και ο MTGR 4.22±0.9 γραμμάρια/ημέρα.

Στα πειραματόζωα της Ομάδας EG-II τα οποία ενοφθαλμίστηκαν με ακτινοβολημένα κύτταρα LMS η επαγωγή των όγκων ήταν 100%. Οι όγκοι ήταν ψηλαφητοί τη 14^η μετά τον ενοφθαλμισμό των κυττάρων και η μέση τιμή των διαστάσεων τους υπολογίστηκα στα 12.5x13.7 mm. Ο MST ήταν 46.4±25.27 ημέρες, το MTW 89.8±36.8 γραμμάρια ενώ ο MTGR 2.17±0.73 γραμμάρια/ημέρα. Εφτά από τα 10 ζώα της Ομάδας Ελέγχου (70%) παρουσίασαν μεταστάσεις στον πνεύμονα σε αντίθεση με τα 4 από τα 10 πειραματόζωα (40%) της Ομάδας EG-II ($p<0.05$) (Πίνακας 2). Όλοι οι όγκοι αναγνωρίστηκαν ιστολογικά ως λειομυοσαρκώματα.



Εικόνα 10. Κύτταρα λειομυοσαρκώματος τα οποία απομονώθηκαν από καρκινοπαθείς επίμυες Wistar

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά των όγκων στις ομάδες CG και EGII

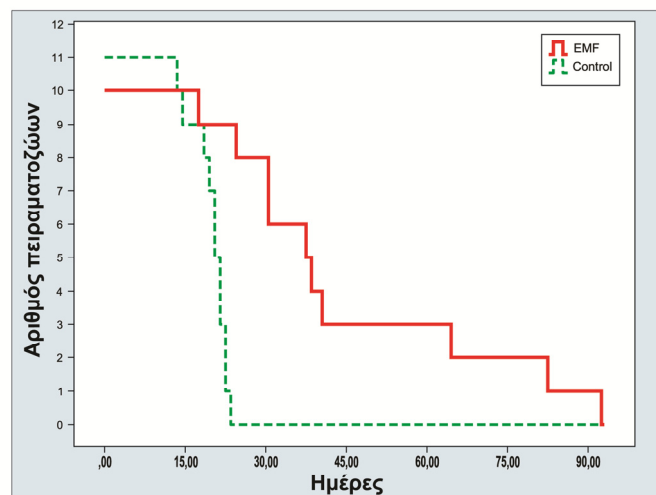
	CG	EG II
MST (ημέρες)	20.36±3.23*	46.4±25.27*
MTW (g)	86.7±27.6	89.8±36.8
MTGR (g/ημέρα)	4.22±0.9**	2.17±0.73**
Μετάσταση (Πνεύμονες)	8/11 (72.3%)	4/10 (40%)*

* p < 0.05, ** p < 0.001 και *** p < 0.09

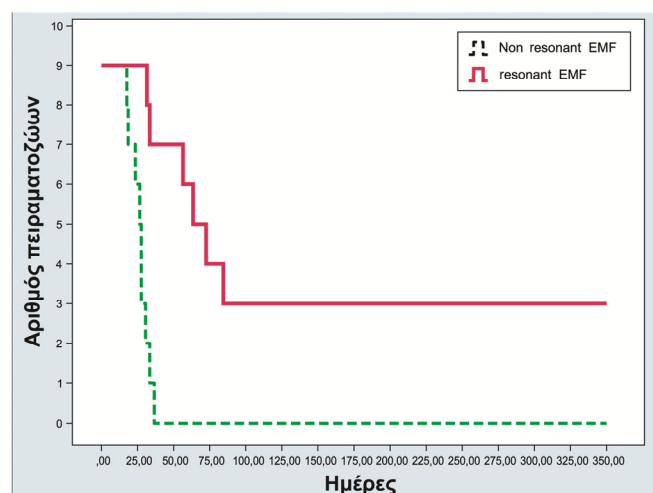
Επίσης ως την 30^η ημέρα όλα τα πειραματόζωα της Ομάδας Ελέγχου είχαν πεθάνει (το πρώτο πέθανε τη 15^η ημέρα και το τελευταίο την 24^η), ενώ 8 από τα 10 πειραματόζωα της Ομάδας EG-II ήταν ζωντανά και σε καλή κατάσταση, ενώ το τελευταίο πέθανε την 93^η ημέρα από τον ενοφθαλμισμό των κυττάρων (Γράφημα 9).

Η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων αποκάλυψε μια στατιστικά σημαντική διαφορά του MST και MTGR μεταξύ της Ομάδας Ελέγχου και της EG-II καθώς επίσης και στον αριθμό των πειραματόζωων με μετάσταση στους πνεύμονες ενώ ο MTW δε διέφερε σημαντικά μεταξύ των δύο Ομάδων (Πίνακας 2). Τα πειραματόζωα της Ομάδας EG-II έζησαν σημαντικά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (σχεδόν το διπλάσιο από ότι τα πειραματόζωα της Ομάδας Ελέγχου), ανέπτυξαν όγκους σε πολύ πιο βραδύ TGR και παρουσίασαν μεταστάσεις στο πνεύμονα σε σημαντικά μικρότερο αριθμό σε σχέση με την Ομάδα Ελέγχου.

Όλα τα πειραματόζωα της Ομάδας ECG τα οποία ενοφθαλμίστηκαν με μη ακτινοβολημένα κύτταρα LMS και εκτέθηκαν σε συχνότητες μη-συντονισμού, χαμηλής έντασης ΗΜΓνητικά πεδία, αμέσως μετά τον ενοφθαλμισμό τους ανέπτυξαν όγκους (λειομυοσάρκωμα) στο σημείο του ενοφθαλμισμού την 14^η ημέρα, οι οποίοι είχαν διαστάσεις κατά μέσο όρο 21.9x23.2 mm. Ο MST της Ομάδας ECG ήταν 27.28±7.29 ημέρες, το MTW 90.3±11.24 γραμμάρια και ο MTGR ήταν 3.42±0.68 γραμμάρια/ημέρα. Έξι από τα 9 πειραματόζωα εμφάνισαν μετάσταση στο πνεύμονα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματά μας δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ της Ομάδας ECG και της Ομάδας Ελέγχου. Η έκθεση επομένως των πειραματόζωων σε συχνότητες μη-συντονισμού, χαμηλής έντασης ΗΜΓνητικά πεδία δεν επηρεάζει την ογκογένεση και το καρκινογόνο δυναμικό των ενοφθαλμισμένων κυττάρων LMS καθώς και την πορεία της κακοήθειας.



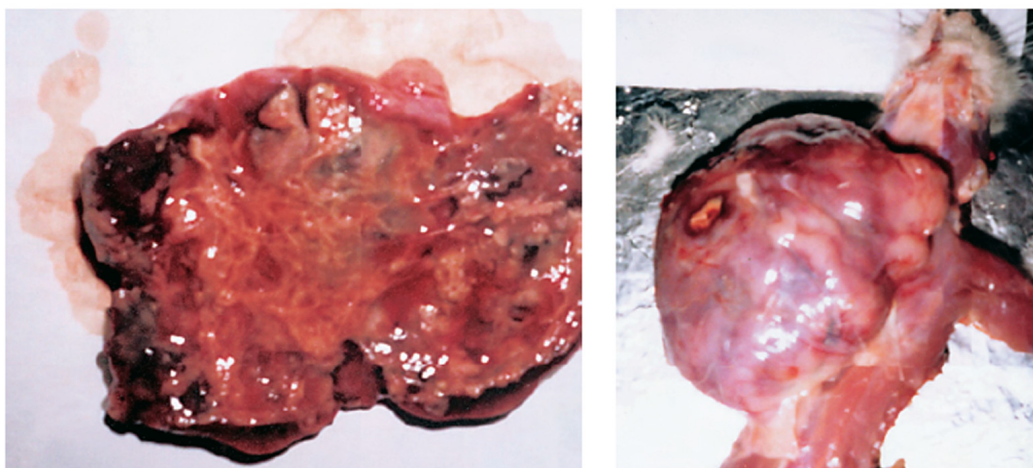
Γράφημα 9 Καμπύλη επιβίωση πειραματόζων των ομάδων CG και EGII



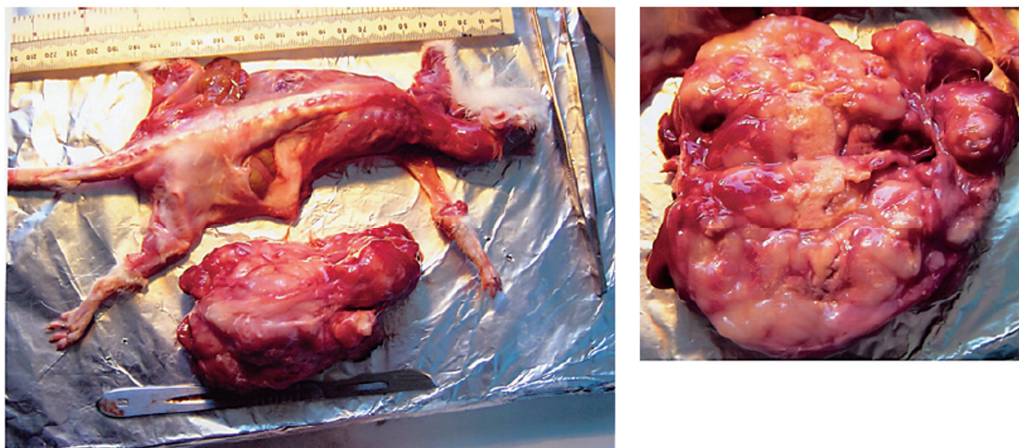
Γράφημα 10 Καμπύλη επιβίωση πειραματόζων των ομάδων EG-I και ECG

Όλα τα ζώα της Ομάδας EG-I εμφάνισαν όγκους τη 14^η ημέρα οι οποίοι είχαν διαστάσεις κατά μέσο όρο 26.6x24.4 mm. Στην Ομάδα αυτή, η έκθεση των πειραματόζων στις συχνότητες συντονισμού οδήγησε στην πλήρη υποχώρηση των όγκων σε 3 από τα 9 πειραματόζωα (33.3%) μετά από διάστημα 40 ημερών και 200 ώρες συνολικής ακτινοβολίας (Γράφημα 10). Τα 3 αυτά πειραματόζωα ακτινοβολήθηκαν για 20 ακόμα ημέρες με τις ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού (συνολικά 60 ημέρες και 300 ώρες συνολικής ακτινοβολίας) οι όγκοι υποχώρησαν πλήρως και έζησαν όσο ζούνε και οι

φυσιολογικοί υγιείς επίμυες Wistar (850 ± 50 ημέρες). Από τα υπόλοιπα 6 πειραματόζωα της Ομάδας EG-I το πρώτο πέθανε την 32^η ημέρα και το τελευταίο την 85^η (Figure 4). Ο MST των πειραματόζωων αυτών ήταν 57.5 ± 21.17 ημέρες, το MTW 85.5 ± 23.9 γραμμάρια και ο MTGR 1.74 ± 1.12 γραμμάρια/ημέρα. Στα 6 αυτά πειραματόζωα δεν παρατηρήθηκε μετάσταση στους πνεύμονες. Οι όγκοι αυτοί αναγνωρίστηκαν ιστολογικά ως λειομυοσαρκώματα. Το εσωτερικό των όγκων υγροποιήθηκε και αναρροφήθηκε με τη βοήθεια μιας αποστειρωμένης σύριγγας. Η έγχυση νεκρωτικού υλικού (>3 ml) στο πειραματόζωο οδηγεί σε θάνατο λόγω διάχυτης ενδοαγγειακής πήξης, σύμφωνα με τα αποτελέσματα της νεκροψίας (Εικόνα 11). Η οπτική παρατήρηση των όγκων αποκάλυψε ότι οι νεκρωτικές περιοχές της Ομάδας Ελέγχου είχαν μειωθεί σημαντικά (Εικόνα 12) σε σχέση με τους όγκους της Ομάδας EG-I (Εικόνα 11). Η στατιστική ανάλυση για τις Ομάδες Ελέγχου και EG-I έδειξε: $p < 0.01$ για το MST, $p < 0.0007$ για τον MTGR και $p < 0.001$ για μετάσταση στους πνεύμονες (Πίνακας 3). Η στατιστική ανάλυση για τις Ομάδες Ελέγχου και EG-II έδειξε: $p < 0.001$ για το MST, $p < 0.005$ για τον MTGR και $p < 0.09$ για μετάσταση στους πνεύμονες (Table 2). Μεταξύ των Ομάδων EG-I και EG-II δεν παρατηρήθηκε στατιστικά σημαντική διαφορά για τον MTGR ($p < 0.41$), οριακή στατιστική διαφορά για τον MST ($p < 0.05$) και για τη μετάσταση στους πνεύμονες ($p < 0.05$).



Εικόνα 11. Ομάδα θεραπείας. Χαρακτηριστικές περιοχές νέκρωσης του όγκου μετά από έκθεση σε ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού (EG-I). Ο όγκος υγροποιήθηκε στο εσωτερικό του και η απελευθέρωση του νεκρωτικού υλικού στη κυκλοφορία του αίματος προκάλεσε το θάνατο του πειραματόζωου λόγω της διάχυτης ενδοαγγειακής πήξης.



Εικόνα 12 Ομάδα Ελέγχου. Κακοήθης όγκος που ταυτοποιήθηκε ως λειομυοσάρκωμα. Ο όγκος αναπτύχθηκε μετά τον ενοφθαλμισμό 4×10^6 κυττάρων, μη εκτεθειμένων στις ΗΜΓνητικές συχνότητες. Οι νεκρωτικές περιοχές του όγκου ήταν σημαντικά πιο περιορισμένες σε σχέση με τον όγκο που αναπτύχθηκε στα πειραματόζωα της Ομάδας EG-I.

Πίνακας 3 Χαρακτηριστικά των όγκων στις ομάδες CG και EG I

	CG	EG I
MST (ημέρες)	20.36±3.23*	160*
MTW (g)	86.7±27.6	85.5±23.98
MTGR (g/ημέρα)	4.22±0.9**	1.22±1.07**
Μετάσταση (Πνεύμονες)	8/11 (72.3%)	0/6 (0%)*

* $p < 0.01$, ** $p < 0.0007$ και *** $p < 0.003$

5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης όσον αφορά στις δράσεις των ΗΜΠ στα λειομυοσαρκωματικά κύτταρα (LMS) δείχνουν ότι η έκθεση των LMS κυττάρων σε οργανωμένα ΗΜΠ σύμφωνα με τις αρχές του βιοσυντονισμού οδηγεί σε αναστολή της κυτταρικής αύξησης και σε ενίσχυση της κυτταρικής απόπτωσης των κακοήθων κυττάρων σε συχνότητες μεταξύ των 10 KHz και των 120 KHz. Τα αποτελέσματά μας ενισχύουν τα ευρήματα άλλων ερευνών που αναφέρουν αναστολή του πολλαπλασιασμού και σημαντικές μορφολογικές αλλαγές σε κύτταρα ανθρώπινου μελανώματος που εκτέθηκαν σε ηλεκτρομαγνητικά κύματα 50-80 GHz (33) και αποπτωτικές επιδράσεις σε έκθεση σε στατικά ΗΜΠ 1.95 GHz ανθρώπινων επιδερμικών καρκινικών κυττάρων (34).

Το μεγάλο ποσοστό της απόπτωσης των κυττάρων LMS που εκτέθηκαν στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία (45%) σε σύγκριση με αυτό που βρέθηκε σε μη εκτεθειμένα σε ΗΜΠ LMS κύτταρα (2%) θα πρέπει να αποδοθεί στις επιδράσεις των ΗΜΠ στις κυτταρικές μεμβράνες που οδηγούν στην ενεργοποίηση των οδών μεταγωγής σήματος προκαλώντας έκφραση των γονιδίων και απόπτωση ή αδρανοποίηση των αντιαποπτωτικών γονιδίων (34,35,36,37). Το μικρό ποσοστό των κυττάρων LMS που βρέθηκαν στις φάσεις της σύνθεσης αι της μίτωσης του κυτταρικού κύκλου (9% και 2% αντιστοίχως σε σύγκριση με τα μη εκτεθειμένα LMS κύτταρα της ομάδας ελέγχου -38% και 19% αντίστοιχα) υποδεικνύει ότι οι χρησιμοποιηθείσες ραδιοσυχνότητες μπορεί να δράσουν ως αναστολείς των κυτταρικών φάσεων ανάπτυξης παρόμοια με τη δράση μαγνητικών πεδίων στην σύνθεση του DNA (38, 39, 37).

Υπάρχουν επίσης ενδείξεις ότι η έκθεση των κυττάρων σε ΗΜΠ μπορεί να μειώσει την έκφραση του ανοσοδραστικού p53 σε μύες με κακοήθεις όγκους (40) το οποίο έχει βρεθεί αυξημένο σε LMS όγκους επίμυων που προκλήθηκαν με έγχυση βενζοπυρενίου (31).

Στο πειραματικό μας μοντέλο, παρατηρήθηκε επίσης ότι η έκθεση για τέταρτη φορά των κυττάρων LMS σε ΗΜΠ οδήγησε σε σημαντική μείωση της ευαισθησίας των LMS στα πεδία, σε σύγκριση με τα LMS που εκτέθηκαν μία μόνο φορά. Το παραπάνω είναι μια ένδειξη ότι τα κακοήθη LMS κύτταρα πιθανόν να αναπτύσσουν κάποιου τύπου αντίσταση στη δράση των ΗΜΠ.

Όσον αφορά στη δράση των ΗΜΠ σε επίμυες Wistar με λειομυοσαρκωματικούς όγκους που ανέπτυξαν μετά τον ενοφθαλμισμό τους με κύτταρα LMS έδειξαν:

Παράταση του χρόνου επιβίωσης των επίμυων με κακοήθεις όγκους και μείωση της ταχύτητας των όγκων καθώς και σημαντική μείωση των μεταστάσεων, σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου η οποία δεν υπεβλήθη σε ακτινοβολία με ΗΜΠ. Επίσης οι επίμυες Wistar που υπέστησαν ακτινοβολία με συχνότητες συντονισμού ΗΜΓνητικών κυμάτων πριν από τον ενοφθαλμισμό τους με LMS κύτταρα, εμφάνισαν στατιστικά σημαντική αύξηση του χρόνου επιβίωσης, μείωση του ρυθμού αύξησης των όγκων και στατιστικά σημαντική μείωση των πνευμονικών μεταστάσεων σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου (ζώα με όγκους που δεν εκτέθηκαν σε ΗΜΓνητική ακτινοβολία).

Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε συμφωνία με το γεγονός ότι 3 από τα 9 (33%) πειραματόζωα με τους όγκους της ομάδας που ακτινοβολήθηκε με ΗΜΓνητική ακτινοβολία παρουσίασαν πλήρη ύφεση. Τυχαία ΗΜΓνητικά πεδία (μη συντονισμού) δεν εμφάνισαν καμία διαφορά σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου. Το παραπάνω δείχνει ότι πιθανώς υπάρχει ένα εξειδικευμένο αποτέλεσμα της δράσης των συντονισμένων ΗΜΓνητικών πεδίων, σε σύγκριση με τα τυχαία ΗΜΓνητικά πεδία.

Τα αποτελέσματα μας επίσης υποδεικνύουν ότι λειομυοσαρκωματικά κύτταρα που εκτείνονται σε συντονισμένα ΗΜΓνητικά πεδία δεν προκαλούν την ανάπτυξη κακοήθων όγκων όταν εμφυτεύονται σε επίμυες Wistar.

Τα αντικαρκινικά αποτελέσματα των συντονισμένων ΗΜΓνητικών συχνοτήτων σε επίμυες με κακοήθεις όγκους πιθανώς οφείλονται στις συστηματικές δράσεις των RF-EMF κυμάτων που αφορούν την αυξημένη διακίνηση ασβεστίου, τις επιδράσεις στις κυτταρικές πρωτεϊνικές δομές και τη λειτουργία τους, στην δράση των EMF στα γονίδια των καρκινικών κυττάρων. Έχει επίσηςδειχθεί ότι τα καρκινικά κύτταρα έχουν στατιστικά μικρότερο δυναμικό ηρεμίας, σε σύγκριση με τα φυσιολογικά κύτταρα (41,9). Το χαμηλό δυναμικό ηρεμίας σχετίζεται με την αυξημένη κυτταρική ανάπτυξη, με αλλαγές στη δομή της κυτταρικής μεμβράνης και την κακοήθεια (9,10).

Αυτές οι μεταβολές της κυτταρικής μεμβράνης και του δυναμικού ηρεμίας των κακοήθων κυττάρων στους όγκους των επίμυων μπορεί να μεταβάλουν τη φυσιολογική δράση των μακροφάγων, προκαλώντας ανοσολογική κατάρρευση σε κοντινές αποστάσεις από τους όγκους (9). Τα στατικά ή παλμικά ΗΜΓνητικά κύματα μπορεί να οδηγήσουν σε αποκατάσταση του δυναμικού ηρεμίας των κακοήθων κυττάρων, ρυθμίζοντας τη διαβατότητα των καναλιών ελέγχου και επηρεάζοντας την ιοντική δίοδο και έξοδο στα

κακοήθη κύτταρα (42). Επιπρόσθετα έχειδειχθεί ότι η αύξηση του δυναμικού ηρεμίας σε κακοήθη ηπατοκύτταρα οδηγεί σε αναστολή του κυτταρικού τους πολλαπλασιασμού (43).

Όπως φαίνεται από την παρούσα μελέτη η έκθεση LMS κυττάρων σε ΗΜΓνητικά πεδία συντονισμού οδηγεί σημαντική (ως 95%) μείωση του ρυθμού πολλαπλασιασμού τους, προκαλούν στασιμότητα του κυτταρικού τους κύκλου και κυτταρική απόπτωση στο 45% των κυττάρων. Σχετικές αποπτωτικές δράσεις ΗΜΓνητικών κυμάτων έχουν επίσης διαπιστωθεί και από άλλους ερευνητές (44, 45,46). Η παραπάνω δράση των ΗΜΓνητικών κυμάτων συντονισμού πιθανώς ερμηνεύουν και την στατιστικά σημαντική μείωση της ταχύτητας αύξησης των όγκων σε ζώα με όγκους λειομυοσαρκώματος που καταγράφηκαν στην μελέτη μας.

Παράλληλα υπάρχουν ενδείξεις ότι ραδιοφωνικές συχνότητες συντονισμού ουσιών με βιολογική δράση μπορεί να προκαλέσουν τα ίδια αποτελέσματα σε βιολογικούς στόχους ή κύτταρα όταν εκπέμπονται ηλεκτρονικά με στόχο τα κύτταρα ή τα ζώα (47, 8). Οι Tomas et al. έδειξαν ότι τα κύματα συντονισμού που προερχόταν από τη μυριστική-φορμόλη και εκπέφθηκαν ηλεκτρονικά προκάλεσαν τα ίδια αποτελέσματα σε ανθρώπινα ουδετερόφιλα όπως και η ίδια η ουσία (47). Έρευνες του Εργαστηρίου Φυσιολογίας έχουν επίσης δείξει ότι η εκπομπή φασμάτων συντονισμού που προέρχονται από το NMR χημειοθεραπευτικών ουσιών όταν εκπέμπονται σε κακοήθη κύτταρα και ζώα με κακοήθεις όγκους που προερχόταν από ενοφθαλμισμό σε επίμυες Wistar των κακοήθων ν αυτών κυττάρων (όγκοι λειομυοσαρκώματος) επέφεραν τα ίδια θεραπευτικά αποτελέσματα, όπως αυτά των αντίστοιχων χημειοθεραπευτικών ουσιών. Παράλληλα η εκπομπή τυχαίων φασμάτων συχνοτήτων, της ίδιας ενέργειας με αυτής των φασμάτων των χημειοθεραπευτικών δεν προκάλεσαν κανένα αποτέλεσμα (48) και (49).

Ανάλογα αποτελέσματα έδειξε και η εκπομπή συχνοτήτων συντονισμού που λήφθηκαν από το φάσμα πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού (NMR) της μορφίνης προκάλεσε στα πειραματόζωα παρόμοιο αναλγητικό αποτέλεσμα με αυτό της χορήγησης της μορφίνης καθώς και σοβαρές ενδείξεις ότι το ηλεκτρονικό φάσμα συντονισμού της ουσίας λειτουργεί μέσω των υποδοχέων της μορφίνης (50).

Τα σημαντικά θεραπευτικά αποτελέσματα που είχαμε στα κακοήθη κύτταρα LMS και τους όγκους ενοφθαλμισμού τους σε επίμυες Wistar στην παρούσα εργασία μπορούν επίσης να αποδοθούν στο ότι τα ΗΜΓνητικά κύματα μπορεί να ενισχύσουν το spin των ηλεκτρονίων των ελεύθερων ριζών και να τις οδηγήσουν σε αδρανοποίηση, κυρίως αυτών που παράγονται κατά την ενεργοποίηση του αραχιδονικού καταρράκτη (9,47,42). Έτσι

είναι πιθανό συντονισμένα ΗΜΓνητικά πεδία να δρουν όπως οι αντιοξειδωτικές ουσίες αδρανοποιώντας το οξειδωτικό στρες που συμμετέχει στη διαδικασία και την εξέλιξη της καρκινογένεσης.

Τις τελευταίες τρεις δεκαετίες ένας μεγάλος αριθμός μελετών ασχολείται με τις επιδράσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στα βιολογικά συστήματα (51). Τα ΗΜΓνητικά πεδία έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολύ σημαντικές τεχνολογικές εφαρμογές που αφορούν τη διάγνωση (π.χ. MRI, ακτίνες-X, αξονική τομογραφία). Ένα μέρος των ερευνητών έχει πλέον στρέψει το ενδιαφέρον του στην χρήση των ΗΜΓ πεδίων για τη θεραπεία διαφόρων παθήσεων όπως η οστεοπόρωση, τα κατάγματα οστών, την αναγέννηση των μυών, του διαβήτη, τις αρθρίτιδες και τις νευρολογικές διαταραχές (52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59). Τα τελευταία χρόνια τα ΗΜΓ πεδία άρχισαν να χρησιμοποιούνται στην έρευνα μιας σημαντικής νόσου, της κακοήθειας. Κατά το διάστημα αυτό διενεργήθηκε ένα πλήθος μελετών των επιδράσεων των ΗΜΓνητικών πεδίων *in vitro* σε κακοήγη κύτταρα όπως τα κύτταρα HeLa (60, 61), σε κύτταρα αδενοκαρκινώματος του κόλου του ανθρώπου (62, 63), σε κακοήθεις σειρές HTB77IP3 (μελάνωμα), HTB77IP3 (καρκίνος ωοθηκών) και σε CCL86 (λέμφωμα) (64). Μελέτες έγιναν επίσης σε σειρές Widr (αδενοκαρκινώματος ανθρώπινου παχέος εντέρου) και MCF-7 (ανθρώπινο καρκίνωμα μαστού), σε σειρές ML-1 (ανθρώπινης μυελοβλαστικής λευχαιμίας), SCL II (ανθρώπινου πλακώδους καρκίνου) (44, 45) καθώς και πολλά άλλα (65). Στις μελέτες διερευνήθηκε η επίδραση ΗΜΓνητικών κυμάτων διάφορων συχνοτήτων (από ELF έως HF) εντάσεων του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, συνεχών και παλμικών κυμάτων στο ρυθμό πολλαπλασιασμού και την απόπτωση κακοήθων κυττάρων με αξιόλογα ερευνητικά αποτελέσματα.

Η έκθεση καρκινικών κυττάρων μαστού MCF7 και μη-καρκινικών MCF10 σε παλμικά ΗΜΓνητικά κύματα διαφορετικών συχνοτήτων (από 20 ως 50 Hz), εντάσεων (από 1mT ως 5mT) και διάρκειας έκθεσης από 30 ως 90 λεπτά ημερησίως ως τρεις διαδοχικές ημέρες έδειξε ότι υπάρχει ένα στενό παράθυρο δράσης των παλμικών ΗΜΓνητικών κυμάτων που σκοτώνει τα κακοήγη MCF7 αλλά δεν επηρεάζει τα MCF10 κύτταρα που είναι: Συχνότητες 20 Hz, έντασης 3 mT και χρόνο έκθεσης 60 λεπτών την ημέρα (66). Η έκθεση κακοήθων κυττάρων B16-BL6, MDA-MB-231, MCF7 και HeLa σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία ρυθμιζόμενης συχνότητας (25-6 Hz) και χαμηλής έντασης για 1 ώρα ημερησίως προκάλεσε σημαντική μείωση της κυτταρικής ανάπτυξης, χωρίς να επιδράσει σε μη-κακοήγη κύτταρα. Η δράση αυτή των EMF στα κακοήγη κύτταρα έδειξε μείωση του

κυτταρικού ρυθμού ανάπτυξης με μεταβολές της έκφρασης της κυκλίνης σε ομοφωνία με τη μείωση του κυτταρικού πολλαπλασιασμού. Η χορήγηση στα κύτταρα αναστολέα των διαύλων Ca^{2+} ανέστειλε τη δράση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (67). Η έκθεση κυττάρων μελανώματος ποντικού σε χαμηλής έντασης και συχνότητας ΗΜΓνητικής ακτινοβολίας με μεταβαλλόμενη συχνότητα (από 25 Hz έως 6 Hz) και διάρκεια 3 ms κύματος, για 15 λεπτά ως 1 ώρα έδειξε ότι καλύτερα αποτελέσματα στην μείωση της κυτταρικής ανάπτυξης επιτυγχάνονται με την έκθεση σε ΗΜΓνητικά πεδία διάρκειας 3 ms και χρόνου έκθεσης 1 ώρα ημερησίως (68).

Κακοήθη κύτταρα πολλαπλού γλοιοβλαστώματος U87 εκτέθηκαν σε 5 μοντέλα παλμικών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων με συχνότητες 10, 50 και 100 Hz και εντάσεις 50 και 100 G. Διαπιστώθηκε σημαντική μείωση ή μη μεταβολή του κυτταρικού πολλαπλασιασμού σε διάφορα από τα μοντέλα έκθεσης οφειλόμενη σε μεταβολές της έκφρασης της κυκλίνης-D1, του p53 και της κασπάσης. Η έρευνα έδειξε ότι μερικά από τα παλμικά πεδία με χαμηλή ένταση και συχνότητα είναι κατάλληλα για την αντιμετώπιση κακοήθων όγκων (69). Η έκθεση τρισδιάστατων μοντέλων κακοήθων κυττάρων πνεύμονος, κεφαλής και τραχήλου, παγκρέατος και παχέος εντέρου σε χαμηλές δόσεις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μείωσε σημαντικά τον κυτταρικό πολλαπλασιασμό των κυττάρων μεταβάλλοντας την ποσότητα των τελικών προϊόντων της γλυκόλυσης, αυξάνοντας τις θραύσεις του DNA και την ποσότητα των δραστικών μορφών οξυγόνου (ROS) (70).

Ταυτόχρονα διεξήχθησαν πολλές *in vivo* μελέτες σε πειραματόζωα με κακοήθεις όγκους όπως σε Syrian Golden χάμστερ με A-Mel-3 μελανώματα (71,72), σε γυμνά ποντίκια με υποδόριο αδενοκαρκίνωμα (73), αρσενικούς Fisher-344 αρουραίους με ανθεκτικό ηπατοκυτταρικό καρκίνωμα (74), σε BALB ποντίκι με καρκίνο τραχήλου μήτρας (75), σε ποντίκια Kunming με όγκους καρκίνου μαστού τρωκτικών (76,77,78). Στις πειραματικές αυτές μελέτες διερευνήθηκαν οι συχνότητες και οι εντάσεις ΗΜΓνητικών κυμάτων σταθερών ή παλμικών και η επίδραση τους στη μείωση του μεγέθους των όγκων, στην απόπτωση, στην παράταση του χρόνου επιβίωσης πειραματόζωων και την εξαφάνιση του όγκου με θετικά αποτελέσματα. Τα θετικά αυτά πειραματικά αποτελέσματα οδήγησαν στη διενέργεια κλινικών δοκιμών των ΗΜΓνητικών πεδίων σε καρκινοπαθείς ασθενείς.

Ποντίκια με όγκους BALB, εκτέθηκαν σε μαγνητικά πεδία (15mT και 50Hz) μετά την εφαρμογή κατά την πρώτη ημέρα του πειράματος σε ηλεκτρικές ώσεις (70 V/cm) και

χορήγηση bleomycin, με αποτέλεσμα σημαντική μείωση του όγκου χωρίς επιδράσεις στην απόδοση της ηλεκτροχημειοθεραπείας (79). Σημαντική βελτίωση επιτεύχθηκε σε ποντίκια με όγκους μαστού (Murine 16C) όσον αφορά τη σημαντική μείωση της αγγείωσης και την έκταση της νέκρωσης των κυττάρων του όγκου, με την έκθεση τους σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έντασης 20 mT και συχνότητας 120 Hz για 10 και 20 λεπτά δύο φορές την ημέρα (80). Τέλος, σημαντική αναστολή της αγγειογένεσης επιτεύχθηκε σε όγκους ποντικίου που προκλήθηκαν με ενοφθάλμιση ενδοθηλιακών κυττάρων HUVEK όταν εκτέθηκαν σε μαγνητική ακτινοβολία χαμηλής έντασης 2 mT και συχνότητας 50 Hz μέσω της μείωσης του αγγειακού ενδοθηλιακού αυξητικού παράγοντα (VEGF) (81).

Το 2003 έγινε μια Φάση I κλινική μελέτη χρησιμοποιώντας ένα συνδυασμό στατικών μαγνητικών πεδίων και χημειοθεραπείας σε ασθενείς με προχωρημένη κακοήθεια (λέμφωμα μη-Hodgkin, και καρκίνο του κόλου και του ορθού) από τα αποτελέσματα της οποίας σχεδιάστηκε και έγινε μελέτη Φάσης II και Φάσης III. Στις μελέτες αυτές διαπιστώθηκε η αντineοπλαστική δράση των ΗΜΓνητικών κυμάτων μόνο ή σε συνδυασμό με χημειοθεραπευτικά (82).

Σε μια άλλη μελέτη έγινε εφαρμογή ενός συνδυασμού εξειδικευμένων συχνοτήτων των όγκων (συνολικά 1524 συχνότητες) σε 163 καρκινοπαθείς διάρκειας έκθεσης 4 μηνών ανά ασθενή, με ικανοποιητικά θεραπευτικά αποτελέσματα σε καρκινοπαθείς τελικού σταδίου (83). Έντεκα ασθενείς με καρκίνο IV σταδίου (αδενοκαρκινώματα, καρκίνο εκ πλακωδών κυττάρων, καρκίνο χοληδόχου πόρου κ.α.) εντάχθηκαν σε μια πιλοτική μελέτη και εκτέθηκαν σε δύο διαφορετικά στατικά ΗΜΓνητικά πεδία για 5 ημέρες την εβδομάδα επί 4 εβδομάδες. Οι ασθενείς εμφάνισαν σημαντική βελτίωση της νόσου με καλή ανοχή και ασφάλεια στην έκθεση στις ακτινοβολίες (84). Οι Kirson et al. πραγματοποίησαν μια πιλοτική μελέτη σε 10 ασθενείς με υποτροπιάζον γλοιοβλάστωμα, που εκτέθηκαν σε ενδιάμεσες συχνότητες (100-300 Hz) εναλλασσόμενων ηλεκτρικών πεδίων με σημαντικά επωφελή εξέλιξη ώστε να συμπεράνουν ότι αυτός ο τύπος κυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια και αποτελεσματικότητα για την θεραπεία καρκινοπαθών ασθενών (85). Αξιόλογα θεραπευτικά αποτελέσματα έδειξε επίσης μια μελέτη σε 6 ασθενείς με μεταστατικό συμπαγή καρκίνο τελικού σταδίου που εκτέθηκαν σε ΗΜΓνητικά κύματα από 100-200 KHz και ένταση πεδίου 0.7 V/cm (86).

Οι Evangleou et al. πραγματοποίησαν επίσης κλινική μελέτη σε 30 ασθενείς με καρκίνους τελικού σταδίου εκθέτοντας τους σε ΗΜΓνητικά πεδία συντονισμού από 10 KHz – 1 MHz και έντασης 0.1 V/cm επί 5 ημέρες την εβδομάδα για 6 ώρες ανά συνεδρία

για 4 εβδομάδες και κατέγραψαν σημαντική αύξηση του αριθμού και της τοξικότητας εναντίον κακοήθων κυττάρων, των φυσικών φονέων (NK) των ασθενών, με βελτίωση των δεικτών υγείας των ασθενών, χωρίς παρενέργειες (87).

Εδώ είναι απαραίτητο να τονισθεί η ειδική απορρόφηση ραδιοφωνικών ΗΜγνητικών σημάτων από τα έμβια ζώα είναι σημαντική υψηλότερη όσον αφορά συχνότητες συντονισμού (10). Επίσης να σημειωθεί ότι οι εκπεμπόμενες από τη συσκευή μας συχνότητες κυμαίνονται μεταξύ των 10 KHz ως τα 120 KHz. Αυτό το φασματικό πεδίο είναι αρκετά χαμηλότερο από τα ανώτατα όρια ακινδυνότητας της ελληνικής νομοθεσίας όπως επίσης και η ένταση εκπομπής των πεδίων, με αποτέλεσμα η εκπομπή τέτοιων φασμάτων συχνοτήτων να θεωρείται ακίνδυνη για τα ζώα και τους ανθρώπους.

Συμπερασματικά η μελέτη αυτή δείχνει ότι η έκθεση λειομυοσαρκοματικών κυττάρων (LMS) και ζώων που προέρχονται από ενοφθαλμισμούς των ίδιων των κυττάρων σε συντονισμένα πεδία ηλεκτρομαγνητικών συχνοτήτων μπορεί να έχει σημαντικά αντικαρκινικά αποτελέσματα.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι η ένταση των χρησιμοποιηθέντων ηλεκτρικών πεδίων είναι 75 φορές χαμηλότερη και η ένταση του μαγνητικού πεδίου 1800 φορές χαμηλότερη από τις επιτρεπόμενες διεθνής σταθερές ασφαλείας σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων που χορηγήθηκαν από το Εθνικό Κέντρο Φυσικών Επιστημών της Ελλάδος «Δημόκριτος» (88) και θέτουν πιθανώς τις βάσεις για τη χρήση τους σε ανθρώπους πάσχοντες από κακοήθειες.

Γενικότερα το πεδίο των βιολογικών δράσεων των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων αποδεικνύεται ότι είναι πάρα πολύ ευρύ καθώς ο άνθρωπος κάνει όλο και μεγαλύτερη χρήση των σχετικών τεχνολογιών στις καθημερινές τους εφαρμογές. Ο Γιόχαν Κάρλ Φρίντριχ Γκάους – στον οποίο οφείλεται και ο ομώνυμος νόμος – έζησε μεταξύ του 1777 και του 1855, δηλαδή σε μια εποχή που οι εφαρμογές τόσο των μαγνητών όσο και του ηλεκτρικού ρεύματος ήσαν πολύ περιορισμένες και ουσιαστικά γνωστές μόνο σε έναν μικρό κύκλο φυσικών επιστημόνων και φυσιοδιφών που δεν αριθμούσαν περισσότερο από μερικές χιλιάδες ανθρώπους παγκοσμίως. Στην σημερινή εποχή η διάχυση του ηλεκτρομαγνητισμού είναι τόσο ευρεία και γενικευμένη που αφορά το σύνολο των ανθρώπινων κοινωνιών, εξαιρουμένων μερικών πρωτόγονων φυλών της Γουινέας της Αυστραλίας και της Λατινικής Αμερικής. Στην κυριολεξία δεν υπάρχει ανθρώπινο όν που να μην έχει δεχθεί ή να μην δέχεται σε καθημερινή βάση ή και σταθερά τις δράσεις των ηλεκτρομαγνητικών τεχνολογιών, ξεκινώντας από το ηλεκτρικό φως των λαμπτήρων

πυρακτώσεως ή των λαμπτήρων ευγενούς αερίου (Νέον) μέχρι τις δράσεις τεχνολογιών όπως οι φούρνοι μικροκυμάτων, οι οθόνες των υπολογιστών, οι έξοδοι των κινητών τηλεφώνων, οι γραμμές ασύρματης σύνδεσης Wi-Fi, οι κεραίες των ασύρματων τηλεπικοινωνιών, οι συσκευές αλλαγής καναλιών στην οικιακή τηλεόραση, και φυσικά όλες οι συσκευές οικιακής χρήσης που αποτελούν στοιχεία της καθημερινότητάς μας, όπως οι ηλεκτρικοί φούρνοι, τα ηλεκτρικά ψυγεία, οι ηλεκτρικές σκούπες, μέχρι ακόμη και τις ηλεκτρικές οδοντόβουρτσες κ.ο.κ. Δεν πρέπει να ξεχάσουμε την ισχυρότατη δράση των σύγχρονων χειρουργικών τεχνολογιών, όπως τα νυστέρια διαθερμίας, αλλά και τεχνολογιών μικρομετρικής ρομποτικής επέμβασης όπως π.χ το Cyber Knife, τα οποία έχουν τόσο σημειακή ακρίβεια εφαρμογής που αναγκαστικά βαίνουν χειριζόμενα από ψηφιακούς πλέον μικρομετρικούς μηχανισμούς μετακίνησης οδηγούμενες από ηλεκτρονικό υπολογιστή, υπό την εποπτεία του επιτηρούντος χειρουργού. Η αποκορύφωση όλων αυτών των τεχνολογιών ηλεκτρομαγνητικού χαρακτήρα συναντάται προφανώς στο εσωτερικό των στρατιωτικών αεροσκαφών, των πολεμικών πλοίων, των πυρηνικών υποβρυχίων, των διαστημοπλοίων με ανθρώπους ως πλήρωμα, των απομονωμένων βάσεων στις πολικές περιοχές και τέλος στο εσωτερικό του διεθνούς διαστημικού σταθμού. Κατασκευές, όπως ο διεθνής διαστημικού σταθμού, τα πυρηνικά υποβρύχια, τα διαστημόπλοια και τα σύγχρονα πολεμικά αεροσκάφη είναι συστήματα όπου το εσωτερικό περιβάλλον είναι απολύτως τεχνητό, ενώ αυτό καθαυτό στηρίζεται απόλυτα στην ηλεκτρομαγνητική τεχνολογία (89,90). Σημειώτεον ότι τα περισσότερα διαμερίσματα των εν λόγω κατασκευών είναι από μόνα τους κλωβοί Faraday και συνεπώς δεν επιτρέπουν την είσοδο ηλεκτρικών και ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο εσωτερικό τους, δημιουργώντας εν μέρει μια ηλεκτρομαγνητική αποστέρηση από τους ανθρώπους και εν γένει τους οργανισμούς που διαβιούν στο εσωτερικό τους (91,92). Επίσης σε κάθε μια από τις συσκευές το κύριο μέρος των κυκλωμάτων της είναι τοποθετημένο σε κλωβό Faraday και δεν επιτρέπει την έξοδο και την είσοδο πεδίων ώστε η λειτουργία της να μην διαταράσσει τις άλλες συσκευές. Υπό αυτή την έννοια θεωρείται ότι οι άνθρωποι που αποτελούν το προσωπικό αυτών των ειδικών κατασκευών έχουν σαφή προστασία από ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ωστόσο τις τελευταίες τρεις δεκαετίες όλο και περισσότερο δημοσιεύονται μελέτες των οποίων οι συγγραφείς αποφαινόμενοι ότι γενικά τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία τόσο τα ισχυρά όσο και τα ασθενή, αλλά και εκείνα που χαρακτηρίζονται από χαμηλές συχνότητες είναι σε θέση να αλληλεπιδράσουν τόσο με τον άνθρωπο, όσο και με εν γένει τους ζωντανούς οργανισμούς προκαλώντας τους διάφορα

προβλήματα και προδιαθέτοντας τους σε νόσους όπως π.χ η λευχαιμία, διάφορες μορφές νεοπλασμάτων εν γένει καθώς και εκφυλιστικές νόσους, όπως το Alzheimer (93,94). Ειδικότερα τα παιδιά φαίνεται ότι καθίστανται πιο ευάλωτα στην λευχαιμία (95,96).

Η πολύ μεγάλη χρήση του κινητού τηλεφώνου καθώς και οι ασύρματες εγκαταστάσεις του διαδικτύου σε κάθε σπίτι έχει προκαλέσει μια άνευ προηγουμένου έκθεση σχεδόν όλου του πληθυσμού των προηγμένων κοινωνιών, όλων των ηλικιών, στην ηλεκτρομαγνητική μη ιονίζουσα ακτινοβολία. Μήπως αυτό αποτελεί ένα είδος ρύπανσης υπό τον όρο «ηλεκτρομαγνητική ρύπανση»; Οι δικές μας μελέτες έγιναν με τις συσκευές μας κλεισμένες μέσα σε κλωβούς Faraday. Ωστόσο τα δεδομένα μας δείχνουν ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία των συγκεκριμένων συχνοτήτων που χρησιμοποιήσαμε δεν προκάλεσε βλάβες στα πειραματόζωα παρά μόνον βλάβες στους νεοπλασματικούς τους σχηματισμούς, όπως επίσης προκάλεσε θάνατο στα λειομυοσαρκωματικά κύτταρα

Η κατάσταση αυτή κατά την γνώμη μας υποδεικνύει ότι υπάρχει μέθοδος επίτευξης στοχευμένης ηλεκτρομαγνητικής κυτταροτοξικότητας στρεφόμενης μόνον στα κακοήγη κύτταρα και όχι στα φυσιολογικά. Αυτό συμβαίνει διότι οι μετρήσεις των συχνοτήτων που εκπέμπουν από την ηλεκτρική βιολογική τους δραστηριότητα τα κύτταρα του λειομυοσαρκώματος είναι διαφορετικές σε πολλά σημεία από τις συχνότητες των φυσιολογικών κυττάρων. Ωστόσο η άποψη αυτή για να στηριχτεί κατά τρόπο αντικειμενικό και επιστημονικά ακριβή πρέπει να πραγματοποιηθεί ένας πολύ μεγάλος αριθμός μετρήσεων που να αφορά τα κύτταρα όλων των ιστών του πειραματοζώου και τα κύτταρα των διαφορετικών νεοπλασμάτων που μπορούν να προκληθούν στα πειραματόζωα είτε μέσω καρκινογένεσης με ουσίες, είτε μέσω ενοφθαλμισμού κυτταρικών σειρών του εν λόγω είδους επίμυος Wistar, υπό τον όρο ότι αυτές δεν θα υποστούν απόρριψη μέσω του ανοσοποιητικού συστήματος του ζώου. Συνεπώς αν επιμείνουμε στο συγκεκριμένο πειραματικό μοντέλο αναγκαστικά πρέπει να προκαλέσουμε κακοήγη εξαλλαγή στα κύτταρα κάθε ιστού του συγκεκριμένου είδους πειραματοζώου. Εξυπακούεται ότι το μέγεθος εργασίας αυτής της προσέγγισης είναι πολύ μεγάλο και απαιτεί μια πολυπληθή ερευνητική ομάδα που θα εργάζεται συντονισμένα προς αυτή την κατεύθυνση με αφθονία πόρων τόσο σε επίπεδο εργαλειακό, όσο και σε επίπεδο οικονομικό. Ωστόσο ένα τέτοιο εγχείρημα είναι ρεαλιστικό και εφικτό και μπορεί να οδηγήσει σε πολύτιμες γνώσεις για την θεραπευτική χρήση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων και ισχύος, ικανών να αλληλεπιδράσουν τοξικά μόνον με τα νεοπλασματικά κύτταρα και όχι με τα υγιή. Προφανώς αν τα αποτελέσματα αυτής της

προσέγγισης είναι ευνοϊκά αντιλαμβάνεται κανείς ότι ανοίγει ένα μεγάλο κεφάλαιο στην θεραπευτική των κακοήθων νεοπλασματικών νόσων. Το μέλλον θα δείξει αν ο τύπος αυτής της έρευνας θα επιλεγθεί για την αντιμετώπιση αυτής της ομάδας βαρέων νοσημάτων που συνολικά εντάσσονται στον ιατρικό όρο «Καρκίνος».

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη της επίδρασης ΗΜΓνητικών πεδίων συντονισμού σε κακοήγη κύτταρα και ενοφθαλμισμένους όγκους προέκυψαν τα κάτωθι συμπεράσματα:

1. Είναι δυνατόν να καταγραφούν οι συχνότητες συντονισμού λειομυοσαρκωματικών και λείων μυικών κυττάρων με την εφαρμογή της αναδραστικής ΗΜΓνητικής μεθόδου.
2. Η έκθεση των LMS κυττάρων σε συχνότητες συντονισμού οδηγεί, μετά από επώαση 48 h, σε σημαντική μείωση του αριθμού τους (κατά 98%) μέσω κυρίως κυτταρικής απόπτωσης.
3. Τα LMS κύτταρα (2%) που επιβιώνουν της έκθεσης στα ΗΜΓνητικά κύματα συντονισμού διατηρούν την ικανότητα κυτταρικού πολλαπλασιασμού, ένδειξη ότι ένα μικρό ποσοστό των κακοήθων κυττάρων εμφανίζει κάποιου είδους «αντίσταση» ή «ανθεκτικότητα» στα ΗΜΓνητικά κύματα.
4. Τόσο τα κύτταρα LMS που εκτέθηκαν σε ΗΜΓνητική ακτινοβολία συντονισμού, όσο και τα μη εκτεθέντα, διατηρούν την ικανότητα συσσώρευσης αιμοπεταλίων, ένδειξη πιθανής διατήρησης της ικανότητας μετάστασης των εκτεθειμένων κυττάρων.
5. Η έκθεση πειραματοζώων, που ανέπτυξαν κακοήγη όγκους (λειομυοσαρκώματα) μετά από ενοφθαλμισμό LMS κυττάρων, σε ΗΜΓνητικά πεδία συντονισμού έδειξε:
 - Πλήρη υποστροφή των όγκων στο 36% των πειραματοζώων σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου
 - Στατιστικά σημαντική αύξηση του χρόνου επιβίωσης των εκτεθέντων σε ΗΜΓνητικά πεδία πειραματοζώων σε σχέση με την ομάδα ελέγχου.
 - Στατιστικά σημαντική μείωση του ρυθμού ανάπτυξης του όγκου, σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου
 - Περιορισμένο αριθμό πνευμονικών μεταστάσεων σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου.

Δεδομένα που επιβεβαιώνουν τη σημαντική αντικαρκινική δράση των ΗΜΓνητικών συχνοτήτων συντονισμού σε σαρκωματικούς όγκους πειραματοζώων.

7. ΠΕΡΙΛΗΨΕΙΣ

Περίληψη στην Ελληνική

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, μελετήθηκαν οι επιδράσεις των χαμηλής έντασης ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που δεν προκαλούν θερμικά φαινόμενα, σε κυτταρικές σειρές λειομυοσαρκώματος (LMS) που απομονώθηκαν από όγκους επίμυων Wistar καθώς και σε καρκινοπαθείς επίμυες Wistar.

Οι μετρήσεις των συχνοτήτων ηλεκτρομαγνητικού συντονισμού και η έκθεση κυττάρων και ζώων που φέρουν όγκους στις ΗΜΓνητικές συχνότητες πραγματοποιήθηκαν με μια συσκευή που ονομάζεται πολυκάναλος δυναμικός διεγέρτης 100 VI (MCDE, multi channel dynamic exciter). Τα κύτταρα εκτέθηκαν σε ραδιοσυχνότητες ηλεκτρομαγνητικού συντονισμού (ERF) κυμαινόμενες μεταξύ 10 KHz και 120 KHz για 45 λεπτά ενώ τα καρκινοπαθή πειραματόζωα για 45 λεπτά ημερησίως για δύο συνεχείς ημέρες. Τα LMS κύτταρα που εκτέθηκαν στις ίδιες ραδιοσυχνότητες ενοφθαλμίστηκαν μετέπειτα σε θηλυκούς επίμυες Wistar. Μία άλλη ομάδα επίμυων Wistar ενοφθαλμίστηκε με μη εκτεθειμένα στις ΗΜΓνητικές συχνότητες LMS κύτταρα (4×10^6 κύτταρα ανά πειραματόζωο). Στη συνέχεια, τα πειραματόζωα χωρίστηκαν τυχαία σε τρεις ομάδες. Η πρώτη ομάδα εκτέθηκε σε τυχαίες συχνότητες (Ομάδα Ελέγχου, CG), η δεύτερη ομάδα (μετά την εμφάνιση μιας ψηλαφητής μάζας όγκου) εκτέθηκε σε συχνότητες μη-συντονισμού για 5 ώρες ημερησίως με μέγιστη διάρκεια 60 ημερών (πειραματικός έλεγχος Ομάδα, ECG). Η τρίτη ομάδα (μετά την εμφάνιση μιας ψηλαφητής μάζας στην περιοχή εμβολιασμού) εκτέθηκε σε συχνότητες συντονισμού, για 5 ώρες με μέγιστη διάρκεια 60 ημέρες (Πειραματική ομάδα, EG-I). Μια τέταρτη ομάδα ζώων ενοφθαλμίστηκε με κύτταρα LMS τα οποία είχαν εκτεθεί σε συχνότητες συντονισμού (Πειραματική ομάδα II, EG-II).

Τα κύτταρα LMS που εκτέθηκαν σε ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού δεν εμφάνισαν καμία αναστολή του κυτταρικού πολλαπλασιασμού μετά από 24 ώρες επώασης. Ωστόσο, μετά από 48 ώρες επώασης ο πολλαπλασιασμός μειώθηκε δραματικά κατά 98% ($p < 0.01$). Τα κύτταρα που επιβίωσαν (2% των κυττάρων) εκτέθηκαν εκ νέου για 45 λεπτά (συνολικά 4 συνεδρίες έκθεσης) στα ΗΜΓνητικά πεδία. Σύμφωνα με τη κυτταρομετρία ροής το 45% αυτών των κυττάρων ήταν αποπτωτικά και μόνο ένα μικρό ποσοστό 2% βρισκόταν σε φάση μίτωσης.

Προκειμένου να προσδιοριστεί το μεταστατικό τους δυναμικό, τα κύτταρα που εκτέθηκαν σε ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού ελέγχθηκαν σε συσσωρευμόμετρο για την ικανότητά τους να προκαλούν συσσώρευση των αιμοπεταλίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει καμία διαφορά στην ικανότητα συσσώρευσης των αιμοπεταλίων σε σύγκριση με κύτταρα LMS που δεν έχουν εκτεθεί σε ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού.

Στα πειραματόζωα, η επαγωγή του όγκου ήταν 100% και οι ιστολογικές αναλύσεις ταυτοποίησαν τους όγκους ως λειομυοσάρκωμα. Στην Ομάδα EG-I προκλήθηκε τήξη του όγκου σε ένα σημαντικό αριθμό πειραματόζωων (τελική επαγωγή όγκου: 66%). Και στις δύο ομάδες πειραματόζωων που ενοφθαλμίστηκαν με εκτεθειμένα και μη-εκτεθειμένα στις ΗΜΓνητικές συχνότητες συντονισμού κύτταρα LMS (EG-I και EG-II) έδειξαν σημαντική παράταση του χρόνου επιβίωσης και σημαντική μείωση του ρυθμού ανάπτυξης όγκου σε σύγκριση με την ομάδα ελέγχου (CG). Ωστόσο, ο χρόνος επιβίωσης των πειραματόζωων της ομάδας EG-I βρέθηκε να είναι σημαντικά μεγαλύτερος και ο ρυθμός ανάπτυξης όγκου σημαντικά χαμηλότερος σε σύγκριση με τα πειραματόζωα της ομάδας EG-II.

Συμπερασματικά η εφαρμογή ΗΜΓνητικών πεδίων συντονισμού σε καρκινοπαθή πειραματόζωα (λειομυοσάρκωμα) αλλά και σε καρκινικά κύτταρα λειομυοσαρκώματος εμφανίζει ισχυρή αντικαρκινική δράση, η οποία πιθανόν οφείλεται στην επαγωγή της απόπτωσης των κακοήθων κυττάρων.

Περίληψη στην Αγγλική

ABSTRACT

Development of automated computer systems that generate low intensity static radiofrequency electromagnetic fields and their efficacy in the treatment of malignant cells and tumors

Antonios Avdikos, Mathematician

In the present study the effects of low intensity static radiofrequency electromagnetic fields causing no thermal phenomena, on leiomyosarcoma cell lines (LMS) isolated from tumors of fifteen Wistar rats induced via 3,4-benzo(α)pyrene and in tumor bearing Wistar rats induced by inoculation of the same cells, were studied.

Electromagnetic resonance frequencies measurements and exposure of cells and tumor-bearing animals were performed by a device called multi channel dynamic exciter 100 VI (MCDE). The LMS cell lines were exposed to electromagnetic resonance radio frequencies (ERFs) ranging between 10 KHz and 120 KHz for 45 min whilst the tumor-bearing animals were exposed for 45 min daily for two consecutive days. Leiomyosarcoma cells exposed to the same pattern of radio frequencies were inoculated in female Wistar rats. Another group of Wistar rats was inoculated with non-exposed to EMFs LMS cells (4×10^6 cells per animal). The animals were separated into three groups. The first group was sham-exposed to the resonant EMFs (control group, CG), the second group was exposed to non-resonant EMF radiation pattern for 5 hours per day for a maximum of 60 days after the appearance of a palpable mass (experimental control group-ECG). The third group was exposed to the resonant EMF radiation, for 5 hours for maximum 60 days after the appearance of a palpable mass to the inoculation site (Experimental group, EG-I). The fourth group of animals was inoculated with LMS cells exposed to resonance EMFs with no further exposure to electromagnetic fields (Experimental group II, EG-II).

After 24 hours the LMS cells exposed to the resonant EMFs of incubation did not manifest any inhibition of cell proliferation but at the end of 48 hours of incubation, the proliferation was dramatically decreased by 98% ($p < 0.01$). The 2% survived cells were exposed once again for 45 min (totally 4 sessions of exposure) to the resonant EMF fields.

Flow cytometry revealed that 45% of these cells underwent apoptosis and only a small percent (2%) underwent mitosis.

In order to determine their metastatic potential, these EMF cells were also counted and tested by an aggregometer for their ability to aggregate platelets. No difference in platelet aggregation was shown compared to the aggravating effects of non-exposed LMS cells.

In animal groups, the tumor induction was 100% and histology revealed that all tumors were leiomyosarcomas. In the case of the EG-I group, a number of tumors were completely regressed (final tumor induction: 66%). Both groups of animals inoculated with exposed and non-exposed to the EMF cells (EG-I and EG-II) demonstrated a significant prolongation of their survival time and a significant decrease in tumor growth rate, in comparison to the control group (CG). However, the survival time of EG-I animals was found to be significantly longer and tumor growth rate significantly lower compared to the EG-II animals.

Results as above indicate that application of resonant EMF waves to malignant tumor bearing animals and leiomyosarcoma cells induces significant anticancer effects. The effects are mainly attributed to apoptosis induction of malignant cells.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Young HD. *Φυσική Τόμος Β: Ηλεκτρομαγνητισμός-Οπτική-Σύγχρονη Φυσική*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπαζήσης 1994.
2. Zadhin M. *Review of the Russian Literature on Biological Action of DC and Low – Frequency AC Magnetic Fields*. Bioelectromagnetics 2001;22:27-451
3. Andreev YA, Bely MU, Sitko SP. Occurrence of the human body's own characteristic frequencies. Documents of AN USSR 1984;B(10):60-63.
4. Moskalenko YE. *On the application of centimeter radio waves for electrodeless recordings of volume changes of biological objects*. Biophysics (USSR) (English transl.) 1960;5:225-228.
5. Petrosyan VI, Zhiteneva EA, Gulyaev YV, et al. *Physics of interaction of millimeter waves with living objects*. Radiotekhnika 1996;9:20- 31.
6. Kositsky NN, Nizhelska AI, Ponezha GV. *Influence of High-frequency Electromagnetic Radiation at Non-thermal Intensities on the Human Body*. Newsletter of the Cellular Phone Taskforce Inc 2001;3(1):1-33
7. Cohen S, Popp FA. *Biophoton emission of human body*. Indian J Exp Biol. 2003;41(5):440-5.
8. Karkabounas S, Veltsistas P, Stergiou D, et al. *Differentiation experimental effects of low intensity static electromagnetic fields (SEMF), on pheochromocytoma cells, type PC12*. International Conference, IMA 2005, 2-6 October 2005. Book of Abstracts pp 281, PI-27
9. Niemtzow RC. *Use of transmembrane potentials in the identification of tumour cells*. Cancer Surveys 1987;6:269-283.
10. Stern, RG. Milestone, BN. Gatenby, RA. *Carcinogenesis and the plasma membrane*. Med Hypothesis 1999;52:367-372.
11. Johnson MT, Waite LR, Nindl G. *Noninvasive treatment of inflammation using electromagnetic fields: current and emerging therapeutic potential*. Biomed Sci Instrum 2004;40:469-74
12. Kellaway P. *The part played by electric fish in the early history of bioelectricity and electrotherapy*. Bull Hist Med 1946;20(2):112-137.

13. Payne B. *The body magnetic Therapeutic touch as energy exchange: testing the theory.* Advances in Nursing Science 1990;6:42-49
14. Mesmer FA. *Mesmerism: a translation of the original scientific and medical writings of F.A. Mesmer.* The University of California, Morgan Kaufmann Publishers, 1980
15. Geddes A. *Short history of the electrical stimulation of excitable tissue. Including electrotherapeutic applications.* Physiologist 1984 27(1 Suppl):S1-47
16. Burr BH, ed. *Blueprint for immortality.* CW Daniel 1972
17. Friedenberg R, Reese W, Reading WH. *Detector device and process for detecting ovulation.* United States Patent 1975;3,924.609.
18. Tiller WA. *On the evolution of electrodermal diagnostic instruments.* J. Adv Med 1988;1:41-56
19. Surowiec AJ, Stuchly SS, Keaney M, et al. *Dielectric polarization of animal lung at radio frequencies.* IEEE Trans Biomed Eng 1987;34(1):62-66.
20. Smith SR, Foster KR, Wolf GL. *Dielectric properties of VX-2 carcinoma versus normal liver tissue.* IEEE Trans Biomed Eng 1986;33(5):522-524
21. Marino AA, Iliev IG, Schwalke MA, et al. *Association between cell membrane potential and breast cancer.* Tumour Biol 1994a;15(2):82-9.
22. Marino AA, Morris DM, Schwalke MA, et al. *Electrical potential measurements in human breast cancer and benign lesions.* Tumour Biol 1994b;15(3):147-152.
23. Szent-Györgyi A. *Towards a new Biochemistry?* Science 1941;93(2426):609-611.
24. Mitsell P. *Vectorial chemistry and the molecular mechanics of the osmotic coupling: power transmission by poricity.* Bioch Soc Transactions 1976;4:399-430
25. Becker O. *Evidence for a primitive electrical analog system controlling brain function.* Subtle Energies 1991;24:71-78
26. Frolich H, *Biological coherence and response to external stimuli.* Berlin: Springer-Verlag 1988
27. Popp FA. *Cancer growth and its inhibition in terms of coherence.* Electromagnet Biol Med 2009;28(1):53-60
28. Davenas E, Beauvais F, Amara J, et al. INSERM U 2000. *Human basophil degranulation triggered by very dilute antiserum against IgE.* Nature 1988;333(6176):816-818.
29. Del Giudice E, Preparata G, Vitiello G. *Water as a free electric dipole laser Phys.* Review Lett 1988;61:1085-1088

30. Liasko R, Kabanos TA, Karkabounas S, et al. *Beneficial effects of a vanadium complex with cysteine, administered at low doses on benzo(alpha)pyrene-induced leiomyosarcomas in Wistar rats*. Anticancer Res 1998;18(5A):3609-13.
31. Stefanou DG, Nonni AV, Kalpouzou G, et al. *Immunophenotype ras oncogenes and p53 onco-suppressor genes on benzo(a)pyrene induced malignant soft tissue tumors in Wistar rats*. In Vivo 1998;12:511-521.
32. Karabetsos E. *Measurements' report of electromagnetic radiation levels emitted from the device Multi Channel Dynamic Exciter 100v*. 1 Report of EEAE: MIA EEP 2. "Demokritos." Athens, Greece: Greek Atomic Energy Agency, Bulletin no 2, 15.11, 2000.
33. Beneduci A, Chidichimo G, De Rose R, et al. *Frequency and irradiation time-dependant antiproliferative effects of low-power millimeter waves on RPMI 7932 human melanoma cell lines*. Anticancer Res 2005;25(2A):1023-1028.
34. Caraglia M, Marra M, Mancinelli F, et al. *Electromagnetic fields at mobile phone frequency induce apoptosis and inactivation of the multi-chaperone complex in human epidermoid cancer cells*. J Cellular Physiol 2005;204:539-548.
35. Polyak K, Xia Y, Zweier JL, et al. *A model for P53 induced apoptosis*. Nature 1997; 389:300-305.
36. Repacholi MH. *Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs*. Bioelectromagnetics 1998;19(1):1-19
37. Han L, Lin H, Head M, et al. *Application of magnetic fields induced heat shock protein 70 for presurgical cytoprotection*. J Cell Biochem 1998;78:371-379
38. Liboff AR, Wikkiams TJr, Strong DM, et al. *Time varying magnetic fields: effect on DNA synthesis*. Science 1984;223: 818-820.
39. Takahashi K, Kaneko I, Date M, et al. *Effects of pulsed electromagnetic fields on DNA synthesis in mammalian cells culture*. Experientia 1986;42:185-186.
40. Clejan S, Ide C, Walker C, et al. *Electromagnetic fields induced changes in lipid second messengers*. J Lipid Mediat Cell Signal 1996;13:301-324.
41. Bingelli R, Cameron IL. *Cellular potentials of normal and cancerous fibroblasts and hepatocytes*. Cancer Res 1980;40:1830-1835.
42. Panagopoulos DJ, Messini N, Karabarounis A, et al. *A mechanism of action of oscillating electric fields on cells*. Biochem Biophys Res Commun 2000;272: 634-640.

43. Sun D, Gong Y, Kojima H, et al. *Increasing cell transmembrane potential and GABAergic activity inhibits malignant hepatocyte growth*. Am J Physiol-Gastrointest Liver Physiol 2003;285:G12-G19.
44. Hisamitsu T, Narita K, Kasahara T, et al. *Induction of apoptosis in human leukemic cells by magnetic fields*. Jpn J Physiol 1997;47:307-310.
45. Simko M, Krichuber R, Weiss DG, et al. *Effects of 50 Hz EMF exposure on micronucleus formation and apoptosis in transformed and nontransformed human cell lines*. Bioelectromagnetis 1998;19:85-91.
46. Tofani S, Barone D, Berardelli M, et al. *Static and ELF magnetic fields enhance the in vivo anti-tumour efficacy of cisplatin against Lewis lung carcinoma, but not of cyclophosphamide against B16 melanotic melanoma*. Pharmacol Res 2003;48(1):83-90.
47. Thomas Y, Sciff M, Belkadi L et al. *Activation of human neutrophils by electronically transmitted phorbol-myristate acetate*. Medical Hypothesis 2000;54: 33-39.
48. Βεργινάδης Ι. «Αλληλεπίδραση βιολογικά δραστικών ουσιών με ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Πειραματική μελέτη». Διδακτορική διατριβή. Ιωάννινα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων 2010.
49. Βελαλοπούλου Α. «Μελέτη των επιδράσεων εκπομπής κυματομορφών συχνοτήτων πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού της υδροχλωρικής δοξορουβικίνης και ενός συμπλόκου Ag(I) με οργανικούς υποκαταστάτες, σε in vivo μοντέλο λειομυοσαρκώματος». Διδακτορική διατριβή. Ιωάννινα: Εκδόσεις Πανεπιστημίου Ιωαννίνων 2013.
50. Verginadis II, Simos YV, Velalopoulou AP, et al. *Analgesic effect of the electromagnetic resonant frequencies derived from the NMR spectrum of morphine*. Electromagn Biol Med 2012;31(4):275-84.
51. Aaron RK, Ciombor DM. *Therapeutic effects of electromagnetic fields in stimulation of connective tissue repair*. J Cell Biochem 1993;52(1):42-46.
52. Barker AT, Dixon RA, Sharrard WJ, et al. *Pulsed magnetic field therapy for tibial non-union. Interim results of a double-blind trial*. Lancet. 1984;1(8384):994-996.
53. Bassett CA, Pawluk RJ, Pilla AA. *Augmentation of bone repair by inductively coupled electromagnetic fields*. Science 1974;184(136):575-577.
54. Dortch AB, Johnson MT. *Characterization of pulsed magnetic field therapy in a rat model for rheumatoid arthritis*. Biomed Sci Instrum 2006;42:302-307.

55. Fischer G, Pelka RB, Barovic J. *Adjuvant treatment of knee osteoarthritis with weak pulsing magnetic fields. Results of a placebo-controlled trial prospective clinical trial.* Z Orthop Ihre Grenzgeb 2005;143(5):544-550.
56. László JF, Szilvási J, Fényi A, et al. *Daily exposure to inhomogeneous static magnetic field significantly reduces blood glucose level in diabetic mice.* Int J Radiat Biol 2011;87(1):36-45.
57. Otter MW, McLeod KJ, Rubin CT. *Effects of electromagnetic fields in experimental fracture repair.* Clin Orthop Relat Res 1998;355:S90-S104.
58. Tabrah F, Hoffmeier M, Gilbert FJr, et al. *Bone density changes in osteoporosis-prone women exposed to pulsed electromagnetic fields (PEMFs).* J Bone Miner Res 1990;5(5):437-42.
59. Wang Z, Che PL, Du J, et al. *Static magnetic field exposure reproduces cellular effects of the Parkinson's disease drug candidate ZM241385.* PLoS One 2010;5(11):e13883.
60. Chen YC, Chen CC, Tu W, et al. *Design and fabrication of a micro platform for the proximity effect study of localized ELF-EMF on the growth of in vitro HeLa and PC-12 cells.* J Micromech Microeng 2010;20(12):125023
61. Tuffet S, de Seze R, Moreau JM, et al. *Effects of a strong pulsed magnetic field on the proliferation of tumour cells in vitro.* Bioelectrochem Bioenerg 1993;30:151-160.
62. Ruiz Gómez MJ, Pastor Vega JM, de la Peña L, et al. *Growth modification of human colon adenocarcinoma cells exposed to a low-frequency electromagnetic field.* J Physiol Biochem 1999;55(2):79-83.
63. Ruiz Gómez MJ, de la Peña L, Pastor JM, et al. *25 Hz electromagnetic field exposure has no effect on cell cycle distribution and apoptosis in U-937 and HCA-2/1cch cells.* Bioelectrochem 2000;53(1):137-140.
64. Raylman RR, Clavo AC, Wahl RL. *Exposure to strong static magnetic field slows the growth of human cancer cells in vitro.* Bioelectromagnetics 1996;17(5):358-363.
65. Verginadis I, Velalopoulou A, Karagounis I, et al. *Beneficial Effects of Electromagnetic Radiation in Cancer.* In: Bashir SO, ed. Electromagnetic Radiation. Rijeka, Croatia: InTech Open 2012, 249-268.
66. Crocetti S, Beyer C, Schade G, et al. *Low intensity and frequency pulsed electromagnetic fields selectively impair breast cancer cell viability.* PLoS One 2013;8(9):e72944.

67. Buckner CA, Buckner AL, Koren SA, et al. *Inhibition of cancer cell growth by exposure to a specific time-varying electromagnetic field involves T-type calcium channels*. PLoS One 2015;10(4):e0124136.
68. Buckner CA, Buckner AL, Koren SA, et al. *The effects of electromagnetic fields on B16-BL6 cells are dependent on their spatial and temporal character*. Bioelectromagnetics 2017;38(3):165-174.
69. Akbarnejad Z, Eskandary H, Vergallo C, et al. *Effects of extremely low-frequency pulsed electromagnetic fields (ELF-PEMFs) on glioblastoma cells (U87)*. Electromagn Biol Med 2017;36(3):238-247.
70. Storch K, Dickreuter E, Artati A, et al. *BEMER Electromagnetic Field Therapy Reduces Cancer Cell Radioresistance by Enhanced ROS Formation and Induced DNA Damage*. PLoS One 2016;11(12):e0167931.
71. Strieth S, Strelczyk D, Eichhorn ME, et al. *Static magnetic fields induce blood flow decrease and platelet adherence in tumour microvessels*. Cancer Biol Ther 2008;7(6):814-819.
72. Strelczyk D, Eichhorn ME, Luedemann S, et al. *Static magnetic fields impair angiogenesis and growth of solid tumours in vivo*. Cancer Biol Ther 2009;8(18):1756-1762.
73. Tofani S, Cintorino M, Barone D, et al. *Increased Mouse Survival, Tumour Growth Inhibition and Decreased Immunoreactive P53 after exposure to Magnetic Fields*. Bioelectromagnetics 2002;23:230-238.
74. Jiménez-García MN, Arellanes-Robledo J, Aparicio-Bautista DI, et al. *Anti-proliferative effect of extremely low frequency electromagnetic field on preneoplastic lesions formation in the rat liver*. BMC Cancer 2010;10:159.
75. Mi Y, Sun C, Yao C, et al. *Lethal and inhibitory effects of steep pulsed electric field on tumour-bearing balb/c mice*, Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS, San Francisco, CA, USA, September 2004.
76. Zhang X, Zhang H, Zheng C, et al. *Extremely low frequency (ELF) pulsed-gradient magnetic fields inhibit malignant tumour growth at different biological levels*. Cell Biol Int 2002;6(7):599-603.
77. de Seze R, Tuffet S, Moreau JM, et al. *Effects of 100 mT time varying magnetic fields on the growth of tumours in mice*. Bioelectromagnetics 2000;21(2):107-111.

78. Williams CD, Markov MS, Hardman WE, et al. *Therapeutic electromagnetic field effects on angiogenesis and tumour growth*. Anticancer Res 2001;21(6A):3887-3892.
79. Mahna A, Firoozabadi SM, Shankayi Z. *The effect of ELF magnetic field on tumor growth after electrochemotherapy*. J Membr Biol 2014;247(1):9-15.
80. Cameron IL, Markov MS, Hardman WE. *Optimization of a therapeutic electromagnetic field (EMF) to retard breast cancer tumor growth and vascularity*. Cancer Cell Int 2014;14(1):125.
81. Delle Monache S, Angelucci A, Sanità P, et al. *Inhibition of angiogenesis mediated by extremely low-frequency magnetic fields (ELF-MFs)*. PLoS One 2013;8(11):e79309.
82. Salvatore JR, Harrington J, Kummer T. *Phase I clinical study of a static magnetic field combined with anti-neoplastic chemotherapy in the treatment of human malignancy: initial safety and toxicity data*. Bioelectromagnetics 2003;24(7):524-527.
83. Barbault AH, Costa FPH, Bottger BH, et al. *Amplitude-modulated electromagnetic fields for the treatment of cancer: discovery of tumour-specific frequencies and assessment of a novel therapeutic approach*. J Exp Clin Cancer Res 2009;28(1):51.
84. Ronchetto F, Barone D, Cintonio M, et al. *Extremely low frequency-modulated static magnetic fields to treat cancer: A pilot study on patients with advanced neoplasm to assess safety and acute toxicity*. Bioelectromagnetics 2004;25(8):563-571.
85. Kirson ED, Dabaly V, Tovarys F, et al. *Alternating electric fields arrest cell proliferation in animal tumor models and human brain tumors*. Proc Nat Acad USA 2007;104(24):10152-10157.
86. Salzberg MH, Kirson EH, Palti YH, et al. *A pilot study with very low intensity, intermediate-frequency electric fields in patients with locally advanced and/or metastatic solid tumours*. Onkologie 2008;31(7):362-365.
87. Evangelou A, Toliopoulos I, Giotis C, et al. *Functionality of natural killer cells from end-stage cancer patients exposed to resonant electromagnetic fields*. Electromagn Biol Med 2011;30(1):46-56.
88. Simko M, Mattsson MO. *Extremely low frequency electromagnetic fields as effectors of cellular responses in vitro: possible immune cell activation*. J Cell Biochem 2004;93:83-92.
89. Johansen C. *Exposure to electromagnetic fields and risk of central nervous system disease in utility workers*. Epidemiology 2000;11(5):539-43.

90. Hardell L, Holmberg B, Malmer H, et al. *Exposure to extremely low frequency electromagnetic fields and the risk of malignant diseases--an evaluation of epidemiological and experimental findings.* Eur J Cancer Prev 1995;4(Suppl 1):3-107.
91. Repacholi MH. *Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs.* Bioelectromagnetics 1998;19:1-19.
92. McGregor DG, Slovic P, Morgan MG. *Perception of risks from electromagnetic fields: A psychometric evaluation of a risk communication approach.* Risk Anal 1994;14(5):815-828.
93. Sobel E, Davanipour Z, Sulkava R, et al. *Occupations with Exposure to Electromagnetic Fields: A Possible Risk Factor for Alzheimer's Disease.* Am J Epidemiol 1995;142(5):515-24.
94. Qiu C, Fratiglioni L, Karp A, et al. *Occupational exposure to electromagnetic fields and risk of Alzheimer's disease.* Epidemiology 2004;15(6):687-94.
95. Calvente I, Fernandez MF, Villalba J, et al. *Exposure to electromagnetic fields (non-ionizing radiation) and its relationship with childhood leukemia: a systematic review.* Sci Total Environ 2010;408(16):3062-9.
96. Schüz J, Ahlbom A. *Exposure to electromagnetic fields and the risk of childhood leukaemia: a review.* Radiat Prot Dosimetry. 2008;132(2):202-11.

9. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

1. Karkabounas S, Havelas K, Kostoula O, Vezyraki P, Avdikos A, Binolis J, Hatziaivazis G, Metsios A, Verginadis I, Evangelou A (2006). Effects of low intensity static electromagnetic radiofrequency fields on leiomyosarcoma and smooth muscle cell lines. Hellenic Journal of Nuclear Medicine 9(3): 167-72
2. Avdikos A, Karkabounas S, Metsios A, Kostoula O, Havelas K, Binolis J, Verginadis I, Hatziaivazis G, Simos I, Evangelou AM (2007). Anticancer effects on leiomyosarcoma-bearing wistar rats after electromagnetic radiation of resonant radiofrequencies. Hellenic Journal of Nuclear Medicine 10(2): 95-101