

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ**



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
κατεύθυνση :
«ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΛΕΪΖΕΡ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ Μ.Δ.Ε.

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ
ΛΟΓΩ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΜΙΚΡΟΚΥΜΑΤΩΝ
ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΟΥΝ ΤΑ ΚΙΝΗΤΑ**

ΕΛΕΣΣΑ ΜΠΑΤΣΑΚΗ

Επιβλέπων : Επίκουρος Καθηγητής Απόστολος Παντινάκης

ΧΑΝΙΑ , 2008

Η διατριβή αυτή αποτελεί μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση του
Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης (Μ.Δ.Ε)

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Απόστολο Παντινάκη για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το ενδιαφέρον θέμα, όπως και για την άρτια επιστημονική του καθοδήγηση και ηθική συμπαράσταση κατά την ολοκλήρωση αυτής της διατριβής.

Ευχαριστώ τον κύριο Βεργάκη Μιχαήλ για τον πολύτιμο χρόνο που αφιέρωσε για τη μελέτη αυτής της εργασίας και για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ τον κύριο Λιονή Χρήστο για τις σημαντικές του υποδείξεις και για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Ευχαριστώ τον ΕΛΚΕ για την ανάθεση έργου που μου παρείχε, στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος με τίτλο « Διερεύνηση Ηλεκτρομαγνητικής Ρύπανσης», καθώς και για τις δύο υποτροφίες επίδοσης που έλαβα.

Ευχαριστώ τους συναδέλφους μου Μαρία Πλανά και Παναγιώτη Παντζέκο για την ηθική τους συμπαράσταση.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, στο σύζυγο και στα παιδιά μου, για την υπομονή και αμέριστη κατανόηση που έδειξαν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Στην οικογένειά μου,

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλεί το κινητό τηλέφωνο κατά τη διάρκεια συνομιλίας σε υλικά που βρίσκονται πολύ κοντά του, με σκοπό να προσδιορισθεί η συνεισφορά της ακτινοβολίας μικροκυμάτων που εκπέμπει. Αν και τα 'θερμικά αποτελέσματα' της ακτινοβολίας των κινητών (η αύξηση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου ιστού) αποτελούν τη βάση καθορισμού των ορίων έκθεσης για τους χρήστες, η αύξηση της θερμοκρασίας, που οφείλεται μόνο στα μικροκύματα, δεν έχει μετρηθεί άμεσα μέχρι σήμερα.

Κατά πρώτον διερευνήθηκε η χρήση υλικών με κατάλληλες διηλεκτρικές ιδιότητες, συγκρίσιμες με αυτές του ανθρώπινου ιστού, όσον αφορά την απορρόφηση μικροκυμάτων, αποφεύγοντας έτσι πειράματα με έκθεση ανθρώπων. Ως δείγματα προς μελέτη επιλέχθηκαν υλικά (νερό, αιθανόλη) που μένουν αναλλοίωτα με το χρόνο, παρέχοντας έτσι επαναληψιμότητα των μετρήσεων. Επίσης σε σύγκριση με ανθρώπους είναι απλούστερα, αφού δεν έχουν ανεπιθύμητες θερμοκρασιακές μεταβολές λόγω εφίδρωσης ή/και κυκλοφορίας του αίματος.

Τα πειράματα που ακολούθησαν επέτρεψαν τον εντοπισμό πηγών θέρμανσης που συνεισφέρουν σημαντικά στην αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών κατά τη χρήση κινητών, αλλά που είναι διαφορετικές από την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα κινητά στην περιοχή των μικροκυμάτων.

Η μελέτη ολοκληρώθηκε αναπτύσσοντας θεωρητικό μοντέλο για την εξήγηση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων. Κατ'αρχήν εκφράστηκαν οι ρυθμοί με τους οποίους διάφοροι μηχανισμοί μπορούν να προκαλέσουν απολαβή ή/και απώλειες θερμότητας στα υλικά. Η λύση της διαφορικής εξίσωσης που προκύπτει δίνει τη μεταβολή της θερμοκρασίας του δείγματος με το χρόνο. Αναλυτική επίλυση είναι δυνατή υποθέτοντας ότι ισχύει ορισμένη συμμετρία στη διάδοση θερμότητας στα υλικά και κάνοντας χρήση των διαφόρων σταθερών των υλικών καθώς και δεδομένων από τα πειράματα.

Η απλή αναλυτική πρόβλεψη που επιτυγχάνεται στην παρούσα εργασία είναι συμβατή σε αποδεκτό βαθμό με τις μετρήσεις που έγιναν. Επι πλέον προβλέπει ότι η συνεισφορά των μικροκυμάτων του κινητού δεν υπερβαίνει $\sim 0,2^\circ\text{C}$ στη συνολική αύξηση της θερμοκρασίας $\sim 1^\circ\text{C}$, δηλαδή συνεισφέρει κατά $\sim 20\%$. Σε μορφή ποσοστού, μπορεί να συγκριθεί με προηγούμενες προβλέψεις στη βιβλιογραφία που βασίζονται σε υπολογισμούς ή μετρήσεις σε ανθρώπους και διαπιστώνεται ότι συμφωνεί.

ABSTRACT

In the present work the temperature increase is studied which is caused by the mobile phone during conversation to materials in close proximity, aiming to determine the contribution of the microwave radiation it emits. Although the 'thermal effects' of the mobile phone radiation (the increase in human tissue temperature) constitute the basis for determining the exposure limits for the users, the temperature increase due to the microwaves alone, has not been measured directly to date.

Firstly, the use of materials was investigated with suitable dielectric properties, comparable to those of the human tissue, as far as microwave absorption is concerned, thus avoiding experiments that expose humans. As samples under study were chosen materials (water, ethanol) that stay unaltered with time, thus providing measurement repeatability. Also compared to humans they are simpler as they do not have undesired temperature variations due to perspiration and/or blood circulation.

The experiments that followed allowed the identification of heating sources that contribute significantly to the temperature increase of the materials during mobile phone use, but which are different from the radiation mobile phone emit in the microwave area.

The study was integrated by developing a theoretical model for explaining the results of the experiments. Firstly the rates were expressed by which various mechanisms can cause heat gain and/or loss in the materials. The solution of the resulting differential equation gives the increase of the sample temperature with time. An analytical solution is possible assuming certain symmetry applies to the heat propagation through the materials and making use of the various constants of the materials and data from the experiments.

The simple analytical prediction that is achieved in the present work is compatible to an acceptable degree with the measurements made. In addition it predicts that the contribution of the mobile phone microwave radiation does not exceed $\sim 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the total temperature increase, of $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, ie it contributes by $\sim 20\%$.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 1 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ.....	3
1.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία	3
1.2 Ενέργεια ηλεκτρομαγνητικού κύματος.....	5
1.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.....	6
1.4 Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.....	7
Κεφάλαιο 2 ΚΕΡΑΙΕΣ.....	8
2.1 Κεραίες και ακτινοβολία.....	8
2.2 Περιοχές εγγύς και μακρινού πεδίου γύρω από μια κεραία.....	12
2.3 Βασικές παράμετροι κεραιών.....	15
Κεφάλαιο 3 ΚΙΝΗΤΗ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑ.....	17
3.1 Η ανάπτυξη του Παγκόσμιου Συστήματος Κινητών Επικοινωνιών (Global System for Mobile Communication – GSM).....	17
3.2 Διαδικασία σχεδιασμού των κυψελών ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών.....	18
3.3 Τεχνολογία των κινητών τηλεφώνων στο GSM σύστημα.....	20
Κεφάλαιο 4 ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ.....	22
4.1 Βιολογικές επιδράσεις από την ακτινοβολία της κινητής τηλεφωνίας.....	22
4.1 α) Θερμικές βιολογικές επιδράσεις.....	23
4.1 β) Μη θερμικές βιολογικές επιδράσεις.....	24
4.2 Δημοσιευμένες εργασίες για την μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας στον ανθρώπινο ιστό.....	27
4.2 α) Θεωρητικές μελέτες.....	27
4.2 β) Μεικτές μελέτες (Θεωρητικές –Πειραματικές).....	30
4.2 γ) Πειραματικές έρευνες.....	31
Κεφάλαιο 5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ.....	35
5.1 Επιλογή του κατάλληλου υλικού – δείγματος.....	35
5.2 Υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης υλικών στις συχνότητες λειτουργίας των κινητών.....	36

Κεφάλαιο 6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	39
6.1 Πηγή Η/Μ ακτινοβολίας (κινητό).....	39
6.1α) Υπολογισμός ισχύος μικροκυμάτων που εκπέμπει το κινητό.....	39
6.1β) Υπολογισμός ισχύος μικροκυμάτων που φτάνει στο δείγμα.....	40
6.2 Περιοχή αλληλεπίδρασης μικροκυμάτων με υλικά.....	41
6.3 Αισθητήρας ανίχνευσης θερμοκρασίας (θερμοζεύγος).....	41
6.4 Σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας των δεδομένων.....	42
 Κεφάλαιο 7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	43
7.1 Στάδια μετρήσεων.....	43
7.2 Τυπικά πειράματα	46
7.2 α) Μιας συνομιλίας κινητού	46
7.2 β) Επαναλαμβανόμενης συνομιλίας κινητού.....	48
 Κεφάλαιο 8 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΛΑΒΗΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	50
8.1 Απώλειες θερμότητας.....	50
8.1 α) Απώλειες θερμότητας με αγωγή (conduction).....	50
8.1 β) Απώλειες θερμότητας με μεταφορά (convection).....	50
8.1 γ) Απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία (radiation).....	51
8.2 Υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης α της θερμικής ακτινοβολίας του γυαλιού από τα 2 μm – 50 μm.....	52
 Κεφάλαιο 9 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	54
9.1 Μοντελοποίηση του πειράματος.....	54
9.1 α) Κυλινδρική συμμετρία.....	56
9.1 β) Επίπεδη συμμετρία.....	62
9.2 Έλεγχος μοντελοποίησης.....	65
 Κεφάλαιο 10 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑ	
10.1 Σύγκριση πειραματικών τιμών θερμοκρασίας δείγματος με τις προβλέψεις της μοντελοποίησης.....	68
10.2 Συμπεράσματα- μελλοντικές κατευθύνσεις.....	72
ΣΥΝΟΨΗ.....	73
ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	75

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η ανάπτυξη της τεχνολογίας των τηλεπικοινωνιών, οδήγησε στην ευρύτατη χρησιμοποίηση των ραδιοσυχνοτήτων (RF - Radio Frequency), που αντιστοιχεί στην περιοχή από 10kHz-300GHz του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και ιδιαίτερα της κινητής τηλεφωνίας στην περιοχή μικροκυμάτων(0,9 GHz, 1,8GHz).[3]

Οι πιθανές βιολογικές επιδράσεις των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στην περιοχή των ραδιοσυχνοτήτων απασχολούν έντονα την επιστημονική κοινότητα και το ευρύ κοινό.

Διεθνείς οργανισμοί έχουν προχωρήσει στη θέσπιση ορίων ασφαλούς έκθεσης του γενικού πληθυσμού και των εργαζομένων στην επίδραση της RF ακτινοβολίας, με βάση την αύξηση της θερμοκρασίας που θα μπορούσε να προκαλέσει η απορρόφησή της ($<1^{\circ}\text{C}$) [4]. Οι περισσότερες χώρες στην Ευρώπη χρησιμοποιούν τις οδηγίες που αναπτύχθηκαν από την ειδική **Διεθνή Επιτροπή για την Προστασία από τη μη ιονίζουσα Ακτινοβολία** (International Commission on Non Ionizing Radiation Protection - **ICNIRP**) που υιοθετούνται **από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας** (World Health Organization – **WHO**). Οι πλέον πρόσφατες οδηγίες της ICNIRP δημοσιεύτηκαν το 1998 και αποτελούν τη βάση και της ελληνικής νομοθεσίας για την προστασία του κοινού από την έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.[4]

Αν υπάρχει απορρόφηση ενέργειας της RF ακτινοβολίας, ένα μέρος της μετατρέπεται σε θερμότητα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του υλικού που απορρόφησε τη θερμότητα. Ειδικά για τα κινητά που είναι πολύ κοντά στο χρήστη έχουν γίνει πολλές κυρίως θεωρητικές μελέτες, της αναμενόμενης αύξησης της θερμοκρασίας του ανθρώπινου ιστού. Ο Wainwright επιλύοντας την κλασσική βιοθερμική εξίσωση Pennes υπολόγισε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του εγκεφάλου ήταν περίπου $0,1^{\circ}\text{C}$ [24].

Ο Bernardi, υπολόγισε μια αύξηση της θερμοκρασίας στην περιοχή του αυτιού από $0,22^{\circ}\text{C}$ έως $0,43^{\circ}\text{C}$ και στον εγκέφαλο από $0,08^{\circ}\text{C}$ έως $0,19^{\circ}\text{C}$ όταν η ισχύς της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ήταν 600mW [28]. Ο Gandi, εφαρμόζοντας την FDTD μέθοδο, υπολόγισε μια αύξηση της θερμοκρασίας στον εγκέφαλο μικρότερη από $0,1^{\circ}\text{C}$ έως $0,2^{\circ}\text{C}$, ενώ για την περιοχή του αυτιού $4,5^{\circ}\text{C}$ που οφείλονταν στη διάδοση θερμότητας με μεταφορά από τον εγκλωβισμένο αέρα ανάμεσα στο κινητό και το αυτί και με αγωγή από το ζεστό κινητό [30]. Πειραματικά είναι πολύ δύσκολο να μετρηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας που οφείλεται μόνο στα μικροκύματα των κινητών επειδή η αύξηση της θερμοκρασίας που οφείλεται σε άλλες πηγές (π.χ. η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο θερμικό υπέρυθρο που εκπέμπει το περίβλημα και άλλες επιφάνειες του κινητού) είναι πολύ μεγαλύτερες.

Ο Yoo μέτρησε με τη χρήση κάμερας υπερύθρου, μια αύξηση της θερμοκρασίας στο μάγουλο και στο αυτί, από 0,25 °C έως 1,11 °C, ενώ η ισχύς της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του κινητού ήταν 240 mW. Στο πείραμα αυτό δεν μπόρεσαν να διαχωρίσουν την αύξηση της θερμοκρασίας που οφείλονταν στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του κινητού από την αύξηση της θερμοκρασίας που οφείλονταν στη θερμότητα που παράγεται από την μπαταρία [19].

Ο Straum μέτρησε και αυτός, με τη χρήση κάμερας υπερύθρου, μια αύξηση της θερμοκρασίας στο μάγουλο και στο αυτί, περίπου 3,8°C με τη συνεισφορά όλων των πηγών θέρμανσης (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, θερμική μόνωση, θέρμανση του ίδιου του κινητού) ενώ η ισχύς της εκπεμπόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του κινητού ήταν 210 mW [20].

Ο Anderson χρησιμοποιώντας ένα θερμόμετρο ακριβείας (Fluke 80), μέτρησε μια αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος στο πρόσωπο 2,3 °C, όταν η ισχύς του κινητού ήταν 250mW. Σύμφωνα με αυτήν την έρευνα, η συνεισφορά της RF ακτινοβολίας στην αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος ήταν πολύ μικρή, και η μεγαλύτερη συνεισφορά οφείλεται στη διάδοση θερμότητας λόγω αγωγιμότητας από το κινητό [25].

Ο Seze μέτρησε με ένα θερμόμετρο οπτικών ινών, την αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος στο πρόσωπο. Όταν το κινητό ήταν σε κατάσταση αναμονής η αύξηση της θερμοκρασίας ήταν 2,93 °C, σε κατάσταση εκπομπής 3,29 °C και σε κατάσταση εκπομπής χωρίς την κεραία του κινητού 3,31 °C. Επειδή η διαφορά στην αύξηση της θερμοκρασίας με ή χωρίς την κεραία του κινητού δεν ήταν σημαντική, η συνεισφορά από την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ήταν αμελητέα[27].

Σύμφωνα με μία πολύ πρόσφατη έρευνα [40], στον άνθρωπο εμφανίζονται ανεξέλεγκτοι μηχανισμοί απαγωγής θερμότητας (κυκλοφορία αίματος, εφίδρωση) με αποτέλεσμα η αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας να μειώνεται περισσότερο. Επιπλέον, τα κινητά ρυθμίζουν τη λειτουργία τους, ώστε η ισχύς που μεταδίδουν να είναι η ελάχιστη που χρειάζεται ο σταθμός βάσης για να λάβει ένα καθαρό σήμα. Έτσι γίνεται αναγκαία η χρήση υλικών με διηλεκτρικές ιδιότητες παρόμοιες με αυτές του ανθρώπινου ιστού, κάτω από συνθήκες πραγματικής λειτουργίας του κινητού (συνομιλία) και όχι κάτω από υποθετικές συνθήκες εκπομπής στη μέση μέγιστη ισχύ του.

Κεφάλαιο 1 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ

1.1 Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

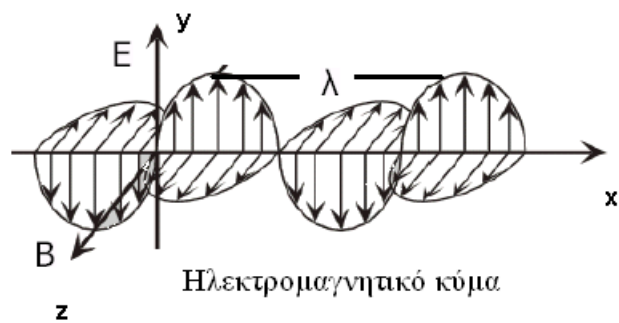
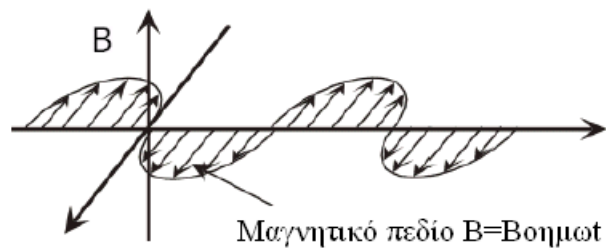
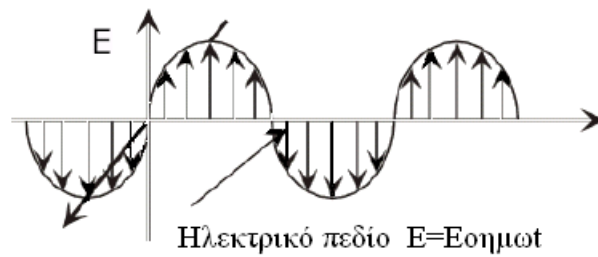
Η χρονική μεταβολή μιας φυσικής ποσότητας που προκαλεί μια διαταραχή, ονομάζεται κύμα και διαδίδεται από θέση σε θέση. Επομένως το κύμα έχει χωροχρονική εξάρτηση. [1] Η μετάδοση ενέργειας από σημείο σε σημείο στο χώρο με τη μορφή κυμάτων, ή με τη μορφή σωματιδίων (ηλεκτρόνια, πρωτόνια, νετρόνια) αναφέρεται ως ακτινοβολία [2]. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία είναι το είδος εκείνο της ενέργειας που μεταδίδεται με τη μορφή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δηλαδή τοπικών και χρονικών μεταβολών του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Τα κινητά τηλέφωνα και οι σταθμοί βάσης εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Σε απομακρυσμένα από την πηγή σημεία το ηλεκτρικό πεδίο E (Σχ.1α) και το μαγνητικό πεδίο B (Σχ.1β) είναι κάθετα μεταξύ τους και ταυτόχρονα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος κάθε χρονική στιγμή (Σχ.1γ). Τα δύο αυτά πεδία, βρίσκονται σε φάση κάθε χρονική στιγμή, δηλαδή παίρνουν ταυτόχρονα τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές τους. Διαδίδονται στο χώρο με την **ταχύτητα του φωτός v** , που για το κενό ή τον αέρα, είναι περίπου **$v = 300.000 \text{ km/sec}$** .

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι αρμονικά καθώς οι εντάσεις τους E και B μεταβάλλονται τοπικά και χρονικά ακολουθώντας το νόμο του ημίτονου. Η απόσταση στο χώρο μέσα στην οποία επαναλαμβάνεται η μορφή της διαταραχής, λέγεται **μήκος κύματος λ** , ενώ ο αριθμός των κυμάτων που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο σημείο σε 1 sec είναι η **συχνότητα του κύματος, f** . [1] Η μονάδα συχνότητας στο διεθνές σύστημα μονάδων (SI) είναι το 1Hz, ένας κύκλος το δευτερόλεπτο και το αντίστοιχο μήκος κύματος είναι 300.000 km. Το μήκος κύματος λ και η συχνότητα f συνδέονται με την ταχύτητα του φωτός v , σύμφωνα με τη γνωστή σχέση:

$$v = \lambda f \quad (1.1)$$

Αν η συχνότητα είναι 10 Hz τότε θα σχηματίζονται 10 κύματα σε 1 sec και το μήκος τους θα είναι 30.000 km. Συχνότητα 10.0000 Hz θα έδινε κύματα μήκους 30km. Επομένως όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα, τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας.



Σχ.1.1 Το ηλεκτρικό πεδίο E (1α) και το μαγνητικό πεδίο B (1β) είναι κάθετα μεταξύ τους και ταυτόχρονα κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος κάθε χρονική στιγμή (1γ).

Όλα τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα έχουν την ίδια φύση, την ίδια ταχύτητα διάδοσης, διαφέρουν μόνο στη συχνότητα και το μήκος κύματος.

Τα μέτρα των \vec{E} και \vec{B} συνδέονται με τη σχέση:

$$E_y = v B_z \quad (1.2)$$

όπου v η ταχύτητα διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα για να διαδοθούν δεν απαιτούν κανένα μέσο διάδοσης.

1.2 Ενέργεια ηλεκτρομαγνητικού κύματος.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια (π.χ. η ηλιακή ακτινοβολία, η ακτινοβολία στους φούρνους μικροκυμάτων κ.α.) [1]. Σε μια περίοδο, η ενέργεια που μεταφέρεται από ένα Η/Μ κύμα είναι η μέση τιμή της ενέργειας του κύματος.

Η πυκνότητα της ενέργειας του ηλεκτρικού πεδίου u_E , δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια ανά μονάδα όγκου δίνεται από τη σχέση:

$$u_E = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (1.3)$$

ενώ η πυκνότητα της ενέργειας του μαγνητικού πεδίου u_B είναι:

$$u_B = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \quad (1.4)$$

Για ένα Η/Μ κύμα η μέση τιμή της πυκνότητας ενέργειας είναι:

$$\bar{u} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E_{oy}^2 = \frac{B_{oz}^2}{2\mu_0} \quad (1.5)$$

όπου $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}$ η διηλεκτρική σταθερά του κενού, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$ η μαγνητική διαπερατότητα του κενού, E_{oy} και B_{oz} είναι το πλάτος των πεδίων \vec{E} και \vec{B} στους άξονες y και z αντίστοιχα.

Η ενέργεια που προσπίπτει στη μονάδα του χρόνου σε μια επιφάνεια μοναδιαίου εμβαδού, κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος λέγεται ένταση του κύματος I και δίνεται από τη σχέση:

$$I = \frac{1}{2} \frac{E_{oy} B_{oz}}{\mu_0} \quad (1.6)$$

Μονάδα της έντασης είναι το Watt ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m^2).

Η παραπάνω έκφραση αναφέρεται στη μέση τιμή της έντασης και παριστάνει τη ροή ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας.

Η διανυσματική ποσότητα που περιγράφει το μέτρο και την κατεύθυνση του ρυθμού ροής ενέργειας ονομάζεται διάνυσμα Poynting \vec{S} και ορίζεται από τη σχέση:

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B} \quad (1.7)$$

Το μέτρο του διανύσματος Poynting αναφέρεται στη στιγμιαία του τιμή, ενώ η κατεύθυνσή του είναι η κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.

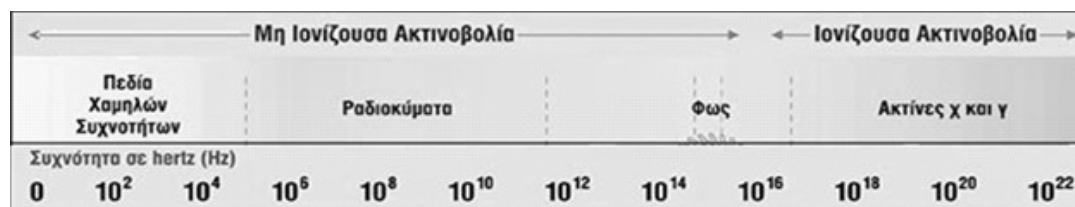
1.3 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

Η ταξινόμηση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με βάση τη συχνότητα ονομάζεται ηλεκτρομαγνητικό φάσμα [2]. Οι περιοχές στις οποίες διαιρείται το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι: Πεδία χαμηλών συχνοτήτων, ραδιοκύματα, μικροκύματα, υπέρυθρο, ορατό φως, υπεριώδες, ακτίνες X, ακτίνες γ.

Η χαμηλότερη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (πεδία χαμηλών συχνοτήτων, ραδιοκύματα, μικροκύματα, υπέρυθρο, ορατό, υπεριώδες), χαρακτηρίζεται ως μη ιονίζουσα, γιατί η ενέργεια της ακτινοβολίας δεν είναι αρκετά ισχυρή ώστε να προκαλέσει ιονισμό. Δηλαδή, δεν μπορεί να δημιουργήσει ιόντα μέσα στην ύλη, με την αφαίρεση ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων από τα άτομα.

Αντίθετα στο υψηλότερο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (ακτίνες X, ακτίνες γ), η ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει ιονισμό και χαρακτηρίζεται ως ιονίζουσα.

Μεταξύ των περιοχών του φάσματος δεν υπάρχουν σαφή όρια. Στην πραγματικότητα υπερκαλύπτονται και ο διαχωρισμός τους γίνεται αυθαίρετα για λόγους ταξινόμησης.



Σχ. 1.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

1.4 Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων

Έστω μια πηγή συνεχούς τάσης που φορτίζει με ίσα και αντίθετα φορτία τα άκρα ενός κατακόρυφου σύρματος [1]. Για να φτάσουν τα φορτία στα άκρα κινούνται δημιουργώντας ένα ρευματοφόρο αγωγό, όπου για σταθερή πολικότητα της πηγής, παράγει ένα χρονικά αμετάβλητο μαγνητικό πεδίο.

Τα φορτία όμως που βρίσκονται στα άκρα του σύρματος, παράγουν ένα ηλεκτροστατικό πεδίο Coulomb που μειώνεται με την απόσταση και δεν διαδίδεται στο χώρο, γιατί έξω από τον αγωγό $E=0$.

Αν όμως η πηγή είναι εναλλασσόμενης τάσης τότε θα δημιουργούσε στο χώρο εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο. Η φορά του παραγόμενου ρεύματος θα άλλαζε και αυτή περιοδικά και θα δημιουργούσε στο χώρο εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο.

Το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο μπορεί να ανιχνευτεί σε μεγάλες αποστάσεις και διαδίδεται με συγκεκριμένη ταχύτητα παράγοντας το ηλεκτρομαγνητικό κύμα. Η ταχύτητα με την οποία διαδίδεται το ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (1.8)$$

δηλαδή διαδίδεται με ταχύτητα ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Με βάση το νόμο του Ampere, ένα εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο που υπάρχει στο διάστημα, δημιουργεί ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο. Το εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, σύμφωνα με το νόμο του Faraday, δημιουργεί ξανά εναλλασσόμενο ηλεκτρικό πεδίο.

Δηλαδή το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αναδημιουργεί τον εαυτό του καθώς ταξιδεύει στο χώρο, μεταφέροντας ενέργεια που προέρχεται από την πηγή του κύματος. [1]

Κεφάλαιο 2 ΚΕΡΑΙΕΣ

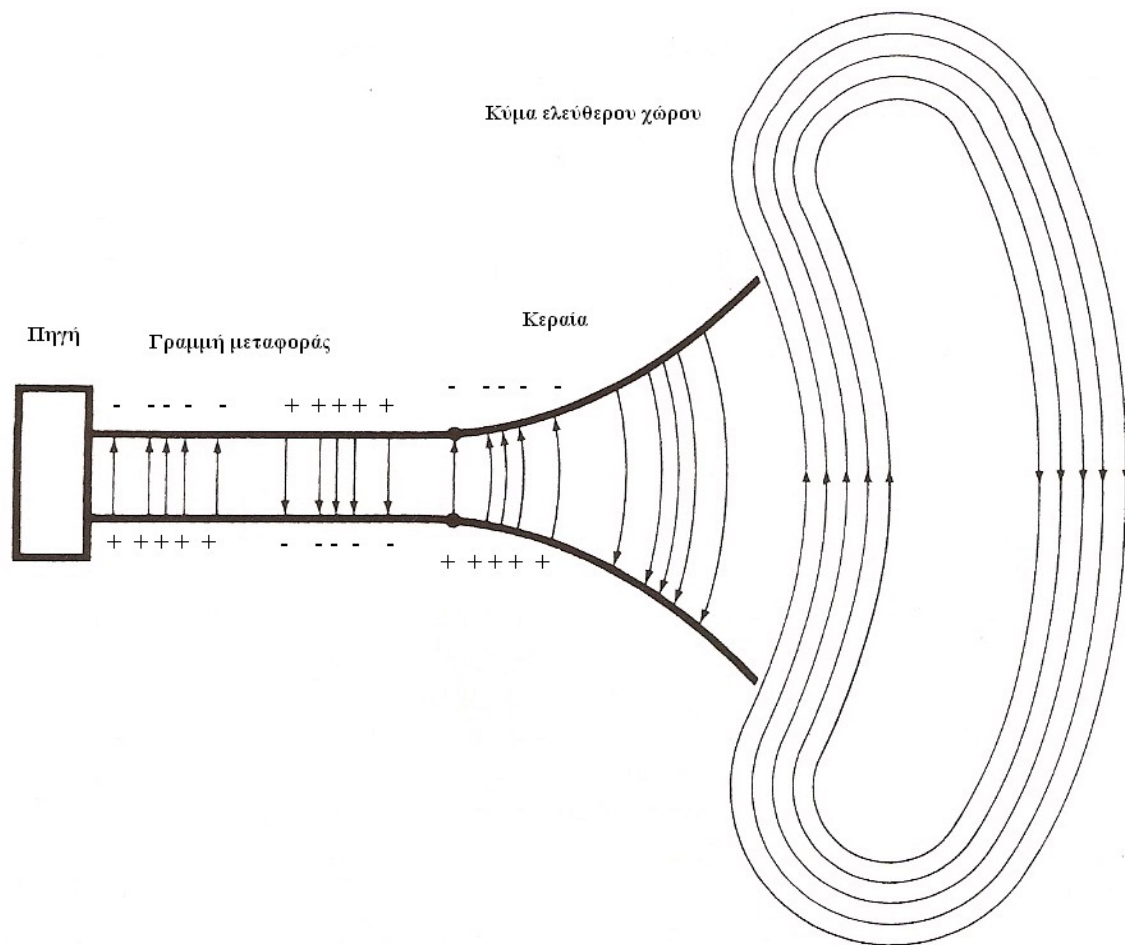
2.1 Κεραίες και ακτινοβολία

Η κεραία είναι μια μεταλλική συνήθως διάταξη (ράβδος ή σύρμα) για την εκπομπή ή λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων [5]. Είναι μια μεταβατική διάταξη ανάμεσα στον ελεύθερο χώρο και σε μια γραμμή μεταφοράς. Η γραμμή μεταφοράς μεταφέρει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια από την κεραία στον δέκτη, ή από μια πηγή εκπομπής στην κεραία και μπορεί να είναι ομοαξονική ή δισύρματη γραμμή μεταφοράς ή ένας κοίλος σωλήνας (κυματοδηγός).

Στο Σχ.2.1 μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης (γεννήτρια) συνδεδεμένη με μια γραμμή μεταφοράς άπειρου μήκους, παράγει ένα καθοδηγούμενο κύμα, που διαδίδεται κατά μήκος αυτής της γραμμής και σταδιακά ανοίγει, για να ακτινοβοληθεί σαν κύμα ελεύθερου χώρου. Το καθοδηγούμενο κύμα είναι ένα επίπεδο κύμα ενώ το κύμα ελεύθερου χώρου είναι ένα σφαιρικό κύμα. Κατά μήκος της γραμμής μεταφοράς η ενέργεια μεταφέρεται σαν επίπεδο κύμα από ένα σημείο σε κάποιο άλλο, με μικρές απώλειες σε ακτινοβολία και θερμότητα, όταν η απόσταση μεταξύ των συρμάτων είναι πολύ μικρή σε σχέση με το μήκος του κύματος καθώς τα πεδία που ακτινοβολούνται από το ρεύμα του ενός σύρματος εξουδετερώνονται από τα πεδία του άλλου.

Επομένως η ενέργεια περιορίζεται στη γραμμή μεταφοράς και το κύμα που μεταδίδεται κατά μήκος της γραμμής δεν απλώνεται στο χώρο αλλά ακολουθεί αυτή τη γραμμή.

Αναφερόμενοι στο Σχ.2.1 όταν η απόσταση μεταξύ των συρμάτων προσεγγίζει το ένα μήκος κύματος, ή και περισσότερο, το κύμα τείνει να ακτινοβολείται καθώς τα πεδία που ακτινοβολούνται από το ένα δεν εξουδετερώνονται αναγκαστικά από τα πεδία του άλλου και η ανοιγμένη γραμμή ενεργεί σαν κεραία που εκπέμπει ένα σφαιρικό κύμα, ελεύθερου χώρου [5], [7].

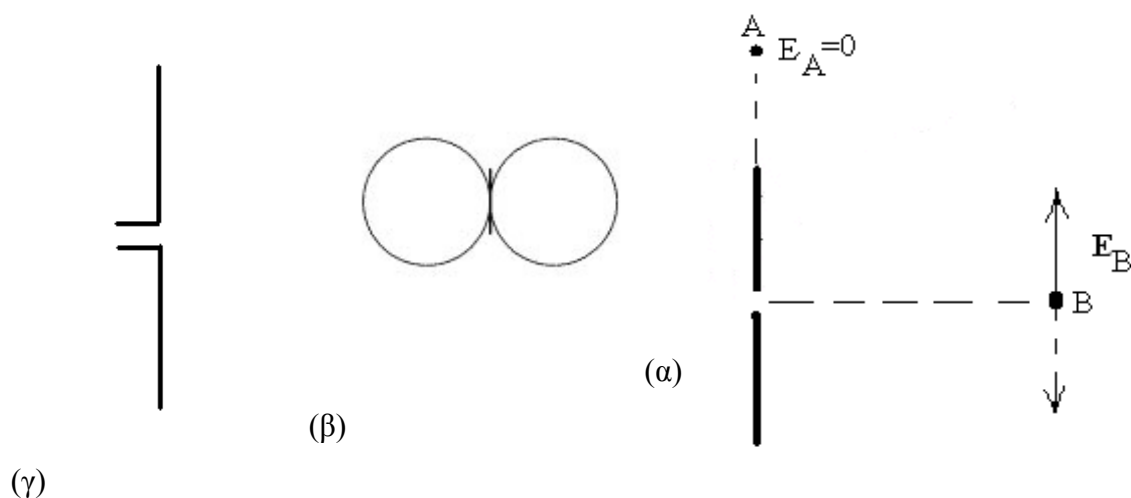


Σχ.2.1 Η κεραία σαν περιοχή μετάβασης μεταξύ ενός καθοδηγημένου κύματος από μια γραμμή μεταφοράς και ενός κύματος ελευθέρου χώρου ή αντίστροφα.

Ο τρόπος που κατανέμεται στο χώρο η ενέργεια που εκπέμπει μια κεραία περιγράφεται από το διάγραμμα ακτινοβολίας. Η χωρική μεταβολή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (E σε V/m) περιγράφεται από το διάγραμμα πεδίου κεραίας συνήθως σε μεγάλη απόσταση r από την κεραία (περιοχή μακρινού πεδίου, όπως ορίζεται παρακάτω).

Θα θεωρήσουμε μια κεραία δίπολο που αποτελείται από δύο αγωγούς μήκους $\lambda/4$ ο καθένας που διαρρέοντα από εναλλασσόμενο ρεύμα.

Σε μια τέτοια κεραία, το διάγραμμα ακτινοβολίας καθώς και η κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου E_θ σε απόσταση r μακριά από την κεραία, φαίνονται στο Σχ.2.2



Σχ.

2.2 (α) κεραία δίπολο, (β) διάγραμμα χωρικής κατανομής της ακτινοβολίας, (γ) ένταση E του ηλεκτρικού πεδίου στο σημείο A που βρίσκεται στην προέκταση του άξονα του διπόλου (διεύθυνση μηδενικής τιμής του E) και στο σημείο B που βρίσκεται κάθετα στον άξονα του διπόλου (διεύθυνση μέγιστης τιμής του E).

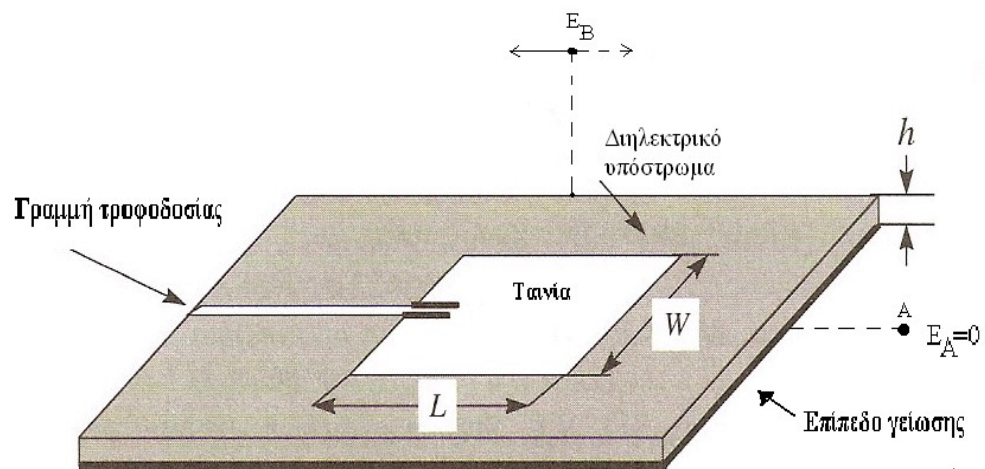
Στην παρούσα μελέτη είναι βασικό να γνωρίζουμε την διεύθυνση της κεραίας και επομένως σε ποια διεύθυνση το ηλεκτρικό πεδίο είναι μέγιστο για να τοποθετήσουμε κατάλληλα το κινητό και να επιτύχουμε τη μεγαλύτερη απορρόφηση της ακτινοβολίας του κινητού από το δείγμα.

Η κεραία του κινητού που χρησιμοποιήθηκε είναι μια μικροταινιακή κεραία (patch antenna) Σχ.2.3 που αποτελείται από μια πολύ λεπτή μεταλλική ταινία τοποθετημένη πάνω από μια επίπεδη γείωση σε ύψος h ($h \ll \lambda$ όπου λ το μήκος κύματος).

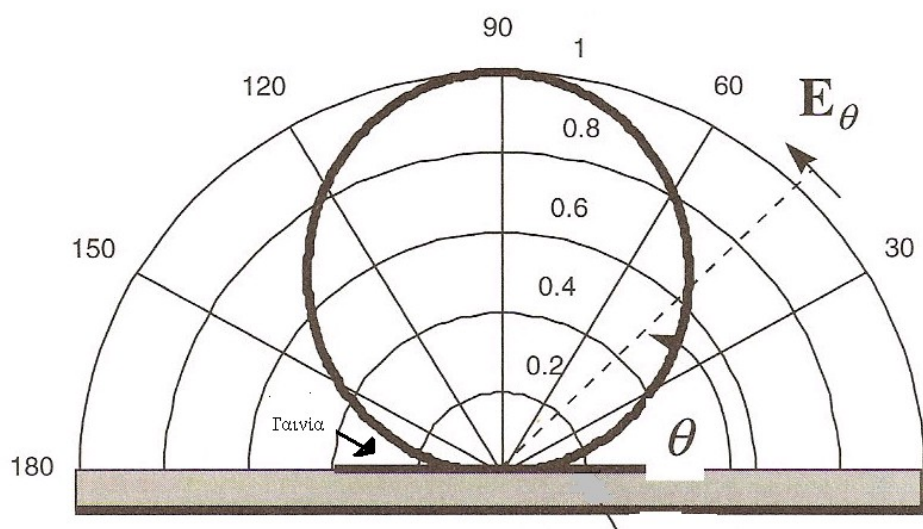
Η μικροταινία σχεδιάζεται ώστε το ηλεκτρικό πεδίο να είναι μέγιστο σε επίπεδο κάθετα στην ταινία. Η χαρακτηριστική διάσταση της μικροταινίας L είναι συνήθως $\lambda/3 < L < \lambda/2$.

Η ταινία και η γείωση χωρίζονται με ένα διηλεκτρικό υπόστρωμα.

(α)



(β)



Σχ.2.3 (α) μικροταινιακή κεραία, (β) διάγραμμα ακτινοβολίας (το επίπεδο της μικροταινίας είναι κάθετο στο χαρτί. Η διεύθυνση κάθετα στη μικροταινία είναι η διεύθυνση όπου το E είναι μέγιστο).

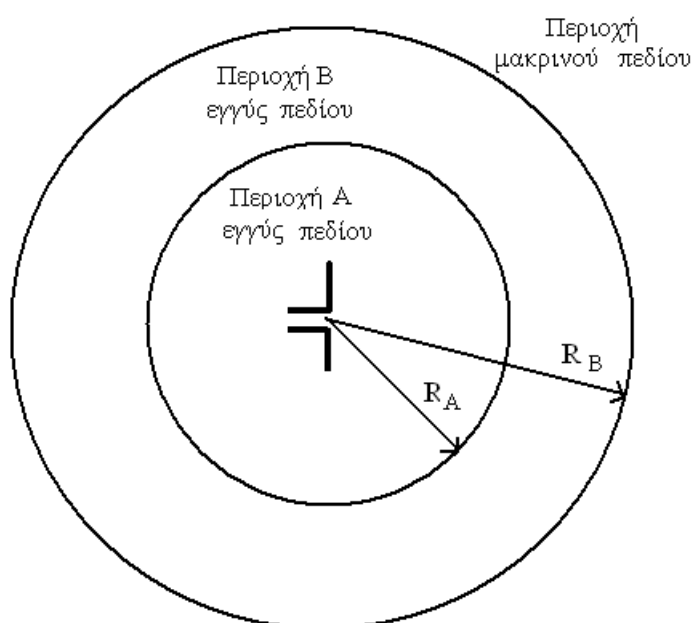
2.2 Περιοχές εγγύς και μακρινού πεδίου γύρω από μια κεραία

Γύρω από μια κεραία, ο χώρος διαιρείται σε τρεις περιοχές ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που παράγει η κεραία σε κάθε μία: [5],[13]

Περιοχή Α εγγύς πεδίου, χωρίς ακτινοβολία (Reactive near field region).

Περιοχή Β εγγύς πεδίου, με ακτινοβολία (Radiating near field region)

Περιοχή μακρινού πεδίου – επίπεδα κύματα (Far field region) (Σχ.2.4)



Σχ 2.4 Ενδεικτικά οι τρεις περιοχές πεδίου γύρω από μια κεραία. Μόνο στην εξωτερική περιοχή ($R > R_B$) το κύμα είναι επίπεδο.

Περιοχή Α εγγύς πεδίου (Reactive near field region).

Είναι η περιοχή του χώρου που περιβάλλει άμεσα την κεραία μέχρι μια απόσταση R_A . Προσεγγιστικά, για ηλεκτρικά μικρές κεραίες (λ μεγαλύτερο της χαρακτηριστικής διάστασης της κεραίας), ισχύει :

$$R_A \approx \frac{\lambda}{2\pi} \quad (2.1)$$

όπου λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας της κεραίας.

Σε αυτήν την περιοχή η ενέργεια αποθηκεύεται στο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο (όχι απαραίτητα εξίσου) πολύ κοντά στην κεραία και δεν ακτινοβολείται από αυτήν.

Γενικά όμως, για οποιαδήποτε κεραία η απόσταση R_A αυτής της περιοχής δίδεται από τη σχέση:

$$R_A < 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad (2.2)$$

όπου D η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας.

Τα όρια αυτής της περιοχής είναι προσεγγιστικά και εξαρτώνται από το σχήμα της κεραίας.

Για την παρούσα μελέτη, το μήκος κύματος στα 1800 MHz είναι: $\lambda \approx 16,7\text{cm}$ και από τη σχέση (2.1) προκύπτει:

$$R_A \approx \frac{\lambda}{2\pi} \approx 2.7\text{cm}$$

Ενώ από τη σχέση (2.2) για την παρούσα μελέτη όπου το $\lambda \approx 16,7\text{ cm}$ και $D=3\text{cm}$ προκύπτει:

$$R_A < 0.62\sqrt{3^3/16.7} \approx 0.8\text{cm}$$

Περιοχή B εγγύς πεδίου (Radiating near field region) ή περιοχή Fresnel

Είναι η περιοχή όπου η γωνιακή κατανομή του πεδίου εξαρτάται από την απόσταση από την κεραία. Εκτείνεται προσεγγιστικά σε απόσταση R_B από την κεραία ανάμεσα στα όρια του reactive near field region και του far field region:

$$R_B > 0.62\sqrt{D^3/\lambda} \quad \text{και} \quad R_B < 2D^2/\lambda \quad (2.3)$$

όπου D η μεγαλύτερη διάσταση της κεραίας.

Για ηλεκτρικά μικρές κεραίες, όπου η μεγαλύτερη διάσταση D της κεραίας είναι μικρή σε σχέση με το μήκος κύματος, η περιοχή αυτή μπορεί και να μην υπάρχει.

Για τον προσδιορισμό της μεγαλύτερης διάστασης της κεραίας, επειδή δεν είναι γνωστή από τον κατασκευαστή, αφαιρέθηκε το πίσω κάλυμμα του κινητού και μετρήθηκε το περίβλημα της κεραίας, όπου η μεγαλύτερη διάσταση του ήταν $D=3\text{cm}$

$$R_B > 0.62\sqrt{3^3/16.7} \sim 0.8\text{cm} \quad \text{και} \quad R_B < 2*3^2/16.7 \sim 1.1\text{cm} \quad (2.4)$$

Περιοχή μακρινού πεδίου (Far field region) ή περιοχή Fraunhofer.

Είναι η περιοχή του πεδίου μιας κεραίας όπου η γωνιακή κατανομή του πεδίου είναι ανεξάρτητη της απόστασης R από την κεραία. Εκτείνεται από $R=2D^2/\lambda$ έως το άπειρο. Σε αυτήν την περιοχή το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

2.3 Βασικές παράμετροι κεραιών

Για την ποσοτική περιγραφή της ανομοιογενούς κατανομής του ηλεκτρικού πεδίου γύρω από μια κεραία (διάγραμμα ακτινοβολίας) χρησιμοποιούνται διάφορες ποσότητες:

- η κατευθυντικότητα D
- η απολαβή G
- το εύρος δέσμης ακτινοβολίας.

Για να οριστεί η κατευθυντικότητα πρέπει να γίνει αναφορά σε δύο βασικές έννοιες:

α) στη στερεά γωνία και β) στην ένταση I της ακτινοβολίας

Το εμβαδό A της επιφάνειας μιας σφαίρας όπως φαίνεται από το κέντρο της σφαίρας, αντιστοιχεί σε μια στερεά γωνία Ω . Η μονάδα μέτρησης της στερεάς γωνίας είναι το στερακτίνο (steradian ή sr ή τετραγωνικά ακτίνια) .

Ένα στερακτίνο είναι η στερεά γωνία που έχει την κορυφή της στο κέντρο μιας σφαίρας ακτίνας r και υποτείνεται σε μια σφαιρική επιφάνεια που έχει το εμβαδόν ενός τετραγώνου πλευράς r . Επειδή η επιφάνεια μιας σφαίρας ακτίνας r είναι $4\pi r^2$ μια σφαίρα περιέχει $4\pi r^2 / r^2 = 4\pi$ στερακτίνια.

Η ισχύς που ακτινοβολεί μια κεραία ανά μονάδα στερεάς γωνίας ονομάζεται ένταση ακτινοβολίας I και μετράται σε Watt ανά στερακτίνο (W/sr).

Η κατευθυντικότητα είναι ένα μέτρο του πόσο αποτελεσματική είναι η κεραία να εκπέμπει την ακτινοβολούμενη ισχύ σε μια δεδομένη κατεύθυνση.

Ορίζεται από το λόγο της μέγιστης έντασης ακτινοβολίας $I(\theta, \phi)_{\max}$ προς τη μέση ένταση ακτινοβολίας I_{av} που υπολογίζεται για μια σφαίρα.

$$D = \frac{I(\theta, \phi)_{\max}}{I(\theta, \phi)_{av}} \quad (2.5)$$

ή

$$D = 4\pi / \Omega_A \quad (2.6)$$

όπου Ω_A είναι η στερεά γωνία της δέσμης .

Όσο πιο μικρή είναι η στερεά γωνία της δέσμης, τόσο πιο μεγάλη είναι η κατευθυντικότητα.

Αν μια κεραία μπορεί να ακτινοβολεί το ίδιο σε όλες τις κατευθύνσεις, τότε

$$\Omega_A = 4\pi \text{ ή } D = 1 \quad (2.7)$$

που είναι η πιο μικρή κατευθυντικότητα που μπορεί να έχει μια κεραία. Μια τέτοια κεραία λέγεται ισοτροπική (isotropic antenna).

Ενώ κατευθυντική (directional antenna) είναι η κεραία που έχει την ιδιότητα να εκπέμπει ή να λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα με περισσότερη αποτελεσματικότητα σε ορισμένες διευθύνσεις παρά σε άλλες [5].

Η απολαβή G μιας πραγματικής κεραίας εξαρτάται από την κατευθυντικότητά της D και από την απόδοσή της k σύμφωνα με τη σχέση:

$$G = k D \quad (2.8)$$

όπου ο συντελεστής απόδοσης k δεν έχει διαστάσεις και παίρνει τιμές από 0 έως 1.

Ο συντελεστής απόδοσης k συνδέεται με τις ωμικές απώλειες στην κεραία, που κατά τη διαδικασία της εκπομπής αφορούν την ισχύ που θερμαίνει τα μέρη που αποτελούν την κεραία.

Η ιστροπική κεραία έχει μηδενική απολαβή, με την ίδια ακτινοβολία σε όλες τις κατευθύνσεις. Δεν μπορεί να κατασκευαστεί, αλλά είναι χρήσιμη ως σημείο αναφοράς για να υπολογίσουμε την απολαβή και την κατευθυντικότητα μιας πραγματικής κεραίας [7].

Η γωνία μεταξύ των σημείων όπου η ακτινοβολούμενη ισχύς είναι η μισή, από αυτήν στην κεντρική κατεύθυνση του κύριου λοβού, ονομάζεται εύρος δέσμης ημίσειας ισχύος HPBW.

Κεφάλαιο 3 ΚΙΝΗΤΗ ΤΗΛΕΦΩΝΙΑ

3.1 Η ανάπτυξη του Παγκόσμιου Συστήματος Κινητών Επικοινωνιών (Global System for Mobile Communication – GSM)

Οι κινητές επικοινωνίες εμφανίστηκαν για πρώτη φορά τη δεκαετία του 1940, με τα ραδιοτηλέφωνα, όπου οι χρήστες πατώντας ένα κουμπί, μπορούσαν να μιλήσουν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας πληροφορίες.

Η χρήση τους όμως ήταν περιορισμένη σε συγκεκριμένες εφαρμογές (στρατιωτικές, επικοινωνίες πλοίων, αεροσκαφών). Την περίοδο 1962-1964 η εταιρεία Bell Systems στην περιοχή της Πενσυλβάνια των ΗΠΑ, ανέπτυξε το πρώτο δίκτυο κινητών επικοινωνιών και πήρε την ονομασία IMTS - Improved Mobile Telephone Service.

Το σύστημα αυτό αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ και στον Καναδά μέχρι και τα μέσα της δεκαετίας του 1980, επέτρεπε την αμφίδρομη επικοινωνία (full duplex) μεταξύ των συνομιλητών, χωρίς να αναγκάζονται να πιέζουν πλήκτρο στο τερματικό τους για να μπορούν να μιλούν.

Το 1969 η ίδια εταιρεία παρείχε δίκτυο κινητών επικοινωνιών στο ευρύ κοινό που λειτουργούσε στα 450 MHz βασισμένο στο πρωτόκολλο IMTS, ενώ στην Ιαπωνία από το 1967 η εταιρεία Nippon Telegraph and Telephone company (NTT) άρχισε να αναπτύσσει δίκτυο σε όλη την Ιαπωνία στην περιοχή των 800 MHz.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1980 πολλές Ευρωπαϊκές χώρες (Νορβηγία, Σουηδία, Φιλανδία, Βέλγιο, Ολλανδία, Μεγάλη Βρετανία) είχαν αναπτύξει δίκτυα κινητών επικοινωνιών βασισμένα σε πρότυπα αναλογικών επικοινωνιών που δεν ήταν όμως συμβατά μεταξύ τους. Η ανάγκη δημιουργίας συμβατών δικτύων σε όλη την Ευρώπη, καθώς οι ανάγκες για τηλεπικοινωνιακές υπηρεσίες αυξάνονταν ραγδαία, οδήγησαν την EETT - Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τηλεπικοινωνιών και Ταχυδρομείων (CEPT) να ιδρύσει μια ομάδα για την έκδοση ενός κοινού συστήματος κινητών επικοινωνιών για όλη τη Δυτική Ευρώπη. Η ομάδα αυτή ονομάστηκε Groupe Speciale Mobile, από τα αρχικά της οποίας προέκυψε το όνομα GSM. Η συντομογραφία όμως αυτή έγινε γνωστή με τον όρο Global System for Mobile Communication (GSM). Το 1987 ορίστηκαν οι συχνότητες λειτουργίας του συστήματος στην περιοχή των 900 MHz ενώ το 1992 στην περιοχή των 1800 MHz.

Έτσι ξεκίνησε η ανάπτυξη των δικτύων GSM που είναι ένα από τα πιο διαδεδομένα δίκτυα διεθνώς με εκατοντάδες εκατομμύρια συνδρομητές διεθνώς [10].

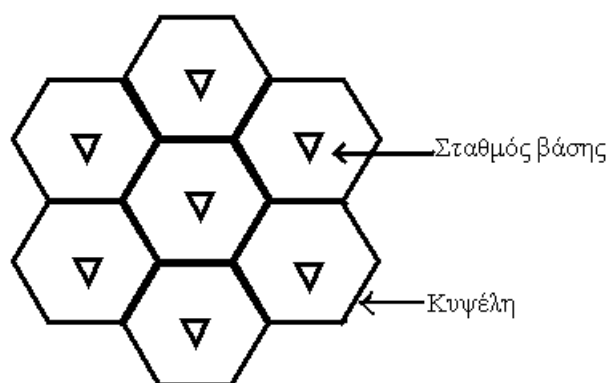
3.2 Διαδικασία σχεδιασμού των κυψελών ενός δικτύου κινητών επικοινωνιών

Οι εταιρείες που παρέχουν υπηρεσίες κινητής τηλεφωνίας διαιρούν τις γεωγραφικές περιοχές σε μικρές ανεξάρτητες περιοχές που ονομάζονται κυψέλες. Η μορφή των κυψελών για καθαρά υπολογιστικούς λόγους θεωρείται κανονικό εξάγωνο σχηματίζοντας δομή κερήθρας (Σχ. 9). Στην πράξη όμως το σχήμα τους ενδέχεται να είναι ακαθόριστο γιατί:

α) η μορφολογία του εδάφους, όπως λόφοι, δέντρα, κτήρια μπορεί να εμποδίσουν ή να εξασθενίσουν τα ραδιοκύματα.

β) δεν είναι πάντα διαθέσιμες οι κατάλληλες θέσεις για να τοποθετήσουν οι εταιρείες κινητής τηλεφωνίας τους σταθμούς βάσης τους.

γ) στις πόλεις που υπάρχει υψηλή πυκνότητα χρηστών, οι κυψέλες πρέπει να έχουν μικρότερο μέγεθος [3].

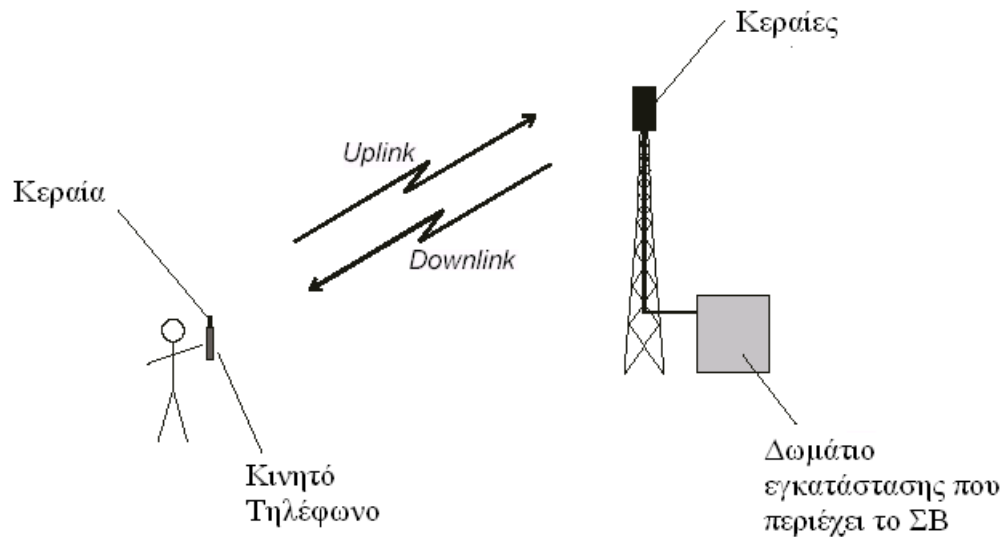


Σχ.3.1 Δομή του κυψελωτού συστήματος.

Κάθε κυψέλη έχει ένα σταθμό βάσης (ΣΒ) στην περιοχή της. Ο ΣΒ αποτελείται από κεραίες και τον απαραίτητο ηλεκτρονικό εξοπλισμό. Τοποθετείται σε ύψος που κυμαίνεται από 15 έως 60 m για να μην εμποδίζεται η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.

Οι ΣΒ και τα κινητά λειτουργούν μετατρέποντας τη φωνή, την εικόνα και γενικότερα όλα τα δεδομένα σε ραδιοκύματα που μεταδίδονται από την κεραία του ΣΒ στην κεραία του κινητού και αντίστροφα, δια μέσου του αέρα. Στους ΣΒ υπάρχουν επίσης κεραίες που αποτελούν τερματικούς κόμβους για την επικοινωνία με άλλους ΣΒ για να επιτυγχάνεται έτσι η διασύνδεση του δικτύου.

Κάθε ΣΒ λειτουργεί σε δύο περιοχές συχνοτήτων. Το ένα ζευγάρι συχνοτήτων χρησιμοποιείται για τη μεταφορά των σημάτων από τον ΣΒ προς το κινητό τηλέφωνο, (Down Link – DL) και το άλλο για να λαμβάνει σήματα από το κινητό τηλέφωνο στο ΣΒ (Up Link – UL) Σχ. 3.2. Γι' αυτό χρειάζεται τουλάχιστον ένας πομπός και ένας δέκτης [9].



Σχ.3.2 Μεταφορά σημάτων από την κεραία του κινητού τηλεφώνου στην κεραία του ΣΒ και αντίστροφα.

Ο σχεδιασμός μιας κυψέλης [9] περιλαμβάνει τον καθορισμό της θέσης που θα εγκατασταθεί ο ΣΒ, το είδος του εξοπλισμού, και τις τιμές των σχεδιαστικών παραμέτρων, όπως τύποι κεραιών, κατευθύνσεις, κλίσεις κεραιών κ.α.

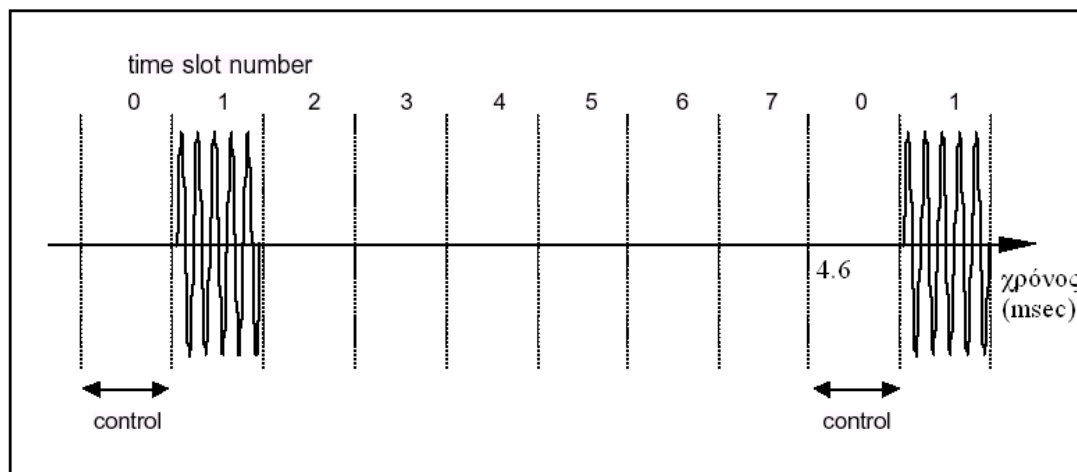
3.3 Τεχνολογία των κινητών τηλεφώνων στο GSM σύστημα

Η κινητή τηλεφωνία σύμφωνα με το GSM σύστημα, λειτουργεί στα 900 MHz και στα 1800 MHz. Οι πληροφορίες, όπως η ομιλία και τα δεδομένα, μεταδίδονται ψηφιακά.

Επίσης, και τα κινητά τηλέφωνα είναι ψηφιακά, καθώς τα σήματα που εκπέμπουν ή λαμβάνουν από το δίκτυο, είναι παλμικά [12],[13].

Η τεχνολογία που εφαρμόζεται στο GSM σύστημα, είναι η Πολλαπλή Πρόσβαση με Διάρθρωση Χρόνου, (Time Division Multiple Access – TDMA), σύμφωνα με την οποία το σήμα διαιρείται σε 217 περιόδους πληροφορίας (frames) / sec. Κάθε frame που έχει διάρκεια 4.6 ms υποδιαιρείται σε 8 χρονολωρίδες (time slots), διάρκειας 0.58ms η καθεμία .

Το πρώτο time slot, χρησιμοποιείται για έλεγχο, και καθένα από τα υπόλοιπα 7 time slots, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια ξεχωριστή τηλεφωνική κλίση. Έτσι το κινητό και ο ΣΒ μεταδίδει για 0.58ms κάθε 4.6 ms που έχει σαν αποτέλεσμα μια διαμόρφωση του παλμού στα $217 \text{ Hz} = 1/4.6 \text{ ms}$. Για τεχνικούς λόγους υπάρχει μια επιπλέον συμπίεση δεδομένων και κάθε 26^ο frame δεν μεταδίδεται, παράγοντας μια επιπλέον διαμόρφωση του παλμού της ισχύος εξόδου στα 8.34 Hz ($= 217 / 26 \text{ Hz}$) Σχ.3.3.



Σχ.3.3 Μέσα σε ένα frame (0-7 time slot) διάρκειας 4,6 msec το κινητό εκπέμπει μόνο κατά τη διάρκεια ενός time slot.

Επειδή η αποστολή των ψηφιακών δεδομένων (1,0) κάθε 4 μs γίνεται με διαμόρφωση φάσης και όχι πλάτους αυτό έχει σα συνέπεια να μην αλλάζει το πλάτος με την παραπάνω περίοδο.

Κάθε χρήστης χρειάζεται ένα κανάλι φασματικού εύρους 200 kHz. Έτσι σε ένα φασματικό εύρος συχνοτήτων 35 MHz στα 900 MHz υπάρχουν 174 κανάλια ($35\text{MHz}/200\text{KHz}=175$ ή $175-1=174$ για τεχνικούς λόγους) για να κατανεμηθούν στους χρήστες του δικτύου.

Επειδή η περίθλαση είναι μεγαλύτερη στα 900 MHz παρά στα 1800 MHz (λόγω διπλάσιου μήκους κύματος) η ακτινοβολία φτάνει πιο εύκολα π.χ. σε περιοχές πίσω από κτίρια.

Έτσι για να αποκτήσουμε την ίδια κάλυψη χρειάζονται λιγότεροι ΣΒ και λιγότερα κανάλια στα 900 MHz από ότι στα 1800 MHz.

Όμως, ακριβώς λόγω περίθλασης η μέγιστη ισχύ που απαιτείται π.χ. να εκπέμπει ένα κινητό (για να έχει την ίδια ένταση το σήμα σε κάποιο σημείο) χρειάζεται να είναι 2 W στα 900 MHz και μόνο 1W στα 1800 MHz.

Η αποκαλούμενη μέση μέγιστη ισχύς που εκπέμπει ένα κινητό είναι το 1/8 της μέγιστης ισχύος εξαιτίας της τεχνολογίας TDMA που εφαρμόζεται. Είναι δηλαδή 0.25 W στα 900 MHz και 0.125 W στα 1800 MHz αντίστοιχα.

Επιπλέον η ισχύς μειώνεται περισσότερο, επειδή το κινητό συνεχώς ρυθμίζει τη λειτουργία του ώστε η ισχύς που μεταδίδει να είναι η ελάχιστη που χρειάζεται ο ΣΒ για να λάβει ένα καθαρό σήμα (APC – Adaptive Power Control).

Τέλος η εκπεμπόμενη ισχύς μηδενίζεται, όταν ο χρήστης δεν μιλάει.

Έτσι σε κάθε τηλεφώνημα κάθε συνομιλητής είναι εκτεθειμένος στην RF ακτινοβολία που εκπέμπει το κινητό, για χρονικό διάστημα περίπου ίσο με το μισό της διάρκειας της συνομιλίας (DTX – Discontinuous Transmission).

Το κινητό εκπέμπει σε μεγαλύτερη ισχύ, όταν βρίσκεται σε μεγάλη απόσταση από το ΣΒ, ή όταν παρεμβάλλονται κτίρια.

Κεφάλαιο 4 ΒΙΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ

4.1 Βιολογικές επιδράσεις από την ακτινοβολία της κινητής τηλεφωνίας

Η RF ακτινοβολία από την κινητή τηλεφωνία απορροφάται από το ανθρώπινο σώμα μεταφέροντας ενέργεια σ' αυτό. Η μεταφορά ενέργειας προκαλεί βιολογικές επιδράσεις που μπορεί να είναι επιζήμιες στην υγεία του ανθρώπου.

Διακρίνονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες [4] :

- θερμικές βιολογικές επιδράσεις και
- μη θερμικές βιολογικές επιδράσεις

Οι επιδράσεις αυτές εκφράζονται γενικά με το **Ρυθμό Ειδικής Απορρόφησης**, ή **Specific Absorption Rate (SAR)** όπως έχει διεθνώς καθιερωθεί. Ο **SAR** αποτελεί το σημαντικότερο μέγεθος για την ποσοτικοποίηση των βιολογικών επιδράσεων των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Η ποσότητα SAR είναι ο ρυθμός που η ενέργεια εναποτίθεται σε ένα βιολογικό σώμα ανά μονάδα μάζας και μετράται σε W/Kg. Σύμφωνα με τους διεθνείς οργανισμούς για τον υπολογισμό του SAR η χρονική διάρκεια έκθεσης λαμβάνεται να είναι τα 6 min .

Για επίπεδα ηλεκτρομαγνητικά κύματα με ηλεκτρικό πεδίο E σταθερού μέτρου, ο **SAR** συνδέεται με το ηλεκτρικό πεδίο E σύμφωνα με τη σχέση:

$$SAR = \frac{1}{2} \frac{\omega \epsilon_0 \epsilon_r''}{\rho} |E|^2 \quad (4.1)$$

όπου ω είναι η γωνιακή συχνότητα ($\omega=2\pi f$) του ηλεκτρομαγνητικού κύματος, ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού, ϵ_r'' το φανταστικό μέρος της σχετικής μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς ή αλλιώς παράγοντας απωλειών (Lf, the loss factor) και ρ η πυκνότητα του ιστού σε Kg/m³. $|E|$ είναι το πλάτος του ολικού ηλεκτρικού πεδίου μέσα στον ιστό σε V/m.

Το ϵ_r'' συνδέεται με την αγωγιμότητα σ (S/m) του υλικού σύμφωνα με τη σχέση:

$$\epsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (4.2)$$

Επομένως η ποσότητα SAR σε ένα συγκεκριμένο σημείο του υλικού του ιστού μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση:

$$SAR = \frac{1}{2} \frac{\sigma |E|^2}{\rho} = \frac{\sigma E_{rms}^2}{\rho} \quad (4.3)$$

όπου E_{rms} είναι η ενεργός rms τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου.

Η τιμή του SAR εξαρτάται από πολλούς παράγοντες:

- Από τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας (συχνότητα, πόλωση, ένταση).
- Από τα χαρακτηριστικά του βιολογικού αντικειμένου, το μέγεθος, το σχήμα, τις διηλεκτρικές ιδιότητες των ιστών του.
- Από την απόσταση της πηγής που εκπέμπει την ακτινοβολία και του βιολογικού αντικειμένου (εγγύς- μακρινό πεδίο) και από τις ιδιότητες του περιβάλλοντος χώρου (φαινόμενα ανάκλασης, απορρόφησης, περίθλασης από τα γύρω αντικείμενα) [4].

4.1 α) Οι θερμικές βιολογικές επιδράσεις βασίζονται στην αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλεί η προσπίπτουσα ακτινοβολία στους ιστούς. Τα όρια ασφαλούς έκθεσης που έχουν θεσπιστεί από διάφορους οργανισμούς βασίζονται στις θερμικές βιολογικές επιδράσεις της Η/Μ ακτινοβολίας των κινητών. Έχει εξακριβωθεί [4] ότι υπάρχει επίδραση στην υγεία από την ακτινοβολία των κινητών όταν η αύξηση της θερμοκρασίας του σώματος είναι μεγαλύτερη από 1 °C. Τέτοια επίπεδα αύξησης της θερμοκρασίας εμφανίζονται όταν η τιμή του SAR για όλο το σώμα είναι περίπου 4W/Kg για 30 min .

Για λόγους ασφαλείας επομένως έχει επιλεγεί σαν όριο ασφαλούς έκθεσης σε εργαζόμενους μια μέση τιμή του SAR για όλο το σώμα 0,4W/Kg (δηλαδή μια τάξη μεγέθους μικρότερη).

Για το γενικό πληθυσμό, το όριο ασφαλούς έκθεσης ορίζει μια μέση τιμή του SAR για όλο το σώμα 0,08 W/Kg λαμβάνοντας υπόψη ότι στο γενικό πληθυσμό διαφοροποιείται η ηλικία και η κατάσταση υγείας των ανθρώπων σε σχέση με τους εργαζόμενους [4].

Στην εξίσωση 4.2 η ποσότητα ϵ_r'' εκφράζει την ικανότητα με την οποία η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα. Είναι μία ένδειξη της τριβής που αναπτύσσεται με την κίνηση των διπόλων και των φορτίων μέσα στον ιστό. Όσο αυξάνεται η τιμή του ϵ_r'' , τόσο αυξάνεται η τριβή και επομένως περισσότερη ενέργεια απορροφάται από τον ιστό.

Το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο E , προκαλεί τη δημιουργία προσωρινών διπόλων, ευθυγραμμίζει τα μόνιμα δίπολα με το πεδίο, και προκαλεί μετακίνηση των ελεύθερων φορτίων μέσα στους βιολογικούς ιστούς [15].

Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω η προσφερόμενη ενέργεια μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των φορτίων ή των πολωμένων σωματιδίων. Από την κίνηση των διπόλων και των φορτίων αναπτύσσεται τριβή που προκαλεί την αύξηση της θερμοκρασίας και συνεπώς την απορρόφηση της ενέργειας στους ιστούς του βιολογικού υλικού.

Ο ρυθμός απορρόφησης της ενέργειας W από τους ιστούς είναι:

$$\frac{dW}{dt} = mc \frac{dT}{dt} \Rightarrow \frac{dT}{dt} = \frac{dW / dt}{mc} \Rightarrow \frac{dT}{dt} = \frac{1}{c} \frac{d}{dt} \left(\frac{W}{m} \right) \quad (4.4)$$

Με βάση την εξίσωση 4.4 η ποσότητα SAR συνδέεται με το ρυθμό αύξησης της θερμοκρασίας dT/dt μέσα στον ανθρώπινο ιστό σύμφωνα με τη σχέση:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{SAR}{c} \quad (4.5)$$

όπου T είναι η θερμοκρασία σε $^{\circ}C$, t είναι ο χρόνος σε sec , c η ειδική θερμότητα του υλικού σε $J/Kg^{\circ}C$.

Η εξίσωση (4.5) ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι όλη η ενέργεια της ακτινοβολίας του κινητού απορροφάται από τον ιστό χωρίς απώλειες (π.χ. διάδοση θερμότητας με αγωγιμότητα μέσα στο υλικό του βιολογικού ιστού κ.λ.π.) [16].

Στην παραπάνω εξίσωση δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι θερμορυθμιστικοί μηχανισμοί του σώματος. Παρόλα αυτά όμως είναι μια έγκυρη προσέγγιση προσδιορισμού του άνω ορίου της αύξησης της θερμοκρασίας τοπικά, που σχετίζεται με μια συγκεκριμένη τιμή του SAR .

4.1 β) Οι **μη θερμικές επιδράσεις** προκαλούνται με όλους τους υπόλοιπους μηχανισμούς εκτός από τη μεταφορά θερμότητας. Είναι τα φαινόμενα που προκαλούνται όταν η θερμοκρασία μακροσκοπικά δεν ξεπερνά τα φυσιολογικά επίπεδα περισσότερο από $1^{\circ}C$ [35].

Ασθενή πεδία μπορούν να παράγουν ηλεκτρικά ρεύματα στην επιφάνεια ή στο εσωτερικό ενός ιστού. Όσο πιο ισχυρό είναι το πεδίο, τόσο πιο έντονα είναι τα ρεύματα που αναπτύσσονται. Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία όμως ασκούν δυνάμεις Lorentz στα

κινούμενα φορτία του ρεύματος που υπό την επίδραση αυτών των δυνάμεων εισέρχονται στα κύτταρα .

Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται μεγάλο ενδιαφέρον για πιθανά φαινόμενα καρκινογένεσης από την έκθεση στην ακτινοβολία μικροκυμάτων των κινητών τηλεφώνων. Υπάρχουν πολλές αναφορές σύμφωνα με τις οποίες η ακτινοβολία στην περιοχή των μικροκυμάτων δεν προκαλεί μετάλλαξη και δεν είναι πιθανόν να υποκινήσει καρκινογένεση [3][13]. Άλλες πάλι υποστηρίζουν τις αρνητικές επιδράσεις της ακτινοβολίας από την κινητή τηλεφωνία.

Ο Repacholi και η ομάδα του αναφέρουν ότι η έκθεση 100 αρσενικών ποντικών σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στα 900 MHz παλμικά διαμορφωμένο στα 217 Hz όπως και στην κινητή τηλεφωνία, προκαλεί διπλάσιο αριθμό περιστατικών με λέμφωμα από ότι σε 101 ποντίκια που δεν είναι εκτεθειμένα σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία [36].

Άλλες ενδείξεις **μη θερμικών βιολογικών επιδράσεων** είναι :

α) Η δέσμευση και απελευθέρωση ιόντων ασβεστίου στον εγκέφαλο [31].

Οι Adey και Bawin παρατήρησαν ότι η παρουσία παλμικά διαμορφωμένων σημάτων ραδιοσυχνότητας (450 MHz), προκαλεί την εκροή ιόντων ασβεστίου (Ca^{++}) από τα εγκεφαλικά κύτταρα σε πειραματόζωα, χωρίς να παρατηρείται αισθητή αύξηση της θερμοκρασίας στους ιστούς ($<0,1^\circ\text{C}$).

Επιπλέον έχει παρατηρηθεί αυξημένη εκροή ιόντων ασβεστίου όταν η συχνότητα των παλμών είναι 16 Hz, της τάξεως των συχνοτήτων που εκπέμπει ο εγκέφαλος (6-25Hz).

β) Στην περίπτωση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ραντάρ παρατηρείται το μικροκυματικό - ακουστικό φαινόμενο. Ο άνθρωπος που βρίσκεται κοντά στην πηγή έχει την αίσθηση ότι ακούει ήχο που τον αντιλαμβάνεται σαν βόμβο ή κρότο. Η ερμηνεία του φαινομένου αυτού στηρίζεται στην απότομη μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του εγκεφάλου που προκαλούν οι μικροκυματικοί παλμοί. Αυτή η απότομη μικρή αύξηση της θερμοκρασίας του εγκεφάλου διεγείρει τον κοχλία του αυτιού και δημιουργεί την αίσθηση του ήχου [32].

γ) Σε μια τελευταία έρευνα το 2004 από τους Sarimov R. et. al. παρατηρήθηκαν αλλαγές στη διαμόρφωση της χρωματίνης που βρίσκεται σε ανθρώπινα λεμφοκύτταρα (lempocytes) σε άτομα που είχαν εκτεθεί στην RF ακτινοβολία των κινητών τηλεφώνων (895-915 MHz).

Αυτή η αλλαγή ήταν όμοια με εκείνη που επιφέρεται από θερμικό σοκ (heat shock), σε θερμοκρασίες από $40-44^\circ\text{C}$ η οποία παραμένει πάνω από 24 ώρες μετά την έκθεση [37].

δ) Στην ίδια έρευνα, αλλά και σε επόμενες το 2005 από την Markova E. et. al. μετρήθηκε αλλαγή στη διαμόρφωση της χρωματίνης που είναι ενδεικτική στην αντίδραση του

οργανισμού στο στρες και σε γενοτοξικά φαινόμενα (genotoxic effects) και αναλύθηκε το 53BP1 (tumor suppressor p53 binding protein 1)/ γ-H2AX (phosphorylated H2AX histone) μετά από έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στα 905 MHz και στα 915 MHz σε υγιείς και σε άτομα ευαίσθητα στα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Η αλλαγή αυτή παρέμενε 72 ώρες μετά από 1 ώρα έκθεση σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και εξαρτάται από τη συχνότητα [38].

ε) Σε άλλη μελέτη [39] που έγινε στη Σαουδική Αραβία το 2002-2003, έγινε προσπάθεια να βρεθεί αν συνδέεται η χρήση κινητού με την εμφάνιση ζαλάδων, πονοκεφάλων, κόπωσης και διαταραχές στον ύπνο σε άτομα που χρησιμοποιούν το κινητό. Στη μελέτη αυτή μετείχαν 437 άτομα, που χρησιμοποιούσαν κινητό για να απαντήσουν σ' ένα ερωτηματολόγιο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπάρχει σχέση ανάμεσα στη χρήση κινητών και στην εμφάνιση προβλημάτων υγείας. Συγκεκριμένα, 21.6 % εμφάνιζαν πονοκέφαλο, 4% διαταραχές στον ύπνο, 3,9% ένταση, 3% κόπωση και 2,4% ζαλάδα. Επομένως, όπως προτείνουν οι ερευνητές, η υπερβολική χρήση κινητών, πρέπει να αποφευχθεί και να αντικατασταθεί με άλλους τρόπους επικοινωνίας. Στην ίδια μελέτη αναφέρεται ότι :

- 1) Οι Weinberger και Richter παρατήρησαν την εμφάνιση πονοκεφάλων και άλλων νευροφυσιολογικών συμπτωμάτων σε χρήστες κινητών τηλεφώνων.
- 2) Ο Hocking μελέτησε την περίπτωση 40 ατόμων που διαμαρτύρονταν για την εμφάνιση πονοκεφάλου, και την αίσθηση καψίματος μετά τη χρήση κινητού, που διαρκούσε αρκετά λεπτά ή ακόμα και ώρες μετά το κλείσιμο του κινητού.
- 3) Ο Eulitz et. al. υποστηρίζουν ότι το παλμικό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο που εκπέμπει το κινητό, διαπερνά το κρανίο και επηρεάζει την απόκριση του εγκεφάλου σε ακουστικά ερεθίσματα.
- 4) Ο Khudnitskii et. al. μελέτησαν την επίδραση της ακτινοβολίας των κινητών στο νευρικό σύστημα, στο καρδιαγγειακό σύστημα, και στις αλλαγές της θερμοκρασίας τοπικά. Βρήκαν ότι η περιοχή της κεφαλής γύρω από την κεραία του κινητού εμφάνιζε τη μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης παρατήρησαν αλλαγές σε φυσιολογικές παραμέτρους του κεντρικού νευρικού και καρδιαγγειακού συστήματος.

4.2 Δημοσιευμένες εργασίες για μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας στον ανθρώπινο ιστό.

Για την αύξηση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου ιστού (δέρμα, εγκέφαλος, οφθαλμός, κ.α.) από την RF ακτινοβολία του κινητού, έχουν γίνει διεθνώς πολλές θεωρητικές μελέτες και πειραματικές έρευνες.

4.2 α) Θεωρητικές μελέτες

Εργασία 1: *“Απορρόφηση ισχύος και αύξηση της θερμοκρασίας στο ανθρώπινο κεφάλι που προκαλείται από κινητό διπλής ζώνης με κεραία μονόπολο - έλικα”*[29].

Πρόκειται για μια θεωρητική μέθοδο που προτάθηκε από τους Bernardi et al στην Ιταλία, για τον υπολογισμό της τιμής του Ειδικού Ρυθμού Απορρόφησης – SAR και της αύξησης της θερμοκρασίας μέσα στο κεφάλι ανθρώπου, που χρησιμοποιεί κινητό τηλέφωνο διπλής ζώνης που λειτουργεί στα 900 και στα 1800 MHz στο GSM. Τα αποτελέσματά τους για διάφορες γεωμετρίες – θέσεις κινητού ως προς το κεφάλι φαίνονται στους Πίνακες 4.1 και 4.2. Ενδεικτικά παρατήρησαν ότι: στα πειράματα όπου το τηλέφωνο ήταν σε επαφή με το κεφάλι του χρήστη, η ανταλλαγή θερμότητας λόγω μεταφοράς (convection) μεταξύ του δέρματος και του αέρα εμποδίζονταν, αυξάνοντας έτσι την τοπική θέρμανση.

Μια επιπρόσθετη αιτία για την αύξηση της θερμοκρασίας στο ομοίωμα ήταν η θέρμανση του ίδιου του τηλεφώνου λόγω ωμικής θέρμανσης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων (power dissipation), και της μεταφοράς της θερμότητας που επακολουθεί με αγωγή (conduction).

Οι εκτιμώμενες τιμές του SAR μέσα στο κεφάλι φαίνονται στον Πίνακα 4.1, στα 900 MHz και στα 1800 MHz με το κινητό σε α) κατακόρυφη θέση και β) υπό κλίση.

Πίνακας 4.1 Εκτιμώμενες τιμές του SAR σε διάφορες θέσεις του κινητού [29]:

Συχνότητα [MHz]	Θέση κινητού	SAR _{1g} [W/kg]	SAR _{10g} [W/kg]	SAR _{1gBRAIN} [W/kg]
900	κατακόρυφη	2.06	1.19	0.32
	υπό κλίση	1.65	0.91	0.13
1800	κατακόρυφη	1.81	0.87	0.12
	υπό κλίση	1.08	0.56	0.06

Οι εκτιμώμενες αυξήσεις της θερμοκρασίας φαίνονται στον Πίνακα 4.2 για το αντί ΔT_{\max} και τον εγκέφαλο $\Delta T_{\max\text{BRAIN}}$ μετά από 15 min λειτουργίας του τηλεφώνου στα 900 και στα 1800 MHz όταν το κινητό ήταν κατακόρυφο και όταν είχε κάποια κλίση (double – tilting position) όταν υπάρχει μόνο η RF ακτινοβολία του κινητού-RF, λόγω επαφής με το κινητό-Contact, λόγω επαφής και ωμικής θέρμανσης των ηλεκτρικών κυκλωμάτων από το κινητό – Contact+power dissipation και λόγω επαφής + ωμικής θέρμανσης +RF ακτινοβολίας του κινητού - Contact+power dissipation+RF.

Πίνακας 4.2 Εκτιμώμενες αυξήσεις της θερμοκρασίας σε διάφορες θέσεις του κινητού [29]:

Συχν. [MHz]	Θέση	Πηγή θέρμανσης	Αντί ΔT_{\max} [°C]	$\Delta T_{\max\text{BRAIN}}$ [°C]
900	κατακ.	RF	0.221	0.061
	υπό κλίση	RF	0.136	0.023*
		Contact	1.543	0.012**
		Contact + power dissipation	1.544	0.012**
		Contact + power dissip. + RF	1.581	0.023*
1800	κατακ.	RF	0.155	0.036
	υπό κλίση	RF	0.085	0.011*
		Contact	1.543	0.012**
		Contact + power dissipation	1.543	0.012**
		Contact + power dissip. + RF	1.549	0.012**

* $\Delta T_{\max\text{BRAIN}}$ Εντοπισμένη στην πιο πάνω εξωτερική περιοχή του εγκεφάλου

** $\Delta T_{\max\text{BRAIN}}$ Εντοπισμένη στην πιο κάτω εξωτερική περιοχή του εγκεφάλου

Για την αύξηση της θερμοκρασίας στο αντί με βάση τον Πίνακα 4.2 οι συγγραφείς υπολόγισαν ότι η επιπλέον αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται από την ωμική θέρμανση είναι $0,001^{\circ}\text{C}$ ($1,544-1,543=0,001^{\circ}\text{C}$), ενώ μετά την επίδραση και της RF ακτινοβολίας η αύξηση της θερμοκρασίας ήταν $0,037^{\circ}\text{C}$ ($1,581-1,544=0,037^{\circ}\text{C}$) στα 900 MHz.

Όταν υπάρχει μόνο η RF ακτινοβολία (ένδειξη RF στον Πίνακα 4.2), η αύξηση στη θερμοκρασία είναι **0,136 °C**. Επομένως η αύξηση που προκαλείται από την RF ακτινοβολία μόνο, είναι μεγαλύτερη από την περίπτωση που η RF ακτινοβολία προστίθεται στις άλλες πηγές θερμότητας (θερμική μόνωση, έκλυση ωμικής θέρμανσης).

Εργασία 2: “Αύξηση της θερμοκρασίας στο ανθρώπινο κεφάλι από κυψελωτά τηλέφωνα και για τιμές του SAR εντός των ορίων ασφαλούς έκθεσης” [30] .

Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε από τους Gandhi Om. P., et.al. στο πανεπιστήμιο Utah στο Salt Lake στις ΗΠΑ.

Για να μελετήσουν τις θερμικές συνέπειες της έκθεσης σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από κυψελωτά τηλέφωνα στα 835 MHz και στα 1900MHz έλυσαν τη βιοθερμική εξίσωση για ένα θερμικό μοντέλο της ανθρώπινης κεφαλής. Η αύξηση της θερμοκρασίας όπως υπολογίστηκε ήταν 4,5 °C για το πτερύγιο του αυτιού (pinna), και οφείλεται στη διάδοση θερμότητας:

- α) με μεταφορά (convection) από τον εγκλωβισμένο αέρα ανάμεσα στο κινητό και το αυτί
- β) με αγωγή (conduction) από το ζεστό κινητό (39 °C) .

Για τους εσωτερικούς ιστούς όπως ο εγκέφαλος και το μάτι η αύξηση της θερμοκρασίας υπολογίζεται μικρότερη από 0,1-0,2 °C .

Δεύτερος σκοπός αυτής της μελέτης ήταν να μελετηθούν για τον ιστό του εγκεφάλου, οι θερμικές επιπτώσεις των ορίων του SAR που ισχύουν σε εργαζόμενους (8 W/Kg για κάθε 1 g, ή 10 W/Kg για κάθε 10 g ιστού) όπως προτείνουν οι οδηγίες ασφαλούς έκθεσης.

Αυτές οι τιμές του SAR οδηγούν σε μία αύξηση θερμοκρασίας για τις εκτεθειμένες περιοχές στην περιοχή του εγκεφάλου περίπου στους 0,5 °C για 10 W/Kg για κάθε 10 g ιστού.

4.2 β) Μεικτές μελέτες (Θεωρητικές –Πειραματικές)

Εργασία 1: *“Υπολογισμός της μεταβολής της θερμοκρασίας του εγκεφάλου που οφείλεται στην έκθεση ενός κινητού τηλεφώνου” [26] .*

Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε από τους Leeuwent G.M., et.al στην Ολλανδία, στο Utrecht Academic Hospital και στο εθνικό εργαστήριο αναφοράς της Ολλανδίας (TNO).

Σε αυτήν τη μελέτη, υπολογίστηκε η αύξηση της θερμοκρασίας σε ένα ομοίωμα κεφαλής, από μια κεραία δίπολο που αντιπροσωπεύει ένα κινητό τηλέφωνο. Αυτό έγινε με τη χρήση του αριθμητικού μοντέλου Finite Difference Time Domain (FDTD) για να εκτιμηθεί η κατανομή της ηλεκτρομαγνητικής ισχύος που έχει απορροφηθεί από τον ιστό και με τη χρήση του θερμικού μοντέλου Discrete Vasculature (DIVA) χρησιμοποιώντας την κλασσική εξίσωση Pennes για την περιγραφή μεταφοράς της βιοθερμότητας (bioheat) λόγω αγωγιμότητας και λόγω ροής του αίματος. Η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας του εγκεφάλου ήταν 0,11 °C για μια κεραία – δίπολο στα 915 MHz σε απόσταση 2 cm από το κεφάλι με μέση ισχύ εκπομπής 0,25W (=2W/(8 time slots) όση η μέση ισχύς που αντιστοιχεί σε κινητό στα GSM 900 MHz).

Η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας υπολογίστηκε ότι εμφανίζεται στο δέρμα. Η τιμή του SAR που χαρακτηρίζει την κατανομή της ισχύος, ήταν 1,6 W/Kg για μια μάζα 10g.

Επίσης βρέθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας στο δέρμα ήταν περίπου 0,25 °C.

Οι υπολογισμοί επιβεβαιώθηκαν, μετρώντας πειραματικά τη θερμοκρασία του δέρματος με τη βοήθεια θερμοζευγών.

4.2 γ) Πειραματικές έρευνες

Εργασία 1: *“Αρχική εκτίμηση με θερμογραφικές μετρήσεις, των θερμικών φαινομένων που επιφέρει στο ανθρώπινο κεφάλι, ένα κινητό τηλέφωνο που λειτουργεί στα 1,8 GHz”* [19].

Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε από τον D. S. Yoo στο Electronics and Telecommunications Research Institute – ETRI στην Κορέα. Μετρήθηκαν οι αλλαγές της θερμοκρασίας στο πρόσωπο ενός υγιούς εθελοντή που οφείλονταν στη λειτουργία ενός κινητού στα 1,8 GHz με μέγιστη εκπεμπόμενη ισχύ στα 240mW (=0.24W).

Μια ψηφιακή κάμερα υπέρυθρου τοποθετημένη μπροστά από τον εθελοντή, έπαιρνε υπέρυθρες εικόνες, ενώ ο εθελοντής μιλούσε στο κινητό για 20 min περίπου. Η αύξηση της θερμοκρασίας μετά από 17 min έκθεσης ήταν μεταξύ 0,25 °C και 1,11 °C. Επιπλέον όσο αυξάνονταν η διάρκεια της ομιλίας, μεγάλωνε και η αύξηση της θερμοκρασίας. Η αύξηση της θερμοκρασίας ήταν μεγαλύτερη στην περιοχή που το κινητό ήταν σε επαφή με το πρόσωπο, δηλαδή στο αυτί και στο μάγουλο.

Σε αυτό το πείραμα δεν μπόρεσαν να κάνουν διαχωρισμό της αύξησης της θερμοκρασίας που οφείλονταν στην RF ακτινοβολία από την αύξηση της θερμοκρασίας που οφείλονταν στη θερμότητα που παράγεται από την μπαταρία και στη θερμότητα του ανθρώπινου σώματος.

Εργασία 2: *“Θερμική ζημία του δέρματος και χρήση κινητού τηλεφώνου”* [27].

Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε από τους Elabbassi και Seze, στη Γαλλία.

Η μέτρηση της θερμοκρασίας του δέρματος έγινε με ένα θερμόμετρο οπτικών ινών Luxtron 790 με ακρίβεια μέτρησης $\pm 0,1$ °C. Το κινητό λειτουργούσε στα GSM 1800 MHz με εκπεμπόμενη ισχύ 125 mW. Το κινητό ήταν σε επαφή με το μάγουλο, όπως χρησιμοποιείται σε μια συνηθισμένη ομιλία, για 30 min για να φτάσει σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Οι ερευνητές αναφέρουν ότι όταν ήθελαν να αφαιρέσουν την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του κινητού από τις υπόλοιπες πηγές θερμότητας έβαζαν στη θέση της κεραίας ένα ωμικό φορτίο (load) 50 Ω.

Όταν το κινητό ήταν κλειστό, η αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος ήταν 1,88 °C. Αυτό οφείλεται στη μείωση των απωλειών θερμότητας από το δέρμα, καθώς το

κινητό είναι σε επαφή με αυτό και περιορίζονται οι απώλειες θερμότητας λόγω μεταφοράς (convection).

Όταν το κινητό ήταν ανοιχτό σε κατάσταση αναμονής (reception mode) η αύξηση ήταν 2,93 °C, σε κατάσταση εκπομπής χωρίς φορτίο, ήταν 3,29 °C και σε κατάσταση εκπομπής με φορτίο ήταν 3,31 °C. Η διαφορά στην αύξηση της θερμοκρασίας με ή χωρίς φορτίο δεν ήταν σημαντική. Αυτό σημαίνει ότι η συνεισφορά για τη θέρμανση του δέρματος από την απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ήταν αμελητέα.

Η υψηλότερη αύξηση της θερμοκρασίας που ανιχνεύεται σ' αυτά τα πειράματα είναι πολύ μικρή, μικρότερη από την αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Αυτή η τοπική αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος ενεργοποιεί τους θερμορυθμιστικούς μηχανισμούς (διαστολή των αιμοφόρων αγγείων, εφύγγραση του δέρματος).

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αίσθηση θέρμανσης που αναφέρθηκε από τους χρήστες κατά τη διάρκεια μακράς τηλεφωνικής κλίσης των κινητών, προκαλείται από θερμική μόνωση και από μεταφορά θερμότητας λόγω αγωγιμότητας (conduction) και όχι από την απορρόφηση της (χαμηλής) RF ακτινοβολίας του κινητού.

Εργασία 3: *“Αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος που προκαλείται από ένα κινητό τηλέφωνο: Μία μεθοδολογική μελέτη με κάμερα υπερύθρου” [20].*

Η έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε από τους Straume et. al., στο Norwegian University of Science and Technology (NTNU) και στο Sor-Trondelag University College (HiST) στη Νορβηγία. Στην έρευνα αυτή χρησιμοποιήθηκε μια κάμερα υπερύθρου για τη μέτρηση της αύξησης της θερμοκρασίας του δέρματος, από ένα κινητό που λειτουργεί στα GSM 900 με σκοπό να βρεθεί κατά πόσο συνεισφέρουν σ' αυτήν την αύξηση οι ακόλουθοι παράγοντες:

- Θερμική μόνωση από το κινητό.
- Θέρμανση του κινητού από την έκλυση της ηλεκτρικής ισχύος του.
- Θέρμανση από την έκθεση σε RF ακτινοβολία.

Ένας υγιής άνδρας κρατούσε το κινητό σε κανονική θέση,

α) όταν το κινητό ήταν κλειστό, β) όταν το κινητό ήταν ανοιχτό αλλά η κεραία είχε αντικατασταθεί από μια αντίσταση 50 Ω για να εμποδίσει την RF ακτινοβολία του κινητού και γ) όταν το κινητό ήταν ανοιχτό εκπέμποντας RF ακτινοβολία.

Η ισχύς εξόδου του κινητού ήταν σταθερή, στην ελάχιστη (0,002W) και στη μέγιστη τιμή (0,21 W) λειτουργίας του κινητού. Οι μεταβολές στη θερμοκρασία του δέρματος υπολογίστηκαν μετά από 15 και 30 min συγκρίνοντας τις εικόνες που ελήφθησαν από την πλευρά του κεφαλιού που ήταν εκτεθειμένο στο κινητό σε σχέση με αυτές που ελήφθησαν από την άλλη πλευρά που δεν ήταν εκτεθειμένο στο κινητό.

Η θερμική μόνωση και η θέρμανση του κινητού λόγω έκλυση της ηλεκτρικής ισχύος του, οδήγησαν σε σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος, ενώ δεν ήταν σημαντική η αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος λόγω της RF ακτινοβολίας.

Πίνακας 4.3 Πειραματικές τιμές αύξησης της θερμοκρασίας για το μάγουλο και το αυτί

t (min)	ΔT °C μάγουλο				ΔT °C αυτί			
	Ελάχιστη ισχύ		Μέγιστη ισχύ		Ελάχιστη ισχύ		Μέγιστη ισχύ	
	Με φορτίο	Με RF	Με φορτίο	Με RF	Με φορτίο	Με RF	Με φορτίο	Με RF
15	2,6	2,7	3,5	3,6	2,4	2,5	3,7	3,8
30	3,3	3,3	4,4	4,7	3,1	3,3	4,7	5,0

Εργασία 4: “Μετρήσεις της θερμοκρασίας της επιφάνειας του δέρματος κατά τη διάρκεια λειτουργίας κινητού τηλεφώνου”[25].

Η πολύ πρόσφατη έρευνα αυτή πραγματοποιήθηκε από τους Anderson (Αυστραλία) και Rowley (Ιρλανδία). Μετρήθηκε η αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος στο πρόσωπο μετά από 6 min λειτουργίας κινητού τηλεφώνου, χρησιμοποιώντας δύο μοντέλα αναλογικών τηλεφώνων AMPS στα 835 MHz και τρία μοντέλα ψηφιακών τηλεφώνων GSM στα 900 MHz. Η σύγκριση των θερμοκρασιών του δέρματος που ήταν εκτεθειμένα στην RF ακτινοβολία με αυτά που δεν ήταν εκτεθειμένα, έγινε με εικόνες που ελήφθησαν από κάμερα υπερύθρου. Για βαθμονόμηση του συστήματος μετρήθηκε η θερμοκρασία με θερμόμετρο (Fluke 80T) ακρίβειας $\pm 0,1$ °C . Για τα GSM ψηφιακά τηλέφωνα η μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας ήταν 2,3 °C, ενώ για τα αναλογικά τηλέφωνα ήταν 4,5 °C.

Η διαφορά αυτή στην αύξηση της θερμοκρασίας, οφείλεται στην ισχύ λειτουργίας των τηλεφώνων, που ήταν 250 mW για τα ψηφιακά τηλέφωνα και 600 mW για τα αναλογικά τηλέφωνα. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής υποδηλώνουν ότι η συνεισφορά της RF ακτινοβολίας στην αύξηση της θερμοκρασίας του δέρματος είναι πολύ μικρή και η μεγαλύτερη συνεισφορά οφείλεται στη διάδοση θερμότητας λόγω αγωγιμότητας από το κινητό.

Κεφάλαιο 5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

5.1 Επιλογή του κατάλληλου υλικού - δείγματος

Κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι να επιχειρηθεί να μετρηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας που οφείλεται στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ενός κινητού, που εκπέμπει στην περιοχή μικροκυμάτων κάτω από απλές και ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες. Αυτό είναι απαραίτητο γιατί η αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου ιστού είναι μικρή άρα δύσκολο να ανιχνευτεί [20], [25],[29],[30].

Απαιτούνται δηλαδή επαναλαμβανόμενα πειράματα ενδεχομένως μακράς διάρκειας (~30 min κάθε φορά) και γι αυτό δε συνιστάται η χρήση ανθρώπου.

Ένας άλλος λόγος που αποφασίστηκε, αντί για ανθρώπινο ιστό, η χρήση υλικών που έχουν παρόμοιες (και γνωστές) διηλεκτρικές ιδιότητες στην περιοχή των μικροκυμάτων που εκπέμπει το κινητό, είναι επειδή στον άνθρωπο εμφανίζονται ανεξέλεγκτοι μηχανισμοί απαγωγής θερμότητας (κυκλοφορία αίματος, εφίδρωση) [40].

Εδώ από τις διηλεκτρικές ιδιότητες υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης α των υλικών για να επιλεγεί ένα από αυτά σαν καταλληλότερο ως δείγμα.

5.2 Υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης υλικών στις συχνότητες λειτουργίας των κινητών

Στην παρούσα εργασία, για την επιλογή του κατάλληλου δείγματος είναι απαραίτητη η γνώση ή ο υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης του δείγματος, στις συχνότητες ακτινοβολίας των κινητών.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση ο συντελεστής απορρόφησης υπολογίστηκε από τιμές της μιγαδικής σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς (complex relative permittivity) γνωστές από τη βιβλιογραφία. Ο υπολογισμός έγινε από πρώτες αρχές όπως αναπτύσσεται παρακάτω:

Η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσα σε ύλη που το απορροφά, οδηγεί σε εξασθένιση του κύματος που εκφράζεται [14] με το μιγαδικό δείκτη διάθλασης του υλικού \mathbf{n} (complex refractive index), ο οποίος δίδεται από την εξίσωση :

$$\mathbf{n} = n + ik \quad (5.1)$$

όπου n το πραγματικό μέρος που ονομάζεται δείκτης διάθλασης (refractive index) και ισούται με το λόγο c_0/c των ταχυτήτων του φωτός στο κενό προς την ταχύτητα του φωτός στο μέσο διάδοσης, και k το φανταστικό μέρος που ονομάζεται δείκτης απορρόφησης (absorption index) του υλικού.

Για τη μαθηματική περιγραφή της εξασθένισης που προκαλείται από την απορρόφηση στο υλικό ορίζεται μια νέα φυσική ποσότητα ο συντελεστής απορρόφησης α του υλικού :

$$\alpha = 4\pi k / \lambda \quad (5.2)$$

όπου λ το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Για τη χρήση του παραπάνω τύπου είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του δείκτη απορρόφησης k .

Οι διηλεκτρικές ιδιότητες ενός υλικού δίνονται από τη μιγαδική σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ (complex relative permittivity) [17],[21],[22]:

$$\epsilon = \epsilon' + i\epsilon'' \quad (5.3)$$

όπου ϵ' το πραγματικό μέρος της σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς (relative permittivity) και όπου ϵ'' το φανταστικό μέρος (ή $Lf = \text{loss factor}$, παράγοντας απωλειών).

Ο λόγος του φανταστικού προς το πραγματικό μέρος είναι η εφαπτομένη απωλειών (loss tangent):

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (5.4)$$

Όλα τα παραπάνω μεγέθη εξαρτώνται από το μήκος κύματος λ της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Ο δείκτης διάθλασης n και η διηλεκτρική σταθερά ε συνδέονται με τη σχέση [18]:

$$n^2 = \varepsilon \quad (5.5)$$

από την οποία προκύπτει ότι :

$$n^2 - k^2 + i2nk = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (5.6)$$

$$\text{άρα} \quad \varepsilon' = n^2 - k^2 \text{ και } \varepsilon'' = 2nk \quad (5.7)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει μια εξίσωση τετάρτου βαθμού :

$$(\lambda^4 / 16\pi^2) \alpha^4 + \varepsilon' \lambda^2 \alpha^2 - 4\pi \varepsilon'' = 0 \quad (5.8)$$

η λύση της οποίας μας δίνει το συντελεστή απορρόφησης α του υλικού :

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\varepsilon' (\sqrt{(1 + \tan^2 \delta)} - 1)}{2}} \quad (5.9)$$

Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφονται οι τιμές του συντελεστή απορρόφησης α , για διάφορα υλικά που εξετάστηκαν, όπως υπολογίστηκαν με βάση την παραπάνω σχέση, στις συχνότητες λειτουργίας του κινητού για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας θ .

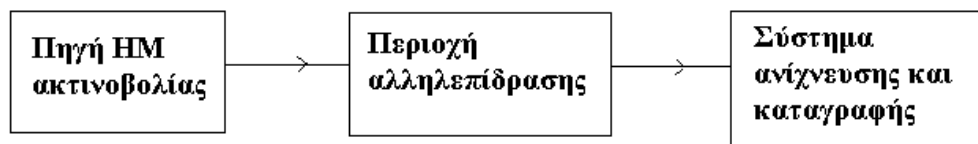
Πίνακας 5.1 Συντελεστής απορρόφησης υλικών στις συχνότητες λειτουργίας των κινητών

Υλικά	Θερμοκρασία	Συχνότητα	Μήκος κύματ.	Παράγοντ απωλειών	Permittivity	Loss tangent	Συντελεστής απορρόφησης	
	θ (°C)	f (GHz)	λ (cm)	L_f	$\epsilon' r$	$\tan(\delta)=L_f/ \epsilon' r$	α (cm ⁻¹)	Ref.
νερό	25	1,8	16,67	6	76	0,079	0,259	[17]
νερό	25	1,7	17,65	6,64	76,92	0,086	0,269	[17]
νερό	0	1,8	16,67	12	82	0,146	0,498	[21]
διάλ. NaCl 10ppt	25	1,8	16,67	28,000	84	0,429	1,449	[17]
γυαλί	25	1	30	0,09	5,8	0,016	0,008	[22]
γυαλί	25	2,5	12	0,09	5,7	0,016	0,020	[22]
πολυστερίνη	25	1	30	0,0008	2,55	0,0008	0,000105	[22]
πολυστερίνη	25	2,5	12	0,0008	2,55	0,0008	0,000105	[22]
PVC	20	1	30	0,016	2,85	0,006	0,002	[22]
αιθυλική αλκοόλη	25	1	30	3	12	0,250	0,180	[22]
αιθυλική αλκοόλη	20	1,8	16,67	8,4	8	1,050	1,011	[14]
δέρμα	20	1,8	16,67	9,986	38,4	0,260	0,602	[14]
λίπος	20	1,8	16,67	0,67	4,51	0,148	0,119	[34]
αίμα	20	1,8	16,67	22,821	54,18	0,421	1,144	[34]
μυς	20	1,8	16,67	18,393	57,03	0,323	0,906	[34]
νεύρα	20	1,8	16,67	8,666	32,09	0,270	0,571	[34]

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι υπάρχουν υλικά με συντελεστή απορρόφησης περίπου ίσο με αυτόν του δέρματος όπως η αιθυλική αλκοόλη. Άρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν δείγμα το οποίο μάλιστα απορροφά περισσότερο και θα είναι πιο εύκολα μετρήσιμη η αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί διάλυμα NaCl που έχει και αυτό μεγάλο συντελεστή απορρόφησης.

Κεφάλαιο 6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για τη μελέτη τοποθετούμε το κινητό δίπλα σε ένα υλικό – δείγμα που απορροφά ενέργεια στις συγκεκριμένες συχνότητες της ακτινοβολίας του κινητού όπως φαίνεται στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα:



Σχ.6.1 Περιγραφή πειραματικής διάταξης

6.1 Πηγή Η/Μ ακτινοβολίας (κινητό)

Το κινητό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το μοντέλο 2100 της Nokia που λειτουργεί στη συχνότητα GSM 1800 MHz με εσωτερική κεραία. Η κεραία του κινητού είναι μια patch antenna δηλαδή μία ταινία που έχει διαστάσεις 3cm x 1.5 cm.

6.1α) Υπολογισμός ισχύος μικροκυμάτων που εκπέμπει το κινητό

Επειδή η απόσταση της κεραίας του κινητού από το δείγμα είναι μερικά εκατοστά και όπως προελέχθει η περιοχή λειτουργίας της είναι στο όριο μεταξύ εγγύς και μακρινού πεδίου, η μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου ή της ισχύος του, απαιτεί ένα πολύ ακριβό και ειδικά βαθμονομημένο όργανο μέτρησης που δεν υπήρχε.

Έτσι στις μετρήσεις που έγιναν χρησιμοποιείται μια κεραία HyperLog 7040 της Aaronia και ένας αναλυτής φάσματος GSP 830 της Instek. Οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου που μετρήθηκαν σε απόσταση 3,5 cm από την κεραία του κινητού ήταν ~5V/m με το κινητό σε κατάσταση συνομιλίας .

Από πρώτες αρχές και θεωρώντας ότι αυτό το ηλεκτρικό πεδίο παριστά επίπεδο κύμα, η ένταση της ακτινοβολίας θα ήταν 66 mW/m² και η συνολικά εκπεμπόμενη ισχύς 0,5 mW.

Εναλλακτικά η μέση μέγιστη ισχύς ενός κινητού στα 1800 MHz είναι 125 mW προς όλες τις διευθύνσεις και περίπου 62,5 mW προς τα εμπρός. Όπως ήδη ελέχθει τα κινητά

ρυθμίζουν αυτόματα την εκπεμπόμενη ισχύ στην ελάχιστη απαραίτητη, για την επικοινωνία με το σταθμό βάσης. Μια λογική υπόθεση είναι να δεχτούμε ότι η ισχύς του κινητού είναι μεταξύ 0,5 και 62,5 mW.

6.1β) Υπολογισμός ισχύος μικροκυμάτων που φτάνει στο δείγμα

Επειδή η κεραία του κινητού βρίσκεται σε πολύ μικρή απόσταση από το δείγμα δεν μπορούμε να τη θεωρήσουμε σημειακών διαστάσεων και κάθε τμήμα της κεραίας απέχει διαφορετική απόσταση από το δείγμα. Επομένως ακτινοβολία διαφορετικής έντασης θα φτάνει στο δείγμα από κάθε τμήμα της κεραίας.

Έτσι υποθέτοντας ότι η κεραία είναι ισοτροπική, [41] δηλαδή εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία το ίδιο προς όλες τις διευθύνσεις τη χωρίζουμε σε 18 τμήματα (3 x 6), επιφάνειας 0.5 cm x 0.5 cm το καθένα.

Τοποθετούμε ένα κυλινδρικό δείγμα ύψους $h = 2,5$ cm και διαμέτρου $d = 1$ cm σε απόσταση $R = 3,5$ cm από την κεραία. Η ισχύς που φτάνει στο δείγμα από τα 62,5 mW που εκπέμπει το κινητό είναι:

$$W = \frac{62.5mW / 18}{2\pi} \sum_{i=1}^{18} \frac{1}{R_i^2} * E_{\text{δείγματος}} \approx 1,9mW \quad (6.1)$$

Διαιρούμε με 18 γιατί θέλουμε να υπολογίσουμε τη συνεισφορά πάνω στο δείγμα του καθενός από τα 18 τμήματα στα οποία διαιρέθηκε η κεραία. Αν θεωρούσαμε ότι κάθε τμήμα της κεραίας απέχει την ίδια απόσταση από το δείγμα και επομένως θα έφτανε στο δείγμα ακτινοβολία ίδιας έντασης από κάθε τμήμα της κεραίας, τότε η ισχύς που θα έφτανε στο δείγμα θα ήταν :

$$W = \frac{125mW / 2}{2\pi R^2} * E_{\text{δείγματος}} \approx 2,1mW \quad (6.2)$$

6.2 Δείγμα - περιοχή αλληλεπίδρασης μικροκυμάτων με υλικά

Αυτό που ενδιαφέρει στη χρήση των κινητών είναι η αύξηση της θερμοκρασίας στον ανθρώπινο ιστό .

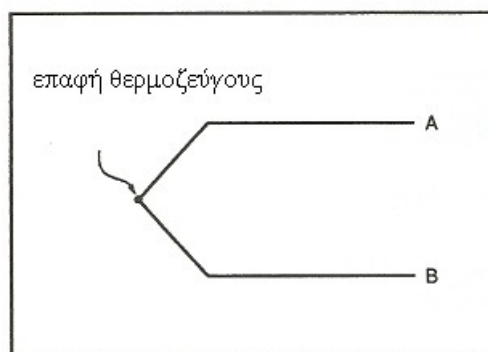
Όπως ήδη αναφέρθηκε δε συνιστάται η χρήση ανθρώπου διότι η έκθεση είναι και επαναλαμβανόμενη και για πολύ χρόνο (~30 min κάθε φορά) και μειώνεται από τους μηχανισμούς απαγωγής θερμότητας (κυκλοφορία αίματος, εφίδρωση).

Διερευνήθηκε επομένως αντί για ανθρώπινο ιστό, η εύρεση και χρήση υλικών που έχουν παρόμοιες (και γνωστές) διηλεκτρικές ιδιότητες στην περιοχή των μικροκυμάτων που εκπέμπει το κινητό. Από τα υλικά που αναφέρονται στον Πίνακα 5.1 επελέγησαν ως δείγματα υλικά που έχουν τον ίδιο περίπου συντελεστή απορρόφησης για την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία των κινητών με αυτόν που έχει ο ανθρώπινος ιστός.

Ως δείγμα αρχικά επελέγη το νερό επειδή είναι γνωστό (λειτουργία φούρνων μικροκυμάτων), ότι στην περιοχή των μικροκυμάτων το νερό απορροφά ενέργεια που αντιστοιχεί στις εν λόγω συχνότητες και επειδή το νερό δεν αλλάζει σύσταση με το χρόνο κάτι που είναι αναγκαίο για την επαναληψιμότητα και την αξιοπιστία του συστήματος.

6.3 Αισθητήρας ανίχνευσης θερμοκρασίας (θερμοζεύγος)

Η μέτρηση της θερμοκρασίας έγινε με τη βοήθεια θερμοζεύγους τύπου K με δυο αγωγούς A και B . Ο A είναι κατασκευασμένος από Ni / Cr και ο B από Ni /Al.



Σχ.6.2 Αισθητήρας ανίχνευσης θερμοκρασίας

Η αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους βασίζεται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο .

Η ανακάλυψη του φαινομένου αυτού έγινε από το φυσικό Thomas Johann Seebeck που παρατήρησε την ύπαρξη διαφοράς δυναμικού στα άκρα ενός αγωγού (έστω A όπως φαίνεται στο Σχ. 6.2) όταν αυτά βρίσκονταν σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

Για να μετρηθεί αυτή η διαφορά δυναμικού συνδέουμε ένα άλλο αγωγό (έστω B) στο ζεστό για παράδειγμα άκρο του πρώτου. Έτσι και τα άκρα του δεύτερου βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία διαφορά δυναμικού στα άκρα του δεύτερου που είναι αντίθετης πολικότητας με την αρχική. Το μέγεθος του φαινομένου εξαρτάται από τα μέταλλα που χρησιμοποιούνται.

Χρησιμοποιώντας ένα τρίτο αγωγό που συνδέει τα δύο ελεύθερα άκρα των A και B, δημιουργείται κύκλωμα, ένα κύκλωμα όπου στα δυο του άκρα δημιουργούνται διαφορές δυναμικού αντίθετης πολικότητας, και η τάση που θα μετρηθεί θα είναι η (μικρή) διαφορά αυτών των δύο τάσεων. Αυτή η διαφορά των τάσεων αυξάνεται με τη θερμοκρασία και τυπικά κυμαίνεται από 1 έως και 70 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Στη ζεύξη των μετάλλων οφείλεται και η ονομασία «θερμοζεύγος».

Τα θερμοζεύγη μετράνε τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο σημεία και όχι την απόλυτη τιμή της θερμοκρασίας. Η σχέση ανάμεσα στη διαφορά θερμοκρασίας ΔT και στην τάση εξόδου V ενός θερμοζεύγους δεν είναι γραμμική και δίδεται από τη σχέση:

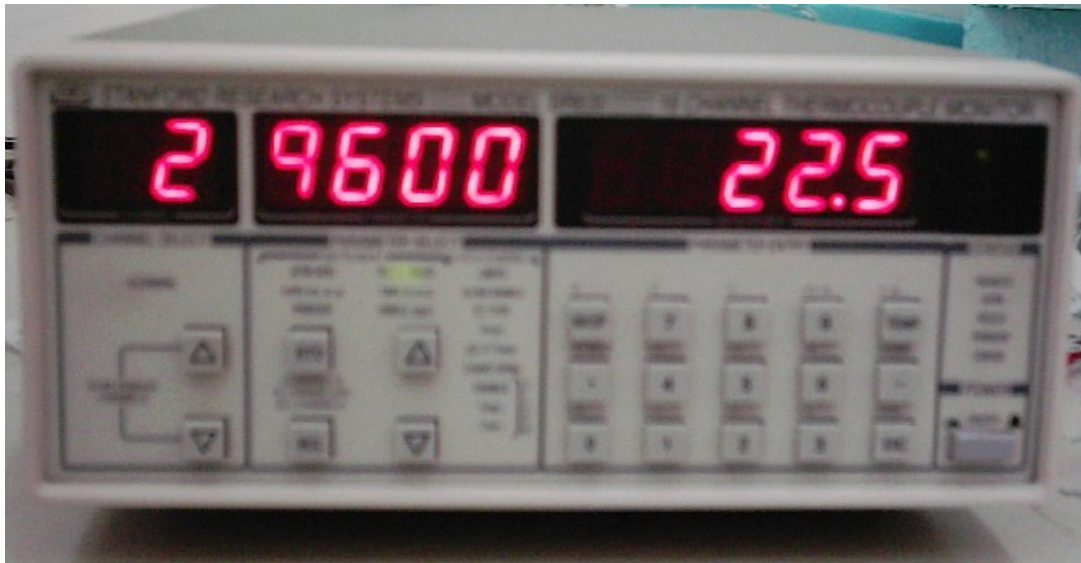
$$\Delta T = \sum_{n=0}^N \alpha_n V^n \quad (6.3)$$

Οι συντελεστές α_n , για δεδομένη τιμή του n , παίρνουν τιμές από μηδέν έως μεταξύ πέντε και εννέα. Η ευαισθησία του θερμοζεύγους τύπου K που χρησιμοποιούμε είναι περίπου 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$.

6.4 Σύστημα καταγραφής και επεξεργασίας των δεδομένων

Για την καταγραφή των θερμοκρασιών χρησιμοποιείται ένα Thermocouple monitor. Το συγκεκριμένο μοντέλο SR 630 είναι του οίκου SRS (Stanford Research Systems) όπως φαίνεται στο σχήμα και έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με 16 θερμοζεύγη για ταυτόχρονη μέτρηση της θερμοκρασίας με το χρόνο σε 16 δείγματα.

Η καταγραφή των δεδομένων έγινε με τη βοήθεια ενός υπολογιστή, που έχει συνδεθεί με το thermocouple monitor SR 630, και του κατάλληλου προγράμματος σε γλώσσα Basic.



Σχ.6.3 Μονάδα καταγραφής θερμοκρασίας SRS (Stanford Research Systems) 630.

Κεφάλαιο 7 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

7.1 Στάδια μετρήσεων

Στα πειράματα που έγιναν στα διάφορα στάδια της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκαν διάφορα υλικά για την απορρόφηση των μικροκυμάτων του κινητού. Τα πειράματα μπορούν να ταξινομηθούν στα ακόλουθα στάδια:

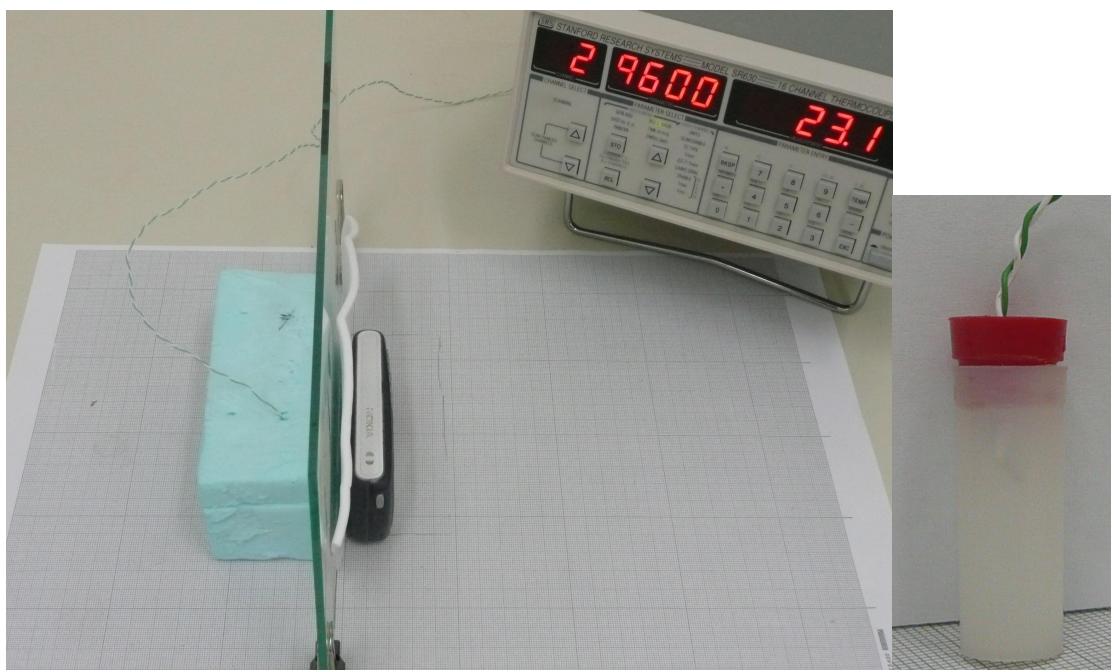
- Αρχικά το δείγμα ήταν μια ποσότητα νερού, 29,5 gr σε κλειστό σχεδόν κυλινδρικό δοχείο πολυστερίνης. Για να αυξηθεί ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας $\Delta\theta/\Delta t$

του δείγματος, δεδομένου ότι $\frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{\dot{Q}}{mc}$, η ποσότητα του νερού μειώθηκε στα 9gr

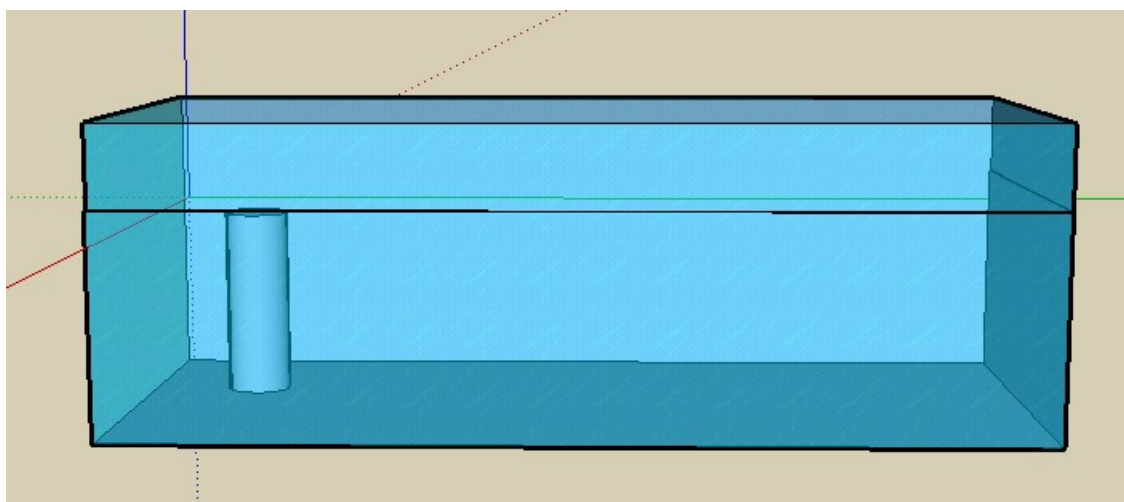
και κατόπιν στα 8 gr και τοποθετήθηκε σε δοχείο πολυστερίνης με διπλά τοιχώματα στην παράπλευρη επιφάνεια για να αυξηθεί η μόνωση του δείγματος και να μειωθούν οι απώλειες.

Επίσης το δείγμα τοποθετήθηκε σε διάφορες θέσεις ως προς την κεραία του κινητού για να βρεθεί πότε παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση στο ρυθμό μεταβολής της θερμοκρασίας του.

- Στο δεύτερο στάδιο μετρήσεων, στο δείγμα των 8ml H₂O προστέθηκαν 0,3 gr αλάτι, για να αυξηθεί η απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του κινητού όπως αναμένεται από τις τιμές του Πίνακα 5.1 και σαν αποτέλεσμα να αυξηθεί και η θερμοκρασία του δείγματος αφού η παρατηρούμενη αύξηση δεν ήταν σημαντική.
- Στο τρίτο στάδιο μετρήσεων, σε μια προσπάθεια να αυξηθεί ο ρυθμός μεταβολής της θερμοκρασίας, η ποσότητα του νερού μειώθηκε στα 1,5ml. Επιπλέον τοποθετήθηκε σε πλαστικό κυλινδρικό δοχείο μάζας 1,3 gr μονωμένο εξωτερικά με πολυστερίνη αυξημένου πάχους 0,5 cm και έτσι το δείγμα με τη μόνωση απόκτησε εξωτερικά σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου.
- Επειδή όμως η μάζα του περιβλήματος του δείγματος είναι συγκρίσιμη με τη μάζα του δείγματος και απορροφά ένα μέρος της ενέργειας που προσφέρεται στο δείγμα, αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επηρεάζει τη θερμοκρασία του δείγματος. Έτσι στο τέταρτο στάδιο το δείγμα των 1,5ml H₂O τοποθετήθηκε σε λεπτότοιχη διαφανή πλαστική σακούλα μάζας 0,05gr μέσα σε δοχείο πολυστερίνης σκεπασμένο με ένα δεύτερο δοχείο πολυστερίνης. Στο στάδιο αυτό επιβεβαιώθηκε ότι η κατά τη λειτουργία του κινητού αύξηση της θερμοκρασίας του περιβλήματος του ήταν σημαντική και επηρέαζε τη θερμοκρασία του δείγματος με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η παρατήρηση τυχόν μεταβολής της θερμοκρασίας του δείγματος λόγω της RF ακτινοβολίας του κινητού.
- Έτσι στο πέμπτο στάδιο μετρήσεων παρεμβλήθηκε ένα κομμάτι γυαλί 7x14 cm² πάχους 3mm για την εξουδετέρωση μέσω απορρόφησης στο γυαλί, της ανεπιθύμητης θερμικής ακτινοβολίας από το περίβλημα του κινητού. Η θερμοκρασία του περιβλήματος αυξάνονταν περίπου 12 °C σε 30 min, και είναι γνωστό από τη βιβλιογραφία ότι το γυαλί απορροφά ισχυρά την παραπάνω θερμική ακτινοβολία στο υπέρυθρο [23] όπως αναφέρεται παρακάτω (Πίνακας 8.1).
Για καλύτερη μόνωση και για ευκολότερο προσδιορισμό του σχήματος του, το δείγμα τοποθετήθηκε σε ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο από πολυστερίνη διαστάσεων 2,5 cm x 10cm x 2,5cm, όπου όμως χρησιμοποιήθηκε σαν περίβλημα του δείγματος, το πλαστικό κυλινδρικό δοχείο από το Γ στάδιο μετρήσεων, και όχι η πλαστική σακούλα.
Στο τελικό στάδιο χρησιμοποιήθηκε η πειραματική διάταξη που φαίνεται στο Σχ. 7.1α



Σχ7.1α Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει (από αριστερά), το δείγμα αιθανόλης που περιβάλλεται από πολυστερίνη, το θερμοζεύγος για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος, γυαλί ικανού πάχους για να απορροφά τη θερμική ακτινοβολία του κινητού, το κινητό που εκπέμπει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, και τη μονάδα καταγραφής της θερμοκρασίας. Δεξιά σε μεγέθυνση φαίνεται το πλαστικό δοχείο (pet) που περιέχει το δείγμα και το θερμοζεύγος.



Σχ.7.1β) Το κυλινδρικό δείγμα που περιβάλλεται από πολυστερίνη (μόνωση) σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.

Στο σχήμα 7.1β) φαίνεται το κυλινδρικό δοχείο του δείγματος. Περιέχει 1,5ml αιθανόλης που αντικατέστησε το δείγμα νερού, επειδή ο συντελεστής απορρόφησης της αιθανόλης όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 5.1 είναι μεγαλύτερος από αυτόν του νερού στις συχνότητες λειτουργίας του κινητού. Το δείγμα περιβάλλεται με μονωτικό υλικό από αφρώδη εξηλασμένη πολυστερίνη σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου διαστάσεων 5cm x 10 cm x 2,5cm.

Και σ' αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκε γυαλί για την απορρόφηση της ανεπιθύμητης θερμικής ακτινοβολίας του κινητού. Επιπλέον λεπτό φύλλο μόνωσης τοποθετήθηκε μεταξύ του γυαλιού και του κινητού επειδή το γυαλί είναι σχεδόν σε επαφή με το κινητό και η θερμοκρασία του επηρεάζεται από τη θερμοκρασία του κινητού και με τη σειρά του λειτουργεί το ίδιο το γυαλί σαν δευτερογενή πηγή θερμικής ακτινοβολίας.

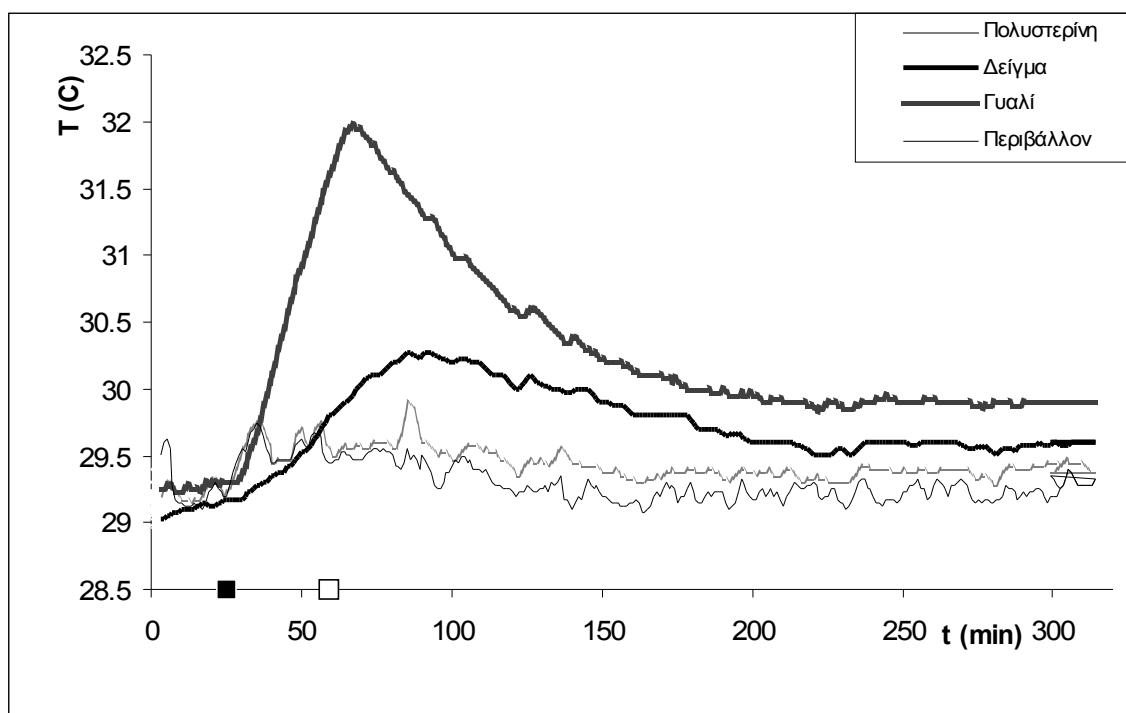
Το δείγμα τοποθετήθηκε μπροστά από την οθόνη του κινητού σε απόσταση περίπου 3,5 cm από την κεραία του, απόσταση που μόλις υπερβαίνει τα όρια της περιοχής του εγγύς πεδίου όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.2.

7.2 Τυπικά πειράματα

7.2α) Μιας συνομιλίας κινητού

Ακολουθεί η περιγραφή ενός τυπικού πειράματος.

Έγιναν μετρήσεις της θερμοκρασίας T_{sample} του δείγματος αιθανόλης, σαν συνάρτηση του χρόνου πριν, κατά τη διάρκεια λειτουργίας (συνδιάλεξη) του κινητού και μετά το κλείσιμο του κινητού. Ταυτόχρονα με τη μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος μετρήθηκαν και η θερμοκρασία της εξωτερικής μόνωσης από πολυστερίνη T_{Pol} , η θερμοκρασία του περιβάλλοντος $T_{\text{περ}}$, και η θερμοκρασία του γυαλιού T_{gl} . Η γραφική παράσταση των παραπάνω θερμοκρασιών σε συνάρτηση του χρόνου φαίνεται στο Σχ.7.2.



Σχ.7.2 Μεταβολή με το χρόνο της θερμοκρασίας του δείγματος, της πολυστερίνης, του περιβάλλοντος, και του γυαλιού. Οι καμπύλες έχουν προκύψει από τον κυλιόμενο μέσο τεσσάρων σημείων. Το μαύρο τετράγωνο δείχνει ότι το κινητό τίθεται σε λειτουργία και το λευκό τετράγωνο δείχνει ότι το κινητό κλείνει.

Όπως φαίνεται και στη γραφική παράσταση αρχικά οι θερμοκρασίες μετρώνται με το κινητό κλειστό για ~25 min. Στο χρονικό αυτό διάστημα οι διάφορες θερμοκρασίες δεν μεταβάλλονται πάνω από 0,3 °C.

Στη συνέχεια ξεκινάει η λειτουργία του κινητού σε κατάσταση συνομιλίας που διαρκεί 35 min. Όσο το κινητό είναι ανοιχτό αυξάνεται η θερμοκρασία του δείγματος κατά 0,6 °C. Ταυτόχρονα όμως παρατηρείται μια σχετικά μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας του γυαλιού κατά ~2,4 °C.

Από τη στιγμή που το κινητό κλείνει, αρχικά τόσο η θερμοκρασία του δείγματος όσο και του γυαλιού συνεχίζουν να αυξάνονται κατά 0,5 °C για ~30 min, και κατά 0,2 °C, για ~10 min, αντίστοιχα. Στη συνέχεια μειώνονται και σταθεροποιούνται μετά ~220 min από την έναρξη του πειράματος.

Τέλος ελαφρές αυξομειώσεις της τάξεως του 0,2 °C, παρατηρούνται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος καθώς και στη θερμοκρασία της μόνωσης στις οποίες είναι ορατές βραχύχρονες διαταραχές που πιθανό να οφείλονται στα ρεύματα του αέρα.

Είναι φανερό ότι οι μεταβολές της θερμοκρασίας του δείγματος, κυριαρχούνται από τις μεταβολές της θερμοκρασίας του γυαλιού και όχι από το άνοιγμα και κλείσιμο του κινητού.

Ενδεικτικές τιμές των παραπάνω θερμοκρασιών παρατίθενται στον Πίνακα 7.1 για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές.

Πίνακας 7.1 Πειραματικές τιμές θερμοκρασίας δείγματος, πολυστερίνης, περιβάλλοντος, και γυαλιού.

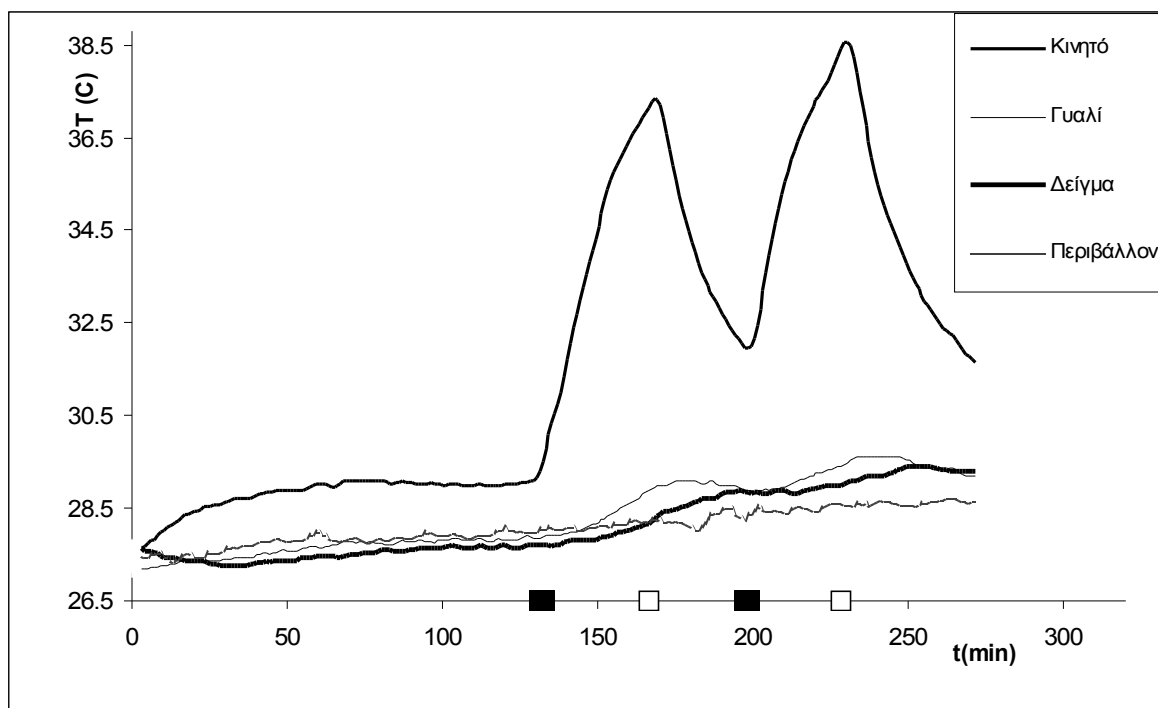
t (min)	T_{δείγμα} °C	T_{pol} °C	T_{περ} °C	T_{gl} °C
0	29,1	29,2	29,2	29,2
25	29,2	29,2	29,2	29,2
35	29,2	29,5	29,5	29,4
40	29,3	29,7	29,6	30
45	29,4	29,5	29,5	30,1
50	29,5	29,6	29,5	30,7
55	29,6	29,6	29,6	31
60	29,8	29,6	29,6	31,5
100	30,2	29,5	29,5	31,6
120	30,1	29,5	29,5	30,8
140	30	29,5	29,3	30,5
175	29,8	29,4	29,2	30,2
200	29,7	29,2	29,2	30
315	29,6	29,2	29,2	29,9

7.2β) Επαναλαμβανόμενης συνομιλίας κινητού

Κάτω από τις πειραματικές συνθήκες που προαναφέρθηκαν, του τελικού σταδίου έγιναν μετρήσεις της θερμοκρασίας T_{sample} του δείγματος αιθανόλης, σαν συνάρτηση του χρόνου κατά τη διάρκεια λειτουργίας (συνδιάλεξη) του κινητού. Στο στάδιο αυτό ήταν πλέον εμφανές ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του κινητού επηρέαζε καθοριστικά τη θερμοκρασία του δείγματος. Έτσι σε ορισμένα πειράματα χρησιμοποιήθηκε ένα δεύτερο κινητό μάρκας Nokia μοντέλο 6150 που παρουσιάζει μικρότερη αύξηση της θερμοκρασίας του κατά τη λειτουργία του.

Τα πειράματα αυτά περιλαμβάνουν μετρήσεις με το κινητό διαδοχικά ανοιχτό και κλειστό για να επιβεβαιωθεί αν η παρατηρούμενη αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος, οφείλεται στην ακτινοβολία μικροκυμάτων που εκπέμπει το κινητό, ή στην αύξηση θερμοκρασίας του περιβλήματός του. Ένα τέτοιο πείραμα φαίνεται στο Σχ. 7.3. Το κινητό ήταν αρχικά κλειστό και σε κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας του για περίπου 50 min.

Μετά άνοιξε και έκλεισε διαδοχικά δύο φορές παραμένοντας ανοιχτό και κλειστό κατά 32 min κάθε φορά. Ταυτόχρονα με τη μέτρηση της θερμοκρασίας του δείγματος μετρήθηκαν και η θερμοκρασία του κινητού , η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η θερμοκρασία του γυαλιού.



Σχ.7.3 Μεταβολή της θερμοκρασίας του κινητού, του γυαλιού, του δείγματος, και του περιβάλλοντος με το χρόνο. Στα σημεία όπου υπάρχει μαύρο τετράγωνο το κινητό τίθεται σε λειτουργία, ενώ στα σημεία όπου υπάρχει λευκό τετράγωνο το κινητό κλείνει.

Όπως φαίνεται από το Σχ.7.3, οι μεταβολές της θερμοκρασίας του κινητού καθορίζουν τόσο τις μεταβολές της θερμοκρασίας του γυαλιού όσο και αυτές του δείγματος με αποτέλεσμα να μην μπορεί να συνδεθεί η κατά ~ 1 °C αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος με την παρουσία της RF ακτινοβολίας από το κινητό .

Κεφάλαιο 8 ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΑΠΟΛΑΒΗΣ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

8.1 Απώλειες θερμότητας

8.1 α) Απώλειες θερμότητας με αγωγή (conduction) [11]

Όταν δύο περιοχές ενός υλικού βρίσκονται σε διαφορετική θερμοκρασία τότε έχουμε διάδοση θερμότητας με **αγωγή** από τη θερμότερη στη ψυχρότερη περιοχή.

Έστω μια πολύ λεπτή πλάκα (slab) πάχους dx και επιφάνειας εμβαδού A όπου η μία πλευρά της πλάκας έχει θερμοκρασία θ και η άλλη $\theta+d\theta$. Τότε έχουμε διάδοση θερμότητας Q , κάθετα στις επιφάνειες της πλάκας που επικρατεί αυτή η θερμοκρασιακή διαφορά, με ρυθμό:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{d\theta}{dx} \quad (8.1)$$

όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, μετράται σε $W/(m \text{ } ^\circ K)$ και είναι χαρακτηριστικός για κάθε υλικό. Το αρνητικό πρόσημο υποδηλώνει ότι η θετική κατεύθυνση της ροής θερμότητας συμπίπτει με τη θετική κατεύθυνση του x , δηλαδή την κατεύθυνση στην οποία η θερμοκρασία μειώνεται.

8.1 β) Απώλειες θερμότητας με μεταφορά (convection) [11]

Είναι η διάδοση θερμότητας ανάμεσα σε ένα ρευστό που μπορεί να είναι σε κίνηση και σε μια επιφάνεια A που είναι σε επαφή με αυτό και βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Τότε ο ρυθμός ροής θερμότητας με μεταφορά είναι:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = hA \Delta \theta \quad (8.2)$$

όπου $\Delta\theta$ είναι η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στην επιφάνεια και το ρευστό και h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας που μετράται σε $W/m^2 \text{ } ^\circ K$ και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες:

αν η επιφάνεια είναι επίπεδη ή καμπύλη, αν είναι οριζόντια ή κατακόρυφη, αν το ρευστό είναι υγρό ή αέριο, την πυκνότητα, το ιξώδες, την ειδική θερμότητα, τη θερμική αγωγιμότητα, την ταχύτητα του ρευστού.

8.1 γ) Απώλειες θερμότητας με ακτινοβολία (radiation) [33]

Όλα τα σώματα σε οποιαδήποτε θερμοκρασία, εκπέμπουν ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που ονομάζεται θερμική ακτινοβολία.

Ο ρυθμός με τον οποίο εκπέμπεται ενέργεια από την επιφάνεια A της σώματος θερμοκρασίας T (απόλυτη τιμή εκφρασμένη σε K) , είναι ανάλογος της 4^{ης} δύναμης της θερμοκρασίας:

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \varepsilon \sigma A T^4 \quad (8.3)$$

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως νόμος των Stefan-Boltzmann. Η ποσότητα ε ονομάζεται συντελεστής εκπομπής και εξαρτάται από τη φύση του σώματος. Παίρνει τιμές από 0 έως και 1. Μια ιδανική επιφάνεια με συντελεστή εκπομπής 1 απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω της και ονομάζεται μέλαν σώμα. Μια καλή προσέγγιση μέλανος σώματος είναι η εσωτερική κοιλότητα κοίλου αντικειμένου που έχει ένα μικρό άνοιγμα.

Η ακτινοβολία που εισέρχεται στην οπή ύστερα από διαδοχικές ανακλάσεις θα απορροφηθεί πλήρως. Το μέλαν σώμα εκτός του ότι απορροφά, εκπέμπει τη μέγιστη ακτινοβολούμενη ενέργεια. Επομένως, μπορεί να χαρακτηριστεί σαν τέλειος απορροφητής και σαν τέλειος εκπομπός.

Η ολική ένταση και η ολική εκπεμπόμενη ισχύ στο κενό, είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας του μέλανος σώματος. Υπάρχουν δύο μορφές έντασης: η φασματική ένταση της ακτινοβολίας $I(\lambda)$ (spectral intensity) σε μήκος κύματος λ , που αναφέρεται στην ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε ένα εύρος $d\lambda$ γύρω από ένα μήκος κύματος λ και η ολική ακτινοβολία (total intensity) που αναφέρεται στην ακτινοβολία που αντιστοιχεί σε όλα τα μήκη κύματος.

Η κατανομή της φασματικής έντασης ακτινοβολίας του μέλανος σώματος στο κενό δίνεται από τη σχέση :

$$i(\lambda) = \frac{2C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (8.4)$$

που είναι γνωστή σαν συνάρτηση φασματικής κατανομής του Planck και C_1 , C_2 σταθερές. Αυτές οι σταθερές είναι:

$$C_1 = hc_o^2 \text{ και } C_2 = c_o/k_B$$

όπου h η σταθερά του Planck και k_B η σταθερά του Boltzmann και c_o η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Η ολική ένταση είναι το ολοκλήρωμα της φασματικής έντασης για όλα τα μήκη κύματος:

$$i = \int_{\lambda=0}^{\infty} i(\lambda) d\lambda \quad (8.5)$$

Η διάδοση θερμότητας με ακτινοβολία δεν απαιτεί την παρουσία υλικού μέσου, μπορεί να γίνει και στο κενό, ενώ η διάδοση θερμότητας με αγωγή ή με μεταφορά, προϋποθέτει την παρουσία ύλης στο χώρο μεταξύ των σωμάτων που γίνεται η διάδοση θερμότητας.

8.2 Υπολογισμός του συντελεστή απορρόφησης α της θερμικής ακτινοβολίας του γυαλιού από τα 2 μm – 50 μm

Η θερμική ακτινοβολία από το κινητό που οφείλεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του περιβλήματος (~ 10 C σε 30 min) κατά τις μετρήσεις, επηρέαζε σημαντικά τη θερμοκρασία του δείγματος. Αν το δείγμα είναι το νερό, είναι γνωστό ότι ο συντελεστής απορρόφησης του νερού παίρνει μεγάλες τιμές στην περιοχή του εγγύς υπέρυθρου. Για παράδειγμα ο συντελεστής απορρόφησης του νερού στα 10 μm είναι 638 cm^{-1} [33]. Ο συντελεστής απορρόφησης της αιθανόλης παίρνει μεγάλες τιμές στην περιοχή του θερμικού υπέρυθρου [8]. Γι αυτό ήταν αναγκαίο να βρεθεί ένα υλικό που παρεμβαλλόμενο μεταξύ του κινητού και του δείγματος θα απορροφούσε αυτήν την ακτινοβολία. Ένα τέτοιο υλικό είναι το γυαλί που απορροφά έντονα τη θερμική ακτινοβολία στα 9-9,5 μm στα 12,5 μm και γύρω στα 21-23 μm , λόγω του συντονισμού στην ταλάντωση του δεσμού Si-O-Si [23].

Έχει ήδη προαναφερθεί ότι ο συντελεστής απορρόφησης α ενός υλικού (εξ. 5.2), επομένως και του γυαλιού, δίδεται από τη σχέση:

$$\alpha=4\pi k/\lambda$$

όπου λ το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και k ο δείκτης απορρόφησης (absorption index) του υλικού. Στον ακόλουθο πίνακα υπολογίζεται ο συντελεστής απορρόφησης α της θερμικής ακτινοβολίας στα 2 μm – 50 μm του γυαλιού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του k από τη βιβλιογραφία [23]:

Πίνακας 8.1 Συντελεστής απορρόφησης γυαλιού στο θερμικό υπέρυθρο (2 μm – 50 μm)

λ (m)	T o K	C_2 mK	C_1 Wm ² /sr	$i_\lambda(\lambda)$ W/(m ³ sr)	$i(\lambda)\Delta\lambda$	k_λ	$\alpha=4\pi*k_\lambda/\lambda$ m ⁻¹	$I_{out} \Delta\lambda$
2.0E-06	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	0,00029	3E-07	1,9E+00	6,0E-13
5.0E-06	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	13,0141	0,006	1,5E+04	3,0E-08
1.0E-05	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	49,6215	0,3	3,8E+05	1,5E-06
1.5E-05	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	33,4204	0,06	5,0E+04	3,0E-07
2.0E-05	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	18,609	0,7	4,4E+05	3,5E-06
2.5E-05	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	10,4964	0,5	2,5E+05	2,5E-06
3.0E-05	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	6,2102	0,2	8,4E+04	1,0E-06
3.5E-05	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	3,86143	0,1	3,6E+04	5,0E-07
4.0E-05	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	2,5103	0,07	2,2E+04	3,5E-07
4.5E-05	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	1,69586	0,04	1,1E+04	2,0E-07
5.0E-05	300	0,01438	6E-17	8,2782E-15	1,18397	0,025	6,3E+03	1,3E-07
				$\Sigma i(\lambda)\Delta\lambda$	=140,623		Σ	1,0E-05

Κεφάλαιο 9 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

9.1 Μοντελοποίηση του πειράματος

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η θεωρητική πρόβλεψη της μεταβολής της θερμοκρασίας του δείγματος στο οποίο προσδίδεται ή από το οποίο αποβάλλεται θερμότητα. Στη βιβλιογραφία έχουν εφαρμοστεί αριθμητικοί μέθοδοι όπως η μέθοδος Finite difference Time Domain-FDTD [26],[29],[30] ή η μέθοδος που χρησιμοποιεί τη βιοθερμική εξίσωση [28]. Η μοντελοποίηση που παρουσιάζεται εδώ περιορίζεται στη αναλυτική λύση μιας εξίσωσης ρυθμών ενέργειας.

Για τη δημιουργία αυτής της εξίσωσης λαμβάνονται υπόψη οι σημαντικότεροι μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας. Για την αναλυτική λύση όμως είναι απαραίτητο το υπό μελέτη πρόβλημα να έχει απλή συμμετρία. Οι συμμετρίες που μπορούν να οδηγήσουν σε αναλυτική λύση του προβλήματος είναι [11]:

- η κυλινδρική
- η επίπεδη
- η σφαιρική

Τη θερμοκρασία του δείγματος επηρεάζουν κυρίως:

1. Η ισχύς των μικροκυμάτων (RF) του κινητού που απορροφάται από το δείγμα

$$\dot{Q}_{rf} = I(1 - e^{-ad})hd, \quad (9.1)$$

όπου I η ένταση της ακτινοβολίας στη συχνότητα μικροκυμάτων του κινητού, a ο συντελεστής απορρόφησης και $h \cdot d$ η επιφάνεια του δείγματος στην οποία προσπίπτει η ακτινοβολία (d η διάμετρος της βάσης του δείγματος h το ύψος του δείγματος).

2. Η αύξηση της θερμικής ισχύος από το γυαλί λόγω αύξησης της θερμοκρασίας του

$$\dot{Q}_{rad} = \frac{\sigma A_g \varepsilon}{2\pi R^2} [T_{gl}^4 - T_{gl-in}^4]hd, \quad (9.2)$$

όπου A_g επιφάνεια του γυαλιού, σ η σταθερά Stefan-Boltzmann, ε ο συντελεστής

εκπομπής (≈ 1) της επιφάνειας, T_{gl} η θερμοκρασία του γυαλιού T_{gl-in} η αρχική θερμοκρασία του και R η απόσταση γυαλί – δείγμα.

3. Ο ρυθμός απωλειών θερμότητας με ακτινοβολία από το δείγμα:

$$\dot{Q}_{rad-loss} = \sigma A_{pet} \varepsilon [T_s^4 - T_{pet}^4] \quad (9.3)$$

όπου A_{pet} η επιφάνεια του δείγματος, σ η σταθερά Stefan-Boltzmann, ε ο συντελεστής εκπομπής (≈ 1) της επιφάνειας, T_s η θερμοκρασία του δείγματος T_{pet} η θερμοκρασία του περιβλήματος.

4. Ο ρυθμός διάδοσης θερμότητας λόγω αγωγής, από τη μόνωση (πολυστερίνη -pol) του δοχείου του δείγματος προς το περιβάλλον ή αντίστροφα

$$\dot{Q}_{pol-conduction} = kA_{pol} \frac{\Delta T_{pol}}{\Delta x} \quad (9.4)$$

όπου A η επιφάνεια, Δx το πάχος και k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της πολυστερίνης.

5. Ο ρυθμός διάδοσης θερμότητας λόγω αγωγής δια μέσου του πλαστικού περιβλήματος (PET) του δοχείου της αιθανόλης

$$\dot{Q}_{pet-conduction} = kA_{pet} \frac{\Delta T_{pet}}{\Delta x} \quad (9.5)$$

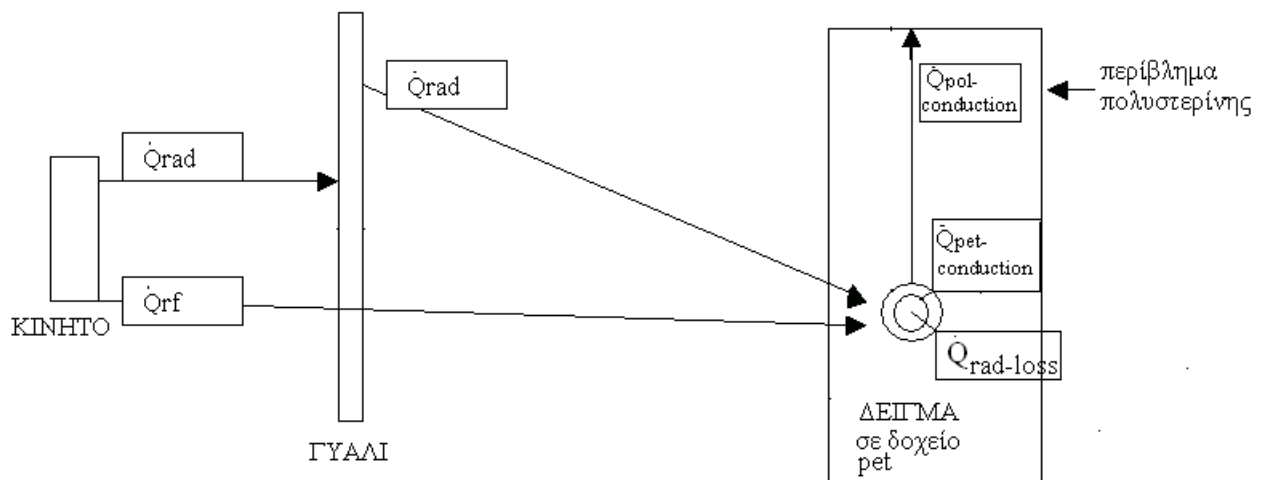
όπου A η επιφάνεια, Δx το πάχος και k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του pet.

6. Ο ρυθμός διάδοσης θερμότητας λόγω αγωγής δια μέσου των αγωγών του θερμοζεύγους

$$\dot{Q}_{thermocouple-conduction} = kA \frac{\Delta T_{th}}{\Delta x} \quad (9.6)$$

όπου A η διατομή του σύρματος, Δx το πάχος και k ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του θερμοζεύγους.

Οι διεργασίες αυτές φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:

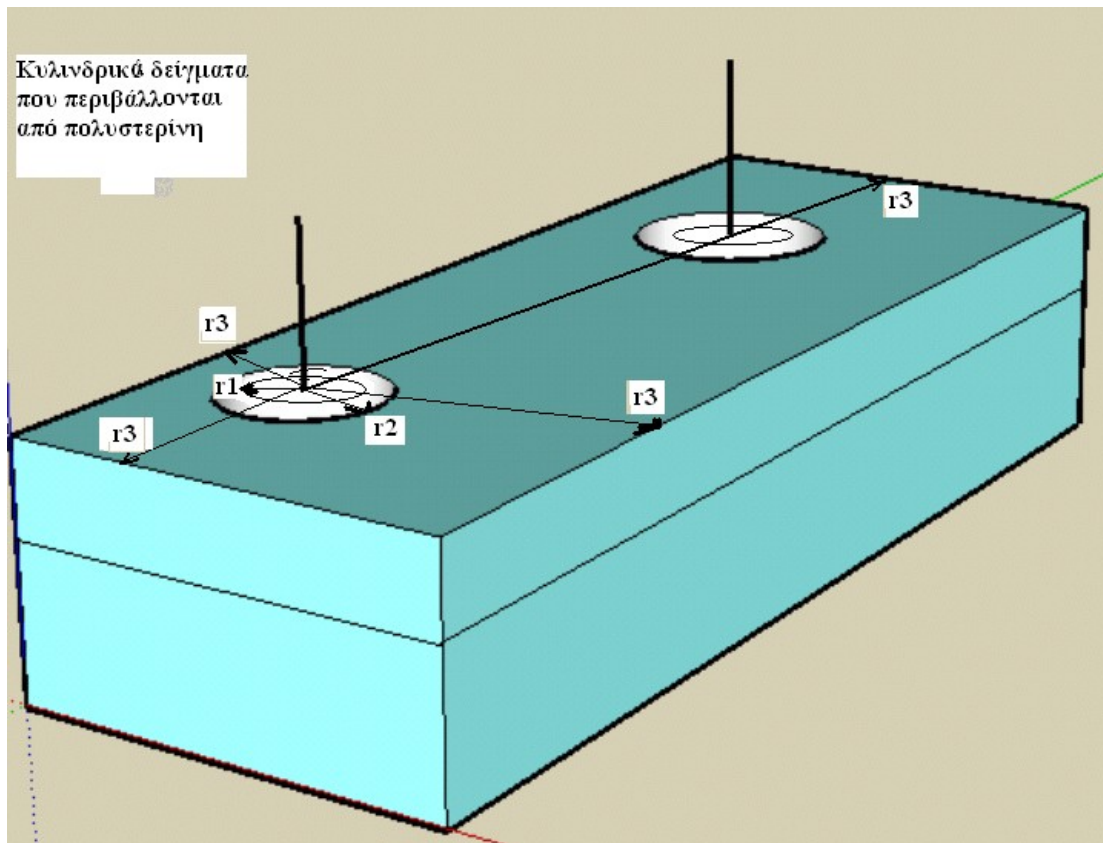


Σχ.9.1 Σχηματικό διάγραμμα των ρυθμών μεταφοράς ενέργειας από το κινητό στο γυαλί, από το γυαλί στο δείγμα, από το δείγμα στο πλαστικό δοχείο (pet), από το pet στη μόνωση του δοχείου του δείγματος (πολυστερίνη -pol) και από τη μόνωση προς το περιβάλλον .

9.1 α) Κυλινδρική συμμετρία

Με δεδομένο ότι το δείγμα είναι σε κυλινδρικό δοχείο, μπορεί να επιχειρηθεί αναλυτική λύση του προβλήματος εφαρμόζοντας κυλινδρική συμμετρία για τη μεταφορά θερμότητας από το δείγμα (sample) στο πλαστικό δοχείο που το περιέχει (pet), από το πλαστικό δοχείο στο μονωτικό υλικό που περικλείει το δοχείο (πολυστερίνη) και από την πολυστερίνη στον αέρα.

Για την παρούσα μοντελοποίηση ως δείγμα επελέγη ποσότητα αιθανόλης (1,5 ml) σε πλαστικό (pet) κυλινδρικό δοχείο, εσωτερικής ακτίνας r_1 και εξωτερικής ακτίνας r_2 . Το δοχείο περιβάλλεται από πολυστερίνη η οποία εκτείνεται σε διαφορετικές ακτίνες r_3 (και παίρνει τιμές 1,5 cm, 3,5 cm, και 10 cm) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχ. 9.2 Πειραματική διάταξη με κυλινδρική συμμετρία

Από τα παραπάνω ο συνολικός ρυθμός απορρόφησης ενέργειας από το δείγμα (sample) μάζας m και ειδικής θερμότητας c και από το πλαστικό δοχείο μάζας m' και ειδικής θερμότητας c' είναι:

$$\dot{Q}_{rf} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{rad-loss} + \dot{Q}_{pol-conduction} + \dot{Q}_{pet-conduction} + \dot{Q}_{th-conduction} = (mc + m'c') \frac{dT_{sample}}{dt} \quad (9.7)$$

Το δεξί μέρος της παραπάνω εξίσωσης παίρνει τη συγκεκριμένη μορφή επειδή ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του πλαστικού δοχείου (pet) είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν της μόνωσης (πολυστερίνης) και επομένως το δοχείο δεν επηρεάζει το ρυθμό διάδοσης θερμότητας από το δείγμα προς τη μόνωση που καθορίζεται έτσι μόνο από το συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της μόνωσης.

Η απαγωγή θερμότητας λόγω του θερμοζεύγους είναι αμελητέα όπως φαίνεται παρακάτω:

Ο ένας αγωγός του θερμοζεύγους είναι από κράμα Ni 95% – Al, Si, Mn με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $k = 91 \text{ W/(m } ^\circ\text{K)}$ [6].

Το εμβαδόν της επιφάνειας είναι:

$$A = \pi \delta^2/4 \quad (9.8)$$

δηλαδή η διατομή του σύρματος δια μέσου της οποίας γίνεται η απώλεια της θερμότητας, $\Delta T = 1 \text{ } ^\circ\text{K}$ αντιπροσωπεύει τη μέγιστη διαπιστωθείσα μεταβολή της θερμοκρασίας του δείγματος και $\Delta x = 0,01\text{m}$ το μήκος του σύρματος όπου αναπτύσσεται αυτή η διαφορά θερμοκρασίας.

Επομένως η απώλεια ισχύος λόγω αγωγιμότητας στο θερμοζεύγος υπολογίζεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$\frac{dQ}{dt} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = 31,5 * 10^{-5} W \quad (9.9)$$

Ο δεύτερος αγωγός του θερμοζεύγους είναι από κράμα Ni 90% – Cr 10% με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $k = 17 \text{ W/(m } ^\circ\text{K)}$ [6] και ανάλογα υπολογίζεται η απώλεια ισχύος :

$$\frac{dQ}{dt} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = 5.88 * 10^{-5} W \quad (9.10)$$

Το περίβλημα είναι από PTFE (Poly-Tetra- Fluoro- Ethylene) με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας $k = 0,25 \text{ W/(m } ^\circ\text{K)}$

Το εμβαδόν της επιφάνειας είναι:

$$A = \pi \delta h = 3.46 * 10^{-8} = 3,46 * 10^{-8} \text{ m}^2 \quad (9.11)$$

δηλαδή το εμβαδόν της παράπλευρης επιφάνειας των κυλινδρικών αγωγών που περιβάλλονται από PTFE, $\Delta T = 1 \text{ } ^\circ\text{K}$ η διαφορά θερμοκρασίας και $\Delta x = 0,0002\text{m}$ το πάχος του PTFE:

$$\frac{dQ}{dt} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = 16.5 * 10^{-5} W \quad (9.12)$$

Επομένως οι θερμικές απώλειες δια μέσου του αισθητήρα μέτρησης της θερμοκρασίας του δείγματος που είναι το θερμοζεύγος, είναι μικρές και δε λαμβάνονται υπόψη.

Επίσης επειδή αναμένεται η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο δείγμα και στο πλαστικό περίβλημα ($T_s - T_{pet}$) να είναι μικρή, ο ρυθμός απωλειών θερμότητας με ακτινοβολία από το δείγμα δε λαμβάνεται υπόψη.

Έτσι με τις συνεισφορές που απομένουν η εξίσωση του συνολικού ρυθμού απορρόφησης ενέργειας γίνεται:

$$I(1 - e^{-ad})hd + \frac{\sigma A_g \epsilon}{2\pi R^2} [T_{gl}^4 - T_{gl-in}^4]hd - k_{pol} 2\pi h \frac{T_{pet} - T_{pol}}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} - k_{pet} 2\pi h \frac{T_s - T_{pet}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} =$$

$$= \sum_1^2 \rho_i V_i c_i \frac{dT_s}{dt} \quad (9.13)$$

όπου ρ_i = η πυκνότητα, V_i ο όγκος και c_i η ειδική θερμότητα του δείγματος και του δοχείου αντίστοιχα και h το ύψος του κυλίνδρου.

Η παραπάνω εξίσωση περιέχει σαν αγνώστους εκτός από τη θερμοκρασία του δείγματος T_s και τη θερμοκρασία του πλαστικού δοχείου T_{pet} . Για να αποκτηθεί αναλυτική λύση πρέπει να εκφραστεί το T_{pet} συναρτήσει του T_s . Αυτό επιτυγχάνεται στην παρούσα ανάλυση ως ακολούθως:

α) γίνεται η παραδοχή ότι οι απώλειες θερμότητας από το δείγμα είναι μόνο μέσω αγωγής δια μέσου του πλαστικού δοχείου (pet) και β) αφού ο ρυθμός απωλειών από το δείγμα προς το περιβάλλον καθορίζεται ουσιαστικά από το ρυθμό απωλειών μέσω της πολυστερίνης και όχι από το ρυθμό απωλειών μέσω του πλαστικού δοχείου (pet) διότι η πολυστερίνη έχει μικρότερο συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k , θεωρούμε το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας από το δείγμα στο pet ίσο με το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας από το pet στην μόνωση του δοχείου του δείγματος. Εξισώνοντας τους δύο ρυθμούς έχουμε:

$$\frac{k_{pet} 2\pi h (T_s - T_{pet})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{k_{pol} 2\pi h (T_{pet} - T_{pol})}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}$$

άρα

$$T_{pet} = \frac{\frac{k_{pet}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} T_s + \frac{k_{pol}}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} T_{pol}}{\frac{k_{pet}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} + \frac{k_{pol}}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}} \quad (9.14)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή του T_{pet} στην εξίσωση του συνολικού ρυθμού απορρόφησης ενέργειας προκύπτει η διαφορική εξίσωση:

$$C - BT_s = A' \frac{dT_s}{dT} \quad (9.15)$$

Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης ως προς τη θερμοκρασία T_s είναι :

$$T_s = \frac{C}{B} - \left(\frac{C}{B} - T_{so}\right) e^{-\frac{B}{A'} t} \quad (9.16)$$

όπου T_{so} η αρχική θερμοκρασία του δείγματος,

$$C = I(1 - e^{-ad})hd + \frac{\sigma A_g \varepsilon}{2\pi R^2} [T_{gl}^4 - T_{gl-in}^4]hd - \frac{k_{pol} 2\pi h}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} (\Psi + 1) T_{pol} \quad (9.17)$$

$$B = \frac{k_{pet} 2\pi h}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} (1 - \Psi) \quad (9.18)$$

$$\Psi = \frac{\frac{k_{pet}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} - \frac{k_{pol}}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}}{\frac{k_{pet}}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} + \frac{k_{pol}}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}} \quad (9.19)$$

$$A' = \rho c \pi r_1^2 h + m' c' \quad (9.20)$$

Η παραπάνω εξίσωση για το T_s μπορεί να γραφεί :

$$T_s = \frac{C}{B} (1 - e^{-\frac{B}{A'} t}) + T_{so} e^{-\frac{B}{A'} t}$$

ή

$$T_s = \frac{C}{B} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{so} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9.21)$$

όπου $\tau = A'/B$ είναι η σταθερά χρόνου του συστήματος.

Παρατηρούμε ότι η έκφραση για τη θερμοκρασία του δείγματος παριστά τις δύο διεργασίες ανταλλαγής ενέργειας:

α) ο πρώτος όρος την πρόσληψη ενέργειας που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία τείνει στο C/B για χρόνους μεγάλους σε σύγκριση με τη σταθερά χρόνου τ .

β) ο δεύτερος όρος την απώλεια ενέργειας που οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας, από την αρχική τιμή της T_{so} .

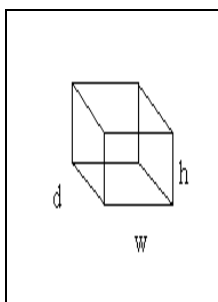
Παρατηρούμε επίσης ότι και οι δύο αυτές διεργασίες καθορίζονται από την ίδια σταθερά χρόνου τ .

9.1 β) Επίπεδη συμμετρία

Επειδή η μόνωση που περικλείει το κυλινδρικό δείγμα, α) δεν έχει κυλινδρικό σχήμα και β) επεκτείνεται σε μεγάλη έκταση γύρω από το δείγμα το οποίο επιπλέον δεν είναι στο κέντρο, διαπιστώνεται στην παραπάνω ανάλυση ότι η παραδοχή της κυλινδρικής συμμετρίας, ισχύει αυστηρά, μόνο κοντά στο δείγμα.

Για τους λόγους αυτούς η παραπάνω ανάλυση επαναλαμβάνεται εδώ, εφαρμόζοντας και επίπεδη συμμετρία. Κάτω από συνθήκες επίπεδης συμμετρίας και για μικρές διαφορές θερμοκρασίας η θερμότητα διαδίδεται γραμμικά, κάθετα στα επίπεδα τοιχώματα του περιβλήματος του δείγματος [11]. Επειδή η αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος, αναμένεται να είναι μικρή [29], [30], η αναλυτική λύση με επίπεδη συμμετρία πιθανόν να ενισχύεται, γι αυτό και επιλέγεται να αναπτυχθεί στην παρούσα μελέτη.

Θεωρούμε ότι το δείγμα έχει σχήμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου διαστάσεων w , d , h .



Σχ.9.3 Δείγμα ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου διαστάσεων w , d , h

Στην επίπεδη συμμετρία λαμβάνονται υπόψη οι ίδιοι μηχανισμοί διάδοσης θερμότητας όπως και στην κυλινδρική συμμετρία. Έτσι και η εξίσωση του συνολικού ρυθμού απορρόφησης ενέργειας γίνεται:

$$\dot{Q}_{rf} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{rad-loss} + \dot{Q}_{pol-conduction} + \dot{Q}_{pet-conduction} + \dot{Q}_{th-conduction} = (mc + m'c') \frac{dT_{sample}}{dt} \quad (9.22)$$

Όπως φαίνεται από την σύγκριση της παραπάνω εξίσωσης με την αντίστοιχη στην κυλινδρική συμμετρία, μόνο δύο όροι διαφοροποιούνται στην επίπεδη συμμετρία:

$$\dot{Q}_{pol-conduction}, \quad \dot{Q}_{pet-conduction}$$

Αντικαθιστώντας παίρνουμε:

$$I(1 - e^{-ad})wh + \frac{\sigma A_g \varepsilon}{2\pi R^2} [T_{gl}^4 - T_{gl-in}^4]wh - k_{pol} A \frac{(T_{pet} - T_{pol})}{\Delta x} - k_{pet} A \frac{(T_s - T_{pet})}{\Delta x} =$$

$$= \sum_{i=1}^2 \rho_i V_i c_i \frac{dT_s}{dt} \quad (9.23)$$

όπου ρ_i η πυκνότητα, V_i ο όγκος και c_i η ειδική θερμότητα του δείγματος και του δοχείου αντίστοιχα και h το ύψος του κυλίνδρου.

Για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν στην κυλινδρική συμμετρία θεωρούμε το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας από το δείγμα στο pet ίσο με το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας από το pet στην μόνωση του δοχείου του δείγματος.

Εξισώνοντας τους δύο ρυθμούς έχουμε:

$$\frac{k_{pet} A_{pet} (T_s - T_{pet})}{\Delta x_{pet}} = \frac{k_{pol} A_{pol} (T_{pet} - T_{pol})}{\Delta x_{pol}}$$

άρα

$$T_{pet} = \frac{k_{pet} A_{pet} T_s + k_{pol} \sum_{i=1}^5 \frac{A_i}{\Delta x_i} T_{pol} \Delta x_{pet}}{k_{pet} A_{pet} + k_{pol} \sum_{i=1}^5 \frac{A_i}{\Delta x_i} \Delta x_{pet}} \quad (9.24)$$

έτσι προκύπτει η διαφορική εξίσωση:

$$C - BT_s = A \frac{dT_s}{dT} \quad (9.25)$$

η λύση της οποίας μας δίνει τη θερμοκρασία T_s του δείγματος:

$$T_s = \frac{C}{B} - \left(\frac{C}{B} - T_{so} \right) e^{\frac{-B}{A} t} \quad (9.26)$$

όπου: T_{so} η αρχική θερμοκρασία του δείγματος,

$$C = I(1 - e^{-ad})wd + \frac{\sigma A_g \varepsilon}{2\pi R^2} [T_{gl}^4 - T_{gl-in}^4]wh - k_{pol} \sum_{i=1}^5 \frac{A_i}{\Delta x_i} \Delta x_{pet} \left(\Psi - \frac{1}{\Delta x_{pet}} \right) T_{pol} \quad (9.27)$$

$$B = k_{pet} A_{pet} \left(\Psi + \frac{1}{\Delta x_{pet}} \right) \quad (9.28)$$

$$\Psi = \frac{k_{pol} \sum_{i=1}^5 \frac{A_i}{\Delta x_i} - \frac{k_{pet} A_{pet}}{\Delta x_{pet}}}{k_{pol} \sum_{i=1}^5 \frac{A_i}{\Delta x_i} \Delta x_{pet} + k_{pet} A_{pet}} \quad (9.29)$$

$$A' = \rho c \pi r_1^2 h + m' c' \quad (9.30)$$

Η παραπάνω εξίσωση για το T_s μπορεί να γραφεί :

$$T_s = \frac{C}{B} (1 - e^{-\frac{B}{A'} t}) + T_{so} e^{-\frac{B}{A'} t}$$

ή

$$T_s = \frac{C}{B} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{so} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9.31)$$

όπου $\tau = A'/B$ είναι η σταθερά χρόνου του συστήματος .

Όπως και στην περίπτωση της κυλινδρικής συμμετρίας παρατηρούμε ότι και για την επίπεδη συμμετρία η έκφραση για τη θερμοκρασία του δείγματος παριστά τις δύο διεργασίες ανταλλαγής ενέργειας:

- α) ο πρώτος όρος την πρόσληψη ενέργειας που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας, η οποία τείνει στο C/B για χρόνους μεγάλους σε σύγκριση με τη σταθερά χρόνου τ
- β) ο δεύτερος όρος την απώλεια ενέργειας που οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας, από την αρχική τιμή της T_{so} .

Παρατηρούμε επίσης ότι και οι δύο αυτές διεργασίες καθορίζονται από την ίδια σταθερά χρόνου τ . Όπως διαπιστώνεται από τις αντίστοιχες εκφράσεις των A' και B , η σταθερά χρόνου $\tau = A'/B$ έχει διαφορετική τιμή για τις δύο συμμετρίες και συγκεκριμένα ισχύει: $\tau_{cyl} \sim 11 \text{ min}$ και $\tau_{planar} \sim 32 \text{ min}$.

9.2 Έλεγχος μοντελοποίησης

Οι προβλέψεις της μοντελοποίησης για την αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος ελέγχονται στο παρόν και για τις δύο συμμετρίες, για τους μηχανισμούς μεταφοράς ενέργειας προς το δείγμα στις ακόλουθες περιπτώσεις:

A) χωρίς καμία εξωτερική πηγή ενέργειας

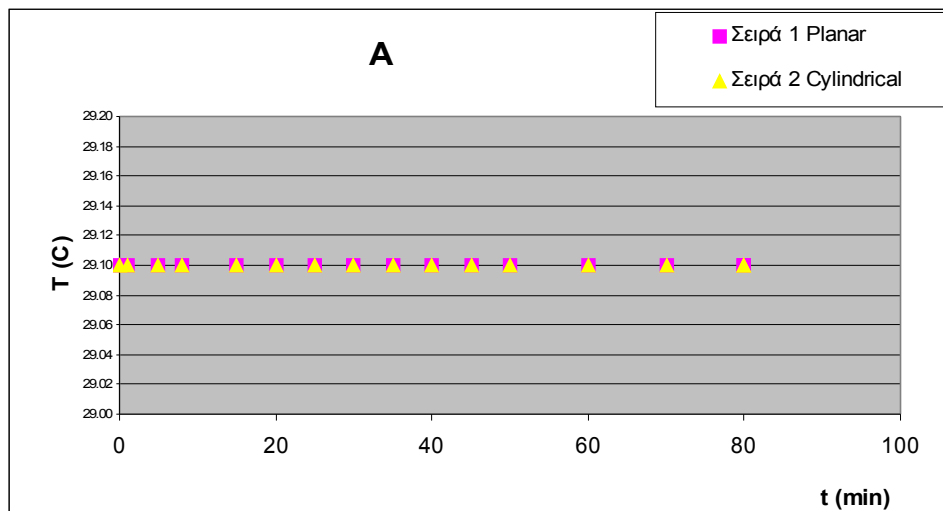
B) μόνο με την επίδραση της (ασθενούς) RF ακτινοβολίας του κινητού,

Γ) μόνο με την επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας του γυαλιού (Thermal).

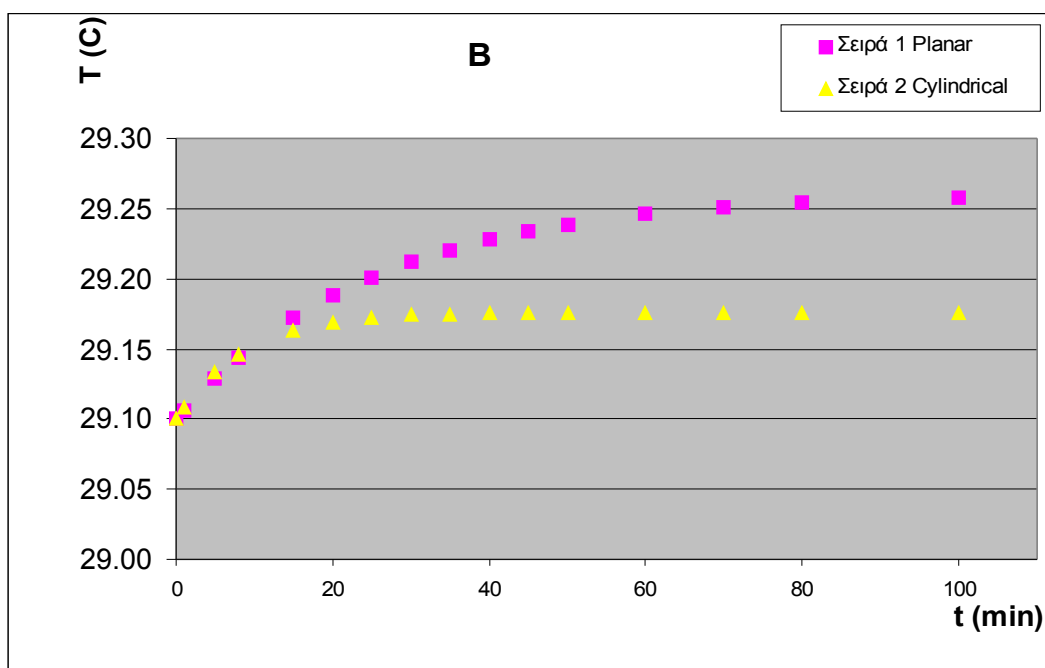
Τα αποτελέσματα για τη θερμοκρασία του δείγματος T_{sample} με βάση την κυλινδρική (Cylindrical) και την επίπεδη (planar) συμμετρία φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα :

Πίνακας 9.1

Α καμία εξωτερική πηγή		Β μόνο η RF ακτινοβολία, ισχύς απορροφούμενη από το δείγμα : 0,5 mW		Γ μόνο με την επίδραση της θερμικής ακτινοβολίας του γυαλιού ισχύς : 3,4mW	
	T_{sample}	T_{sample}		T_{sample}	
t (min)	Κυλ/Επ	Κυλινδρική	Επίπεδη	Κυλινδρική	Επίπεδη
0	29,10	29,10	29,10	29,10	29,10
1	29,10	29,11	29,11	29,15	29,14
5	29,10	29,13	29,13	29,32	29,29
8	29,10	29,15	29,14	29,40	29,38
15	29,10	29,16	29,17	29,51	29,56
20	29,10	29,17	29,19	29,54	29,67
25	29,10	29,17	29,20	29,56	29,75
30	29,10	29,18	29,21	29,58	29,82
35	29,10	29,18	29,22	29,58	29,88
40	29,10	29,18	29,23	29,58	29,93
45	29,10	29,18	29,23	29,59	29,96
50	29,10	29,18	29,24	29,59	30,00
60	29,10	29,18	29,25	29,59	30,04
70	29,10	29,18	29,25	29,59	30,07
80	29,10	29,18	29,25	29,59	30,10
100	29,10	29,18	29,26	29,59	30,12

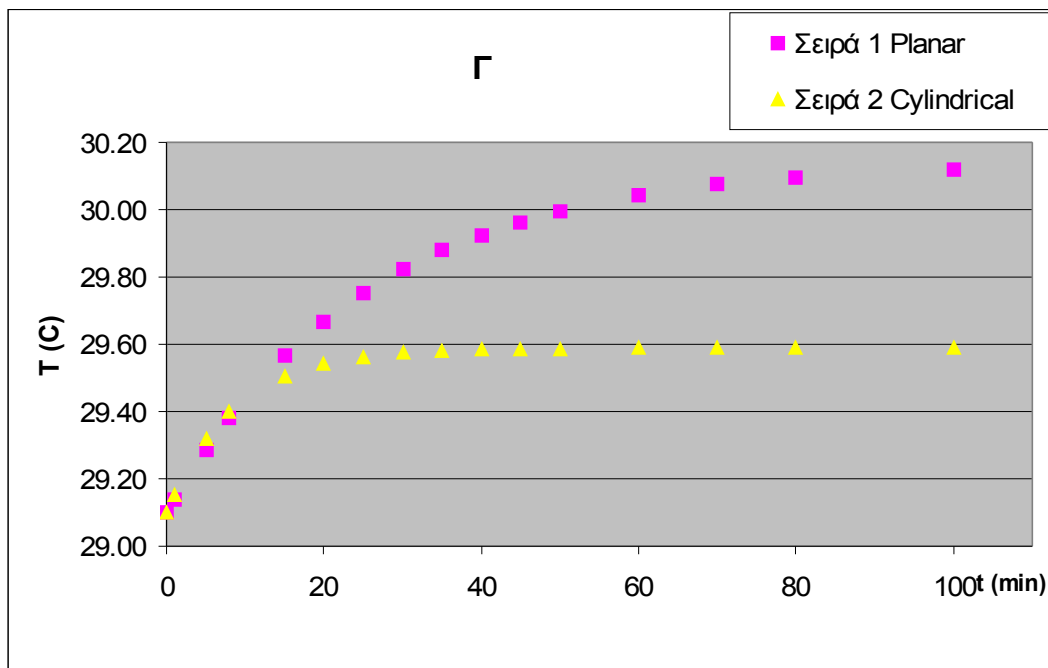


Σχ.9.4 Έλεγχος μοντελοποίησης για την περίπτωση A (καμία εξωτερική πηγή ενέργειας). Τα μοντέλα προβλέπουν σωστά ότι η θερμοκρασία του δείγματος δεν μεταβάλλεται με το χρόνο.



Σχ.9.5 Έλεγχος μοντελοποίησης για την περίπτωση B (μόνο με την επίδραση της RF ακτινοβολίας του κινητού, για απορροφούμενη ισχύ 0,5 mW). Για τα πρώτα 15 min απορρόφησης της RF ακτινοβολίας προβλέπεται παρόμοια αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος (περίπου 0,08 °C) και στις δύο συμμετρίες .

Όσο όμως αυξάνεται η θερμοκρασία του δείγματος, αυξάνονται και οι απώλειες δια μέσου της πολυστερίνης. Επομένως αρχίζει να μειώνεται ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας του δείγματος T_s και μετά από δύο περίπου σταθερές χρόνου τ για το κάθε μοντέλο ($\tau_{\text{cyl}} \sim 11 \text{ min}$ και $\tau_{\text{planar}} \sim 32 \text{ min}$) η T_s σταθεροποιείται.



Σχ.9.6 Έλεγχος μοντελοποίησης για την περίπτωση Γ (μόνο με την επίδραση της ακτινοβολίας του γυαλιού στο θερμικό υπέρυθρο, ΔT γυαλιού = $0,8^\circ\text{C}$, ισχύς = $3,4 \text{ mW}$). Όπως συνάγεται από το Σχ.9.6 προβλέπεται παρόμοια αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος (περίπου $0,5^\circ\text{C}$ για τα πρώτα 15 min ακτινοβολίας) και στις δύο συμμετρίες.

Κεφάλαιο 10 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑ

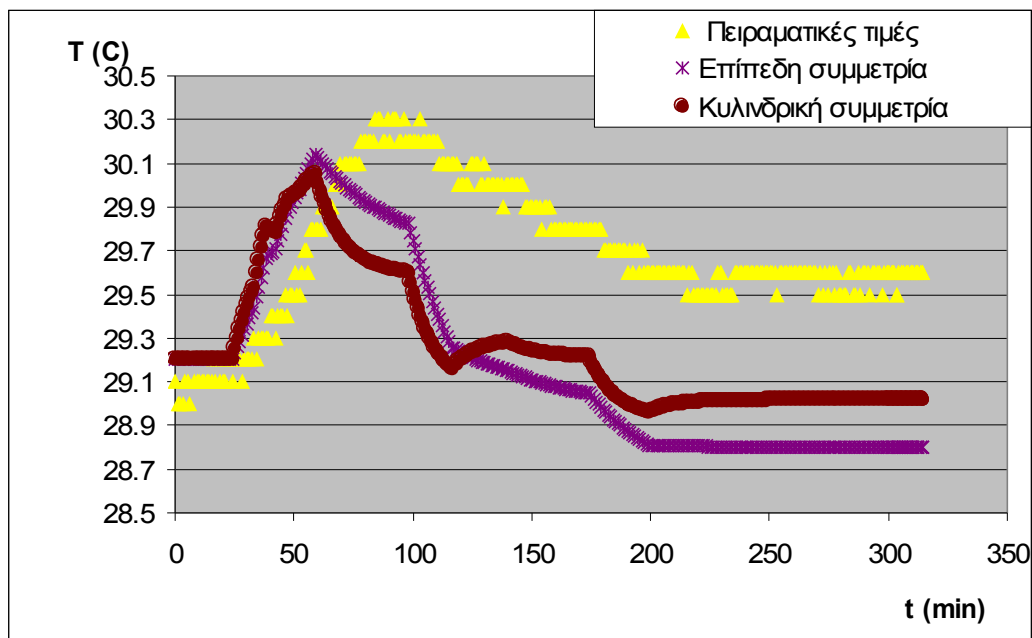
10.1 Σύγκριση πειραματικών τιμών θερμοκρασίας δείγματος με τις προβλέψεις της μοντελοποίησης.

Εδώ γίνεται προσπάθεια σύγκρισης των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις θεωρητικές προβλέψεις για τη θερμοκρασία το δείγματος. Στη σύγκριση αυτή οι θεωρητικές προβλέψεις χρησιμοποιούν ως τιμή της ισχύος των μικροκυμάτων που εκπέμπει το κινητό τα 25 mW. Η τιμή αυτή είναι υποθετική προς την άνω περιοχή του εύρους που προαναφέρθηκε στο κεφ. 6.1α. Η αναλυτική λύση της διαφορικής εξίσωσης για τη χρονική εξάρτηση της θερμοκρασίας του δείγματος, όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, γίνεται με σταθερές αρχικές συνθήκες (όπου η θερμοκρασία μόνωσης, περιβάλλοντος και γυαλιού είναι σταθερές παράμετροι). Η εφαρμογή επομένως της μοντελοποίησης κάτω από τις πειραματικές μας συνθήκες όπου η θερμοκρασία του γυαλιού σαφώς μεταβάλλεται με το χρόνο απαιτεί επιπλέον επεξεργασία. Έτσι η μοντελοποίηση εφαρμόζεται τιμηματικά κατά χρονικά διαστήματα στα οποία οι παραπάνω θερμοκρασίες μπορούν να θεωρηθούν χρονικά σταθερές. Στον Πίνακα 10.1 δίνονται οι πειραματικές τιμές και οι αντίστοιχες τιμές που προβλέπει η τροποποιημένη μοντελοποίηση με βάση κυλινδρική ή επίπεδη συμμετρία.

Πίνακας 10.1 Πειραματικές τιμές και προβλεπόμενες τιμές για την κυλινδρική και την επίπεδη συμμετρία υποθέτοντας ότι η απορροφούμενη ισχύς μικροκυμάτων είναι 0,5mW.

t (min)	T _{sample} °C		
	Πείραμα	Κυλινδρική συμμετρία	Επίπεδη συμμετρία
0	29,1	29,20	29,20
25	29,2	29,26	29,24
35	29,2	29,74	29,61
40	29,3	29,90	29,80
45	29,4	30,01	29,96
50	29,5	30,10	30,12
55	29,6	30,16	30,26
60	29,8	30,17	30,36
100	30,2	29,49	29,82
120	30,1	28,99	29,00
140	30,0	29,15	28,90
175	29,8	29,08	28,78
200	29,7	28,89	28,60
315	29,6	28,98	28,71

Ακολουθεί η γραφική παράσταση των πειραματικών τιμών της θερμοκρασίας του δείγματος και των προβλεπόμενων τιμών της με βάση τις δύο συμμετρίες :



Σχ.10.1 Γραφική παράσταση των πειραματικών τιμών και των θεωρητικών τιμών της θερμοκρασίας του δείγματος εφαρμόζοντας κυλινδρική και επίπεδη συμμετρία. Το μαύρο τετράγωνο δείχνει ότι το κινητό τίθεται σε λειτουργία και το λευκό τετράγωνο δείχνει ότι το κινητό κλείνει.

Όπως φαίνεται από το Σχ.10.1 η θερμοκρασία του δείγματος που μετρήθηκε πειραματικά, αυξάνεται κατά $1,1^{\circ}\text{C}$.

Το μοντέλο της κυλινδρικής συμμετρίας προβλέπει μια αύξηση κατά μέσο όρο 1°C και της επίπεδης συμμετρίας κατά $1,6^{\circ}\text{C}$.

Λαμβάνοντας υπόψη την προσεγγιστική φύση της μοντελοποίησης, η συμφωνία των προβλέψεων με το πείραμα μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική.

Εντούτοις όπως δείχνει το Σχ.10.1 τα μοντέλα προβλέπουν μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης από 25 min έως 60 min που το κινητό ήταν ανοιχτό.

Επίσης προβλέπουν μεγαλύτερο ρυθμό μείωσης αφού κλείσει το κινητό.

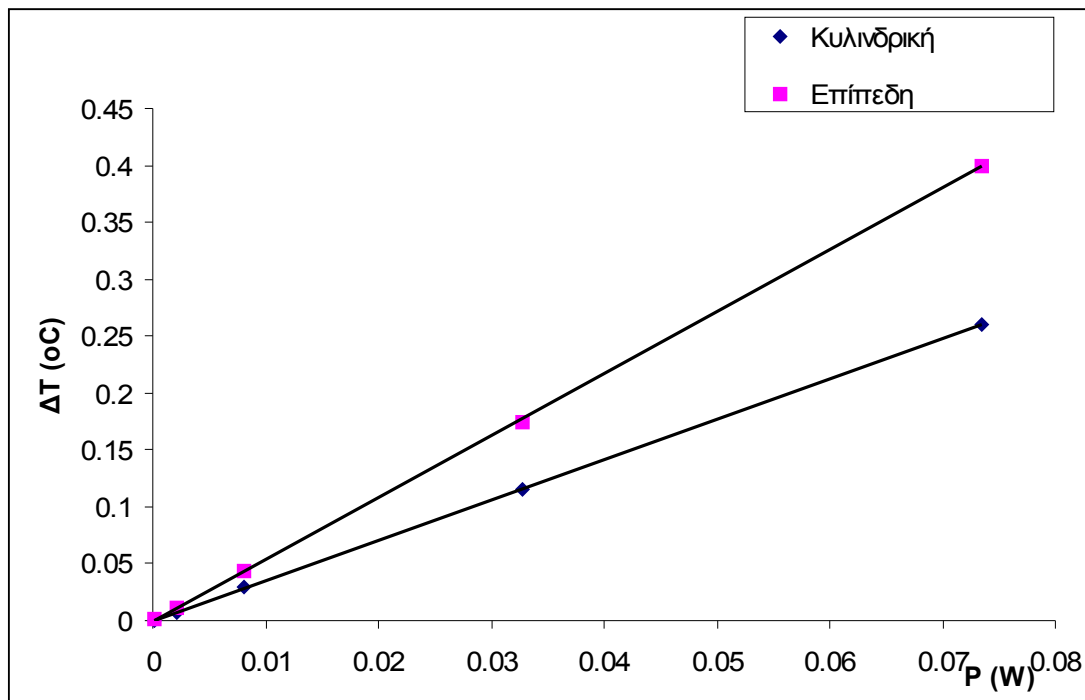
Αυτό σημαίνει ότι κατά τη μοντελοποίηση ενδεχομένως δεν έχει ληφθεί υπόψη κάποια συνεισφορά που αυξάνει τις απώλειες και άρα τη σταθερά χρόνου του συστήματος .

Τέλος και η πρόβλεψη και οι μετρήσεις συμφωνούν μετά τα 220 min περίπου, όπου η θερμοκρασία του δείγματος παραμένει σταθερή.

Συμπερασματικά οι αποκλίσεις που υπάρχουν ανάμεσα στις πειραματικές τιμές και στις τιμές που προβλέπουν και τα δύο μοντέλα μπορούν να οφείλονται στις προσεγγίσεις που έγιναν θεωρώντας και στα δυο μοντέλα ότι :

- Στον υπολογισμό της ισχύος που εκπέμπει το γυαλί, στο θερμικό υπέρυθρο, σαν επιφάνεια εκπομπής A δεν υπολογίστηκε ολόκληρη η επιφάνεια του γυαλιού, αλλά επιφάνεια ίση με την επιφάνεια του κινητού όπου η μεταβολή της θερμοκρασίας του γυαλιού ήταν μεγάλη.
- Στον υπολογισμό μεταφοράς ενέργειας λόγω αγωγιμότητας διαμέσου πολυστερίνης, θεωρήθηκε ότι η θερμοκρασία της πολυστερίνης T_{pol} έχει παντού την ίδια τιμή, (αυτή που μετρήθηκε σε δύο σημεία της).
- Επιπλέον στο κυλινδρικό μοντέλο, η απόσταση από τον άξονα του κυλινδρικού δοχείου του δείγματος μέχρι το πέρας της μόνωσης, r_3 , ήταν διαφορετική στις τρεις διευθύνσεις του παραλληλεπιπέδου όπως φαίνεται στο Σχ.9.2 ενώ στον υπολογισμό χρησιμοποιείται μία τιμή που επιλέχθηκε με κατά προσέγγιση σταθμιστικούς συντελεστές στις τρεις διευθύνσεις.
- Τέλος η ισχύς που εκπέμπει το κινητό όπως προαναφέρθηκε είναι και πολύ δύσκολο να μετρηθεί και μεταβάλεται αυτόματα συνέχεια.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι προβλέψεις της μεταβολής της θερμοκρασίας του δείγματος για το εύρος τιμών της ισχύος των μικροκυμάτων που εκπέμπει το κινητό από 0,2 mW έως 70 mW.



Σχ.10.2 Προβλεπόμενη αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος σαν συνάρτηση της ισχύος που εκπέμπει το κινητό.

Από το παραπάνω σχήμα συμπεραίνουμε τα εξής:

A) Εάν η εκπεμπόμενη ισχύς είναι 0,5 mW , δηλαδή έχει την τιμή που αντιστοιχεί στη μέτρηση με τη HyperLog κεραία κεφ. 6.1α , τότε η προβλεπόμενη ΔT είναι από 0,02 έως 0,03 °C.

B) Εάν η εκπεμπόμενη ισχύς είναι 65,5 mW , δηλαδή έχει την μέση μέγιστη τιμή προς τα εμπρός της ακτινοβολίας του, τότε η προβλεπόμενη ΔT είναι 0,22 °C έως 0,35 °C.

Σε κάθε περίπτωση η αύξησης της θερμοκρασίας του δείγματος που οφείλεται αποκλειστικά στα μικροκύματα είναι πολύ μικρή και οριακά μόλις πάνω από την δυνατότητα του συστήματος καταγραφής που χρησιμοποιήσαμε.

10.2 Συμπεράσματα - μελλοντικές κατευθύνσεις

Μετά την ολοκλήρωση των θεωρητικών μοντέλων και της διεργασίας των πειραματικών μετρήσεων τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι ότι:

- Η αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος λόγω της RF ακτινοβολίας του κινητού είναι ένα μικρό ποσοστό της ολικής αύξησης .
- Η ακτινοβολία από το κινητό στο θερμικό υπέρυθρο είναι εκείνη που επηρεάζει κατά κύριο λόγο τη θερμοκρασία του δείγματος, αφού σύμφωνα με τις μετρήσεις η θερμοκρασία του κινητού αυξάνεται κατά 10 °C σε 30 min περίπου και με βάση τους υπολογισμούς η θερμική ισχύς (THERMAL ~ 3,4 mW) είναι πολύ μεγαλύτερη από την ισχύ της RF ακτινοβολίας του κινητού (~0,5 mW).
- Η παρεμβολή του γυαλιού έγινε με σκοπό να απορροφηθεί η θερμική ακτινοβολία από το κινητό. Επειδή όμως αυξάνονταν και η θερμοκρασία του γυαλιού, αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να λειτουργεί το ίδιο σα δευτερογενή πηγή θερμικής ακτινοβολίας. Έτσι είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί πειραματικά η αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος λόγω της RF ακτινοβολίας του κινητού γιατί οι μετρήσεις μας «δηλητηριάζονται» από τη θερμική ακτινοβολία του γυαλιού.
- Συμπερασματικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτήν τη μελέτη είναι σε συμφωνία με αυτά της διεθνούς βιβλιογραφίας, που αναφέρθηκαν αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 4.2 .

Μελλοντική επιδίωξη θα μπορούσε να είναι η πλήρης εξουδετέρωση της ακτινοβολίας στο θερμικό υπέρυθρο από το περίβλημα του κινητού για να μετρηθεί η αύξηση της θερμοκρασίας που προκαλείται μόνο από την επίδραση της RF ακτινοβολίας.

ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά, πειραματικά αλλά και θεωρητικά εάν η παρατηρούμενη αύξηση της θερμοκρασίας σε υλικά που βρίσκονται πολύ κοντά σε κινητά τηλέφωνα σε λειτουργία, οφείλεται στην απορρόφηση της RF ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπουν τα κινητά στην περιοχή μικροκυμάτων. Ο σκοπός είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συνεισφορά της RF ακτινοβολίας των κινητών στην αύξηση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου ιστού κατά τη διάρκεια χρήσης των. Ο λόγος είναι επειδή τα 'θερμικά αποτελέσματα' της ακτινοβολίας των κινητών (η αύξηση της θερμοκρασίας του ιστού) αποτελούν τη βάση καθορισμού των ορίων έκθεσης για τους χρήστες. Τα όρια αυτά χρησιμοποιούνται παγκόσμια τόσο για το χαρακτηρισμό κάθε κινητού τηλεφώνου (με την αναγραφή της 'τιμής SAR' στα χαρακτηριστικά του) όσο και για την έκδοση των αδειών τοποθέτησης των κεραιών κινητής τηλεφωνίας.

Στην παρούσα μελέτη επιλέχθηκαν κατάλληλα υλικά, των οποίων οι σχετικές φυσικές σταθερές έχουν παρόμοιες τιμές με τις αντίστοιχες σταθερές του ανθρώπινου ιστού, αποφεύγοντας έτσι μακρά έκθεση ατόμων και μη ελεγχόμενες θερμοκρασιακές μεταβολές λόγω εφίδρωσης ή/και μεταβολών στην κυκλοφορία του αίματος.

Τα πειράματα που ακολούθησαν επέτρεψαν τον εντοπισμό πηγών θέρμανσης που συνεισφέρουν σημαντικά στην αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών κατά τη χρήση κινητών, αλλά που είναι διαφορετικές από την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα κινητά στην περιοχή των μικροκυμάτων. Μάλιστα υπέδειξαν να στραφεί η προσοχή, για πρώτη φορά, από όσο γνωρίζουμε, στο ρόλο της, σχετικά ακίνδυνης, ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, στο θερμικό υπέρυθρο.

Με οδηγό αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα, στήθηκαν, στη συνέχεια, οι θεωρητικές εκφράσεις των ρυθμών με τους οποίους διάφοροι μηχανισμοί μπορούν να προκαλέσουν απολαβή ή/και απαγωγή θερμότητας και υπολογίστηκε η αύξηση της θερμοκρασίας του δείγματος από πρώτες αρχές, υποθέτοντας συμμετρία στη διάδοση θερμότητας στα υλικά. Δύο συμμετρίες εξετάστηκαν, η κυλινδρική και η επίπεδη.

Η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης που προέκυψε δίνει αναλυτική λύση για τη θερμοκρασία του δείγματος συναρτήσει του χρόνου υπό τον όρο ότι η ένταση της ακτινοβολίας μικροκυμάτων του κινητού και οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος, της μόνωσης του δείγματος και του κινητού δεν μεταβάλλονται με το χρόνο. Επειδή όμως η θερμοκρασία του κινητού αυξάνεται σημαντικά κατά τη λειτουργία του (και μειώνεται ανάλογα στο τέλος της συνομιλίας), η λύση βελτιώθηκε στη συνέχεια αναπτύσσοντας την σε αναλυτική κατά τμήματα, διαιρώντας το ολικό χρονικά διάστημα σε πολλά τμήματα, σε

κάθε ένα από τα οποία η θερμοκρασία του κινητού θεωρείται σταθερή. Αυτή η ημι-αναλυτική λύση προβλέπει, σε αποδεκτό βαθμό, τις μεταβολές της θερμοκρασίας του δείγματος που μετρήθηκαν στα πειράματα. Για να προκύψει αριθμητικό αποτέλεσμα απαιτούνται: α) οι πειραματικές τιμές των θερμοκρασιών του περιβάλλοντος, της μόνωσης του δείγματος και του κινητού, β) οι τιμές φυσικών σταθερών (όπως θερμική αγωγιμότητα, πυκνότητα, ειδική θερμότητα) των υλικών μόνωσης του δείγματος, γ) η ισχύς της ακτινοβολίας που εκπέμπει το κινητό στην περιοχή των μικροκυμάτων, δ) το ποσοστό της ακτινοβολίας μικροκυμάτων, η οποία απορροφάται από το δείγμα και ε) το ποσοστό της ακτινοβολίας στο θερμικό υπέρυθρο, η οποία απορροφάται από το δείγμα. Τα δύο τελευταία απαιτούν γνώση του συντελεστή απορρόφησης του δείγματος στα αντίστοιχα μήκη κύματος και υπολογισμούς των γεωμετρικών τροποποιήσεων λόγω των διαστάσεων κεραίας-δείγματος και της μικρής των απόστασης.

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε εδώ μπορεί να προβλέψει την άνοδο της θερμοκρασίας που οφείλεται σε κάθε συνεισφορά χωριστά, άρα και στην ακτινοβολία μικροκυμάτων που εκπέμπει το κινητό. Συμπερασματικά η παρούσα εργασία, σε συμφωνία με προηγούμενες στη βιβλιογραφία (που αναφέρονται όμως στον ανθρώπινο ιστό), δεν μπόρεσε να ανιχνεύσει αύξηση θερμοκρασίας, που να οφείλεται μόνο στην ακτινοβολία μικροκυμάτων που εκπέμπουν τα κινητά, σε υλικά που συγκρίνονται με τον ανθρώπινο ιστό όσον αφορά στην απορρόφηση μικροκυμάτων. Η απλή αναλυτική πρόβλεψη που επιτυγχάνεται στην παρούσα εργασία, υπολογίζει την αύξηση αυτή σε $\sim 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η απλή αναλυτική πρόβλεψη που επιτυγχάνεται στην παρούσα εργασία είναι συμβατή σε αποδεκτό βαθμό με τις μετρήσεις που έγιναν. Επιπλέον προβλέπει ότι η συνεισφορά των μικροκυμάτων του κινητού δεν υπερβαίνει $\sim 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ στη συνολική αύξηση της θερμοκρασίας $\sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, δηλαδή συνεισφέρει κατά $\sim 20\%$. Σε μορφή ποσοστού, μπορεί να συγκριθεί με προηγούμενες προβλέψεις στη βιβλιογραφία που βασίζονται σε υπολογισμούς ή μετρήσεις σε ανθρώπους και διαπιστώνεται ότι συμφωνεί. Η παραπάνω μικρή αύξηση της θερμοκρασίας, σε συνδιασμό με ερευνητικά αποτελέσματα που συνεχίζουν να δημοσιεύονται συσχετίζοντας χρήση κινητών με προβλήματα υγείας, θέτει το ερώτημα αν τα υπάρχοντα όρια 'ασφαλούς' έκθεσης που βασίζονται σε σημαντική, πάνω από 1°C , αύξηση της θερμοκρασίας του ανθρώπινου ιστού, είναι παραπλανητικά. Υπάρχει ανάγκη, επομένως να αναθεωρηθούν τα όρια ασφαλούς έκθεσης, και πιθανόν να βασιστούν όχι στα θερμικά αλλά στα μη θερμικά αποτελέσματα της RF ακτινοβολίας, που εκπέμπουν τα κινητά, στον ανθρώπινο ιστό.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] ΠΑΝΤΙΝΑΚΗΣ Α., Στοιχεία Φυσικής για επιστήμονες και μηχανικούς II, Ηλεκτρομαγνητισμός Οπτική Σύγχρονη Φυσική, 108-126, 2007.
- [2] HEWITT P.G., Οι έννοιες της Φυσικής, τόμος II, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, 73-83, 1997.
- [3] ΕΕΤΤ, Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και κινητή τηλεφωνία: Τα επιστημονικά δεδομένα, 5-17, 2006.
- [4] ICNIRP Guidelines, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Phys., (74), 494-522, 1998.
- [5] Balanis C. A., Antenna Theory: analysis and design, 2nd ed., John Willey & Sons Inc., 1-20, 28-46, 64-68, 1997.
- [6] Properties of metals-Thermal, www.engineersedge.com/properties_of_metals.htm
- [7] Kraus J. D., Antennas, 2nd ed, McGraw-Hill, 1988.
- [8] Plyler E., Infrared Spectra of Methanol, Ethanol, and n-Propanol, Journal of Research of the National Bureau of Standards, (48), 281-286, 1952.
- [9] Saunders S.R., Antennas and Propagation for Wireless Communication systems, J. Wiley & Sons, LTD, 9-20, 1999.
- [10] Χαλκιώτης Κ.Ν., Βασικές αρχές λειτουργίας των δικτύων κινητών επικοινωνιών (GSM/GPRS - UMTS), των κινητών τηλεφώνων και άλλων ασύρματων διατάξεων μικρής εμβέλειας (Bluetooth, WLAN), Πρακτικά Ημερίδας : Επιδράσεις της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην υγεία, Αμφιθέατρο Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών, 1-5, 2005.
- [11] Zemansky M.W., Heat and thermodynamics, 4th edition, McGraw-Hill, 1957.
- [12] Knottnerus J. A., Mobile telephones, an evaluation of health effects, Health Council of the Netherlands, 26-30, 2002.
- [13] Stewart W., Mobile phones and health, Independent Expert Group On Mobile Phones- IEGMP, 28-31, 35-36, 60-85, UK 2000.
- [14] Gabriel C., Gabriel S., Grant E., Halstead B., Mingos M., Dielectric parameters relevant to microwave dielectric heating, Chemical Society Reviews, 27, 213-223, 1998.
- [15] Durney C.H., Radiofrequency radiation dosimetry handbook: Fourth Edition. Brooks Air Force Base: USAFSAM – TR, 85-73, 1986.
- [16] Kuster N., Balzano Q., and Lin J., Mobile Communication Safety, Chapman & Hall, 36, 1997.

- [17] Chaplin M., Water Dielectric and Microwave Radiation, www.lsbu.ac.uk/water/microwave.html .
- [18] Zelsmann R. H. Temperature dependence of the optical constants for liquid H₂O and D₂O in the far IR region, *J. of Mol Structure*, (350), 95- 114, 1995.
- [19] Yoo D.S. Initial assessment of thermographic measurements on thermal effects induced on a human head due to 1 GHz mobile phones, *IEEE, Antennas and Propagation Society Intrnational Symposium*, (2),1037-1040, 2003.
- [20] Straume A., Oftedal G., Johnsson A., Skin Temperature Increase Caused by a Mobile Phone: A Methodological Infrared Camera Study, *Bioelectromagnetics*, (26) 510-519, 2005.
- [21] Meissner T. Wentz Fr., The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, (42),1836-1849, 2004.
- [22] Meredith R.J., *Engineers handbook of industrial microwave heating*, IEE, 28-31, 1983.
- [23] Kitamura R., Pilon L., Jonasz M., Optical constants of silica glass from extreme ultraviolet to far infrared at near room temperature, *Applied optics*, (33), 8118-8133, 2007.
- [24] Wainwright P., Thermal effects of radiation from cellular telephones, *Phys. Med. Biol.*, (45), 2363-2372, 2000.
- [25] Anderson V., Rowley J., Measurements of skin surface temperature during mobile phone use, *Bioelectromagnetics*, (28), 159-162, 2007.
- [26] Leeuwent G., Lagendijk J., Leersum B., Zwamborn A., Hornsleth S., Kotte A., Calculation of change in brain temperatures due to exposure to a mobile phone, *Phys. Med. Biol.*, (44), 2367-2379, 1999.
- [27] Elabbassi E. B., Seze R., Thermal skin damage and mobile phone use, *Proceedings of the 28th general assembly of International Union Radio Science (URSI)*, 23-29 October, New Delhi, India, 2005.
- [28] Bernardi P. Cavagnaro M., Pisa S., Piuizzi E., Specific absorption rate and temperature increases in the head of a cellular- phone user, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, , (48), No 7, 1118-1126, 2000.
- [29] Bernardi P. Cavagnaro M., Pisa S., Piuizzi E., Power absorption and temperature elevations indused in the human head by a dual – band monopole – helix antenna phone, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, (49), No 12, 2539-2546, 2001.

- [30] Gandhi Om. P., Li O. X., Kang G., Temperature rise for the human head for cellular telephones and for peak SARs prescribed in safety guidelines, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, (49), No 9, 1607-1613, 2001.
- [31] Adey W. R. and Bawin S.M., Binding and release of brain calcium by low-level electromagnetic fields: A Review, *Radio Science*, (17), 1495-1575, 1982.
- [32] Lin J. C., On microwave induced hearing sensation, *IEEE Transactions on Microwave Theory Techn.*, (25), 605-613, 1977.
- [33] Siegel R. Howell J. R., Thermal radiation heat transfer, 3rd ed, Taylor & Frances, 13-43, 1992.
- [34] Martínez - Burdalo M ., Martín A., Anguiano M., Villar R., Comparison of FDTD - Calculated specific absorption rate in adults and children when using a mobile phone at 900 and 1800 MHz, *Phys. Med. Biol.*, (49), 345-354, 2004.
- [35] French P.W., Penny R., Laurence J.A., Mobile phones, heat shock proteins and cancer, *Differentiation*, (67), 93-97, 2000.
- [36] Repacholi M.H. Basten A., Gebiski V., Noonan D., Finnie J., Harris A. W., Lymphomas in Eμ-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Rad. Res.*, (147), 631-640, 1997.
- [37] Sarimov R., Malmgren L., Markova E., Persson B., Belyaev I., Non- thermal GSM microwaves affect chromatin conformation in human lymphocytes similar to heat shock, *IEEE Transactions on Plasma -Science*, (32) 1600-1608, 2004.
- [38] Markova E. Hilbert L., Malmgren L., Persson B., Belyaev Y., Microwaves from GSM Mobile Telephones Affect 53BPI and gamma-H2AX Foci in Human Lymphocytes from Hypersensitive and Healthy Persons, *Environ Health Perspect*, (133), 1172-1177, 2005.
- [39] Khlaiwi Th., Meo S., Assosiation of mobile phone radiation with fatigue, headache, dizziness, tension and sleep disturbance in Saudi population, *Saudi Medical Journal*, (25), 732-736, 2004.
- [40] Samaras, T.; Kalampaliki, E.; Sahalos, J.N., Influence of Thermophysiological Parameters on the Calculations of Temperature Rise in the Head of Mobile Phone Users, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, (49), 936 – 939, 2007.
- [41] Ollikainen J., Kivekas O., Toropainen A., Vainikainen P., Internal dual band patch antenna for mobile phones, *Proceedings AP2000 Millennium Conf. On Antennas & Propagation*, 1111, 2000.