

ל. שכטר & ד. שיבר

EE PUB No. 1312
מרץ 2002

שדות אלקטרומגנטיים וגוף האדם

הפקולטה להנדסת חשמל
הטכניון-מכון טכנולוגי לישראל



שדות אלקטרומגנטיים וגוף האדם

ל. שכטר & ד. שיבר

הפקולטה להנדסת חשמל
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
חיפה 32000

מטרת הסקירה הנוכחית היא לספק מידע כמותי בנושא ההשפעה של קרינה אלקטרומגנטית לא מיננת על גוף האדם. הנתונים אשר יוצגו כאן עשויים לענות על חלק מהשאלות המתעוררות בציבור אך באותה מידה הם עשויים לעורר הרבה שאלות אחרות אשר אינן מתעוררות ברגע הראשון. בסוף הסקירה תוצג התמצית של הקווים המנחים לחשיפה לקרינה, כפי שהוצגו על ידי הוועדה הבינלאומית להגנה מפני קרינה לא מיננת [Health Physics 74(4) p. 494-522 (1996)].

מבט כללי

הגידול המואץ בשימוש בטלפונים סלולריים והמצאותן של אנטנות שידור בסביבתנו הקרובה, מעוררים חשש מסוים מפני נזקים לבריאות, אשר עלולים להגרם על ידי השדה האלקטרומגנטי, הן למשתמש האקטיבי והן לסובבים אותו. קיים קושי במתן איפיונים כלליים לאנטנות מרכזיות בשל התלות בטווח השידור וכיוון השידור של עיקר האנרגיה, אך ביחס לטלפון אישי, ידוע שבפעולה ב 800MHz ההספק המקסימלי המשודר הוא כ 0.6W. זה לכשעצמו עדיין לא אומר לנו כלום ואחת המטרות של סקירה זו היא לתת קנה מידה למספרים האלה בכל הקשור להשפעות ביולוגיות.

טלפונים אלחוטיים ואנטנות, אינם ההתקנים היחידים אשר חושפים אותנו לשדה אלקטרומגנטי. קווי מתח מכל הסוגים, חושפים אותנו לרמות הספק אלקטרומגנטי אשר לעתים עולות בששה סדרי גודל על אלו של הטלפון הסלולרי -- בהבדל עקרוני אחד, תדר העבודה הוא 50Hz. מנקודת הראות של חשיפת האדם הנושא האחרון נחקר במשך עשרות בשנים ואילו חקירת התקנים הקשורים לתקשורת סלולרית, נכנסה לתודעה של הציבור הרחב בעיקר במהלך המחצית השנייה של שנות התשעים. לא רק עצם החשיפה היא חשובה אלא גם לזמן החשיפה יש השפעה משמעותית על מערכת השקולים אשר מובילה לשיעור החשיפה הרצוי. כך למשל, עובדים של חברת חשמל אשר נמצאים בקרבת קו מתח הרבה שעות ביממה נמצאים בקבוצת סיכון שונה מאשר פרט זה או אחר באוכלוסיה אשר עובר מתחת לקוי מתח באקראי. בשני המקרים, חשיפה לקוי מתח או לטלפונים סלולריים, לא קיימת אחדות דעים ביחס למידת ההשפעה של השדות הנ"ל על גוף האדם בוודאי לא כמו במקרה של קרינה מייננת (כדוגמת קרני רנטגן או קרינה אולטרא סגולה).

מנקודת הראות של החומר, האנרגיה האגורה בחלקיק אור (פוטון) בתחום קרני הרנטגן מספיקה על מנת לתלוש אלקטרון מתוך אטום או לשבור קשר כימי. לעומת זאת, האנרגיה של פוטון בתחום המיקרוגל היא קטנה בארבעה-חמישה סדרי גודל והפוטון משפיע רק על מצבי ויברציה או רוטציה של מולקולה. אמנם עקרונית, בתהליכים לא ליניאריים שדה מיקרוגל בעל עצמה גבוהה יכול ליינן, אך תהליכים אלה נצפו במערכות בהן צפיפות האנרגיה היא הרבה יותר גבוהה מהערך האופייני השורר במערכות אשר מענינות אותנו כאן. יחד עם זאת, לא ניתן לבטל לחלוטין את האפשרות שקרוב לתנאי תהודה, צפיפות האנרגיה המקומית עלולה לגרום ליינון או השפעה משמעותית אחרת על התפקוד הכימי של מולקולה נתונה. בקיצוניות השנייה, קרי בתדר נמוך

במיוחד, צריך לזכור שגלי המוח כפי שנמדדים באלקטרו-אנצפלו-גרמה (EEG), הם בתדר של כמה עשרות הרצים, לכן, במבט איכותי, אין לפסול את האפשרות לאינטראקציה בין השדה של קווי המתח הגבוה והמוח או אפילו עם שדה המאופנן בתדר נמוך אך הנישא על ידי גל מיקרו.

שדות אלקטרומגנטיים בטבע

כדי לקבל תחושה על ההשפעה של שדות עשויים ידי אדם, כדאי לסקור תחילה בקצרה את המקורות הטבעיים, אליהם בני אדם היו חשופים, עוד לפני ההתפתחויות המדעיות והטכנולוגיות של המאה העשרים. המקור הטבעי העיקרי של קרינה על פני כדור הארץ הוא השמש. הנטייה הטבעית היא לחשוב שהאור הנראה בגלל חוש הראיה שלנו והאור האולטרה סגולי, בגלל המודעות לסרטן העור, הם שני המרכיבים העיקריים של ספקטרום הקרינה המגיע מהשמש. אמנם נכון הדבר שהספקטרום הוא מקסימום באזור של האור הנראה אך בפועל זהו חלק קטן מספקטרום התדרים שמגיע לכדור הארץ. הזכרנו קודם, את גלי המוח אשר נמדדים בתדר של כמה עשרות הרצים ונתן לשאול מהיא השפעת הקרינה שמגיעה מהשמש בתחום תדרים זה. הערכה ראשונית של השדה מצביעה על כך שב 10Hz השדה החשמלי הוא מסדר גודל של 10^{-3}V/m ואם לוקחים בחשבון את הדעיכה כתוצאה מחזירת השדה לגוף הרי שברמת של הרקמה או העצב, שדה זה יהיה מסדר גודל של 10^{-9}V/m וזו רמה נמוכה בהרבה סדרי גודל מהאותות המתרחשים במוח.

על פני כדור הארץ ישנם מספר מקורות טבעיים אשר יוצרים שדות אלקטרומגנטיים המשתנים לאט בזמן: החלקיקים הטעונים אשר מגיעים לאטמוספירה מהשמש יוצרים שדה חשמלי סטטי אשר במזג אוויר טוב הוא מסדר גודל של $1.5 \times 10^2 \text{ V/m}$ אך בעת סופה ערכו עלול להגיע ל 10^4 V/m . העצמה של השדה חשמלי המשתנה-בזמן השוררים על פני כדור הארץ יורדת מ 10^{-2}V/m ב 1Hz ל 10^{-6}V/m ב 3kHz . לבסוף, הערך האופייני של השדה המגנטי של כדור הארץ הוא $50 \mu\text{T}$. ערך זה, עשוי לגדול כמעט בסדר גודל בעת סופות במיוחד ככל שמתקרבים לקטבים של כדור הארץ והוא תלוי גם במשאבי הרוח הסולרית אשר פוגעים באטמוספירה של כדור הארץ.

שדות אלקטרומגנטיים עשויים ידי אדם

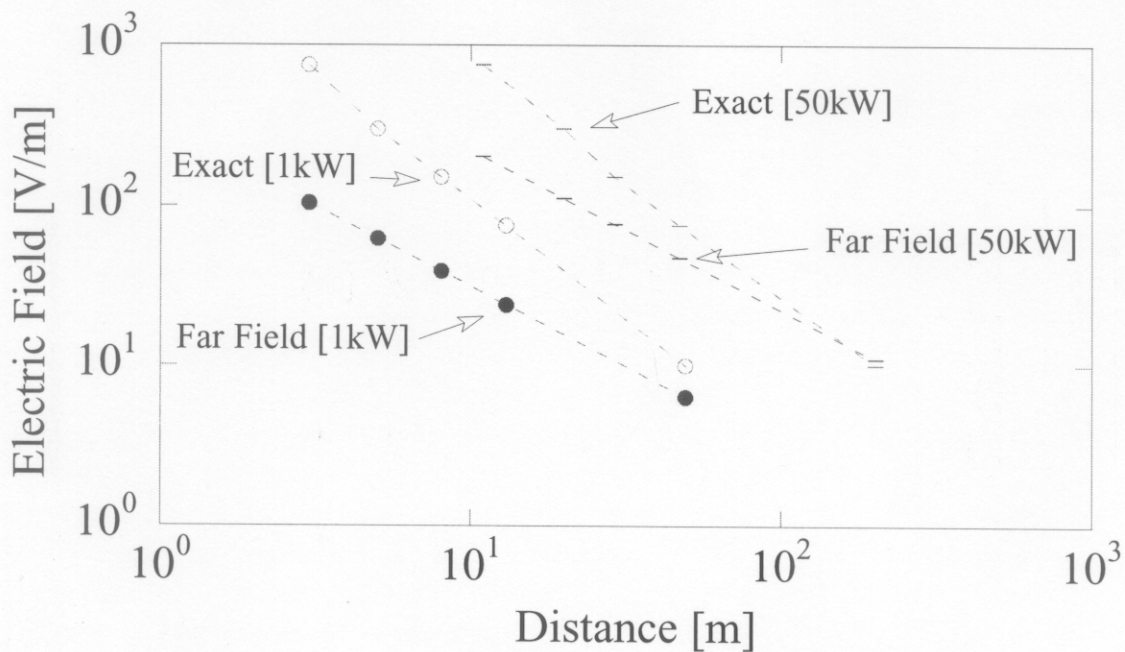
להשלמת התמונה של השדות הסובבים אותנו לציין כמה מן הערכים האופייניים של שדות הנוצרים על ידי מכשירים עשויים ידי אדם עם דגש מיוחד על מקורות קורנים. כך למשל שידור רדיו מאופנן אמפליטודה (AM) פועל בתחום התדרים בין 535kHz - 1705kHz והספק השידור משתנה מתחנה אחת למשניה אך הוא נע בין 250W ל 50kW ; אורכי הגל המתאימים הם 176m - 560m . במקרה של אנטנה בודדת השידור הוא אחיד בכל זווית היקפית אך נתן לדאוג לכיווני שידור מועדפים (עצמה מופחתת או מוגברת) על ידי הצבת מספר אנטנות במערך. שטף האנרגיה המשודר על ידי האנטנה קטן ככל שמתרחקים מהאנטנה הביטוי הבא מתאר את השתנות שטף האנרגיה כפונקציה של המרחק מן האנטנה

$$S[\text{W/m}^2] = 0.13 P[\text{W}] / (R[\text{m}])^2$$

כאשר המרחק R מבוטא במטרים וההספק המשודר על ידי האנטנה בוואטים. ביטוי זה תקף במרחק גדול מאורך הגל (far field) כך למשל שידור ב 1MHz הספק של 50kW מתבטא במרחק של עשרה אורכי גל (3 ק"מ) לשטף אנרגיה של $7 \times 10^{-4}\text{W/m}^2$ אשר מתאים לשדה חשמלי של 0.7V/m ; השדה המגנטי מתקבל על ידי חלוקה ב 3×10^8 . במקרה זה הוא כ 2nT זאת אומרת כמעט 5 סדרי גודל פחות מהשדה של כדור הארץ. מאחר ובקרוב השדה הרחוק שטף האנרגיה קשור לשדה החשמלי על ידי $S = E^2/240\pi$ ניתן לחשב את השתנות השדה החשמלי (הרחוק) כפונקציה של המרחק וההספק המשודר

$$E_{\text{far-field}} [\text{V/m}] = 9.9 (P[\text{W}])^{0.5} / R[\text{m}]$$

במרחקים קטנים מאורך גל השדה משתנה בצורה שונה והעצמה האמיתית של השדה גבוהה בכמעט סדר גודל מזו שנקבל אם נשתמש בביטוי אשר לעיל. תמונה 1 מחדדת את חשיבות השדות הקרובים לאנטנה. בתמונה זו, מוצג הפתרון המדויק לעומת הפתרון של השדה הרחוק אשר כמובן אינו תקף במרחק קטן מאורך גל מן האנטנה. הדבר חשוב במיוחד בטלפונים סלולריים שם השדה הקרוב הוא זה שמשפיע על הרקמה הקרובה לאנטנה. כדאי להדגיש שביטויים אלה מניחים התפשטות גל אלקטרומגנטי בריק ואינם לוקחים בחשבון את ההחזרה או החדירה לתוך הגוף.



תמונה 1: השדה המדויק באזור הקרוב לאנטנה לעומת הפתרון של השדה הרחוק אשר אינו תקף שם עבור שני הספקים 50kW ו 1kW. באופן ברור שההערכת השדה בקרבת האנטנה באמצעות הביטוי לשדה הרחוק עלולה להביא לשגיאה בסדרי גודל בהערכת השדה.

שידורי רדיו מאופנן תדר (FM) פועלים בתדרים בין 88-108MHz וגם כאן הספק השידור האופייני משתנה מתחנה אחת למשניה אך הוא נע בין 10W עד 100kW. איפיוני השדה האלקטרומגנטי זהים לאלה אשר בשידור ה-AM כך למשל במרחק של 1000 מטר מאנטנה אשר משדרת 10kW ההספק על שטח של גוף אדם, $180 \times 50 \text{ cm}^2$, הוא בקרוב 1mW זאת כאמור בהשוואה לטלפון סלולרי המשדר 600 mW. האיפיונים של שדורי טלוויזיה דומים מאוד להוציא העובדה שתחום התדרים נע בין 50-900MHz.

מערכות שידור נקודתיות, Terrestrial Microwave Radio, אלה הן אנטנות אשר קורנות לכיוון מאוד מוגדר בתחום תדרי (ערוצים) צר. הספק השידור הוא מסדר גודל של 20W לערוץ. התדרים אשר השמוש בהם הוא המרבי הוא 3.7, 4.2, 5.925, 6.425GHz והתחום בין 10.7-11.7GHz. מאחר ורוב ההספק משודר בכיוון מאוד מוגדר, מידת הסיכון מחשיפה הוא קטן יחסית אלא אם כן הספק משודר גם בזוויות שהן שונות מהתכנון המקורי. שידור אחר אשר כבר נפוץ והוא יהפוך כנראה לנפוץ יותר בעתיד זהו שידור לוויני. תדרי השידור המקובלים הם 5.85-6.65GHz, 14.0-14.5GHz ו-27-31GHz. הספק השידור משתנה בהתאם למספר הערוצים הפעילים ותנאי מזג האוויר. בתנאים רגילים, ההספק נע בין מספר עשרות וואטים ליותר מ-1kW בערוץ נתון. מזג האוויר עלול לגרום לעליה של יותר מפי 2 בהספק השידור.

מערכות שידור אחרות כוללות מכ"מ שליטה אווירית אשר משדר הספקים רבי עצמה של כמה עשרות מיליוני וואטים לפרקי זמן מאוד קצרים של כמה מאות ננו-שניות. מכ"מ ימי המשמש לניווט ולמעקב אוניות מנמלים הפועלים בתחום 9.330-9.500GHz והספק השידור האופייני שלו הוא 20kW. תחום הספקטרום בו פועלים רוב הטלפונים האלחוטיים הוא 46-60MHz ומיעוטם פועל ב-915MHz או 2.45GHz ואילו הטלפונים הסלולריים פועלים בתחום בין 800-900MHz או סביב 2GHz. ההספק המומלץ הוא פחות מ-1W ולרוב פעולתם לא עולה על 0.6W.

קיים מגוון לא מבוטל של מכשירים המבוססים על קרינה אלקטרומגנטית אשר מיועדים לטיפול רפואיים תרמיים. מכשירים המיועדים למטרה זו פועלים במספר תדרים מוגדרים: 13.56, 27.12, 433, 915, 2450MHz עם הספקי שידור בין 25W עד ל-2kW. הללו משמשים לחימום סלקטיבי של גידולים לטמפרטורה של למעלה מ-42°C כאשר נעשה נסיון לפגיעה מנימלית בריקמה הברירה; זמן טיפול אופייני נע בין חצי שעה לשעה. מרכיב חשוב בקבוצת המכשירים הרפואיים הוא המכשיר להדמייה מגנטית [(MRI) Magnetic Resonance Imaging]. זהו מכשיר לאבחון אשר במהלך פעולתו הוא מנצל גלים אלקטרומגנטיים בתחום בין 1-100MHz; ההספק הממוצע המשודר אינו עולה על 100W אך במהלך פולס בודד, ההספק הרגעי יכול להגיע ל-10kW. בנוסף לשדה המיקרוגל מופעלים גם שדות מגנטיים חזקים מאוד (0.1-2.0T) אשר מופעלים בפולסים; קצב השינוי בשדה המגנטי הוא מסדר גודל של 0.1-10T/sec; שינוי כזה בשדה המגנטי יוצר בגוף גם שדה חשמלי משמעותי. שיעור החשיפה לקרינת מיקרוגל במקרה זה עשוי לעלות באופן משמעותי על השיעור המומלץ אשר עוד יפורט בהמשך, לכן תמיד יש לשקול את התועלת מול הסיכון בחשיפת החולה לקרינה הנ"ל.

בין השמושים הנרחבים ביותר בקרינת מיקרוגל נתן לציין את תנורי מיקרוגל, אשר לרוב פועלים ב-2.45GHz עם הספקים מ-500W ועד לכמה אלפי וואטים. עבור תנור במצב תקין הספק זה "כלוא" בתוך המהוד לכן ההשפעה הישירה של קרינה זו על העולם החיצון זניחה. גם גלאים לנוכחות אדם למערכות אזעקה או לפתיחה אוטומטית של דלתות הופכים לנפוצים יותר ויותר. הללו פועלים ב-10.5GHz עם הספק שידור של 10mW לכן תרומתם לחשיפה רגעית היא זניחה אולם בשקול ארוך טווח של חודשים או שנים, החשיפה המצטברת עלולה להיות חשובה.

כחלק נפרד מהקידמה שמסביבנו, אנחנו חשופים לשדות הנוצרים על ידי קווי מתח והמכשירים החשמליים הביתיים הרגילים. קווי מתח גבוה, יוצרים תחתיהם שדות חשמליים מסדר גודל של 10^4V/m וכן שדות מגנטיים של $30 \mu\text{T}$; שדות אלה, משרים זרמים אשר במקרה הגרוע (קצר) עלולים להגיע למספר מילי-אמפרים בודדים. מכשירים לשימוש ביתי למשל, שמיכה חשמלית, יוצרים שדות אשר עשויים להגיע ל 250V/m . מכשירים המכילים מנועים, כמו מכשירי גילוח, מייבשי שיער או מקדחה חשמלית, יוצרים בסביבתם הקרובה שדות מגנטיים הגדולים בשני סדרי גודל מהשדה המגנטי של כדור הארץ - לפי מיטב ידיעתנו, נכון להיום, לא ידועה השפעה כלשהי של שדות ממכשירים אלה על בריאות האדם.

שדה אלקטרומגנטי וחומר

אחרי ההערכת גודלם של השדות אשר עשויים להיות רלוונטיים באינטראקציה בין שדה אלקטרומגנטי וחומר (במרח שלנו, האדם), נעשה צעד נוסף ונתאר איכותית מספר מנגנוני אינטראקציה אפשריים. נתחיל את הדיון ברמה המולקולרית. בהרבה מהתופעות בטבע בהם קיימת אינטראקציה יעילה בין חומר ושדה אלקטרומגנטי מתקיים תנאי תהודה. זו מתרחשת כאשר מימדי הגוף שמבצע את האינטראקציה ואורך הגל החשמלי הינם קרובים האחד לשני או השינויים הזמניים המאפיינים את הגוף (התנודה האופיינית) והתדר החשמלי שווים. כך למשל בתחום המיקרוגל, התדר החשמלי מתאים לתדר הויברציוני או הסיבובי של מולקולה ובפרט הלייזר הראשון אשר בעצם נקרא מייזר כי הוא פעל בתחום המיקרוגל, ניצל את התהודה של מולקולת האמוניה על מנת לייצר קרינה בצורה יעילה. תנאי נוסף לאינטראקציה יעילה, בנוסף לתהודה, הוא קיימו גם של אפקט קבוצתי. זה בא לידי ביטוי בכך שאותם חלקיקים המושפעים על ידי השדה, משפיעים חזרה על השדה האלקטרומגנטי באופן קבוצתי. בהעדרם של שני התנאים הללו, אינטראקציה אמנם עשויה להתקיים אולם יעילותה, לטוב או לרע, הינה מוגבלת ביותר.

התכונות האלקטרומגנטיות הקבוצתיות של החומר, ניתנות לתאור באופן פשטני באמצעות גודל אשר מתאר את התרומה של כל החלקיקים (במקרה שלנו מולקולות) לשדה האלקטרומגנטי בנקודה מסוימת. מאחר ותרומה זו, בהרבה מקרים, הינה יחסית לשדה השורר במקום, מאפיינים את החומר באמצעות שלושה מקדמים: **המוליכות החשמלית**, המקשרת בין השדה החשמלי לבין צפיפות הזרם החשמלי. **המקדם הדיאלקטרי**, אשר מהווה מדד למידת הקוטביות של החומר כך למשל אם בין שני לוחות מתכתיים שורר מתח, האנרגיה החשמלית האגורה בהתקן תהיה יותר גדולה ככל שהמקדם הדיאלקטרי, שממלא את החלל בין שני הלוחות, יותר גדול. דוגמא אחרת, אשר מתחילה להיות נפוצה הם הסיבים האופטיים. הללו "כולאים" את האנרגיה האלקטרומגנטית בשני כוונים ומאפשרים את התפשטותה בכיוון השלישי. תפקיד דומה למקדם הדיאלקטרי יש למקדם **הפרמיאביליות** בכל הקשור לאנרגיה מגנטית. התכונות הללו משתנות מחומר לחומר ומתדר אחד למשנהו. כתוצאה מהתכונות האלקטרומגנטיות של החומר, הפילוג המרחבי של השדה האלקטרומגנטי כתוצאה מערור נתון עשוי להשתנות באופן משמעותי. לדוגמא אפשר לחשוב על השבירה של קרני אור במעבר ממים לאויר או ההיפך; פילוג השדה קרי, כיוון התפשטות האור במקרה זה, משתנה במידה משמעותית. ידיעת התכונות האלקטרומגנטיות של החומר, מאפשרת נתוח של פילוג השדה האלקטרומגנטי בגוף, דבר אשר מאפשר איתור גידולים או אף טיפולם במקרים מסוימים.

קרוב למצב תהודה בחומר, המקדם הדיאלקטרי עשוי לקבל ערך שהוא משמעותית גדול מהערך האופייני רחוק מתהודה. יתר על כן, ככל שתדר התהודה יותר נמוך, אורך הגל יותר גדול לכן צפי שמספר החלקיקים אשר משתתפים בתהליך הוא גבוה יותר וכך גם מימדי אזור התהודה גדול יותר. למקדמים הדיאלקטרי והפרמיאבילי תפקיד תפקיד חשוב כאן כי התהודה במובנים עליהם אנחנו מדברים כאן מאופיינת על ידי מעבר מחזורי מאנרגיה חשמלית לאנרגיה מגנטית וההיפך ולמקדמים תפקיד מכריע בקביעת האנרגיה האגורה באזור נתון במרחב. המוליכות החשמלית

לעומת זאת, מהווה מדד למידת איבוד האנרגיה האלקטרומגנטית בתהליכי פיזור בין חלקיקים (קרי מולקולות) - ככל שיש יותר התנגשויות ליחידת זמן, יותר אנרגיה הופכת לחום לכן, בשדה חשמלי נתון, המוליכות יותר גדולה. המשקל של תופעת התהודה הופך למכריע כאשר, בהנחה שכל המערכת נמצאת בשווי משקל תרמודינמי, קצב ההתנגשויות קטן בסקלה של השינויים בשדה האלקטרומגנטי. מאחר וריקמה חיה לא נמצאת בשווי משקל תרמודינמי עם הסביבה, צפוי שבמצבים מסוימים, ההשפעה של המוליכות תהיה קטנה מזו שבמערכת הנמצאת בשווי משקל תרמודינמי. מספיק שבאזור מצומצם קיימת מוליכות נמוכה והמולקולות בתהודה עם שדה אלקטרומגנטי המקומי, על מנת שהאינטראקציה תהיה יעילה. זאת, גם אם מסיבי המולקולות אינן בתהודה עם השדה או המוליכות גבוהה. היבט אחר של חוסר היות רקמה חיה בשווי משקל תרמודינמי עשוי (או עלול) לבוא לידי ביטוי באופי האינטראקציה בסקלת זמן של שעות, ימים, חודשים או אפילו שנים, שהן ארוכות בהרבה מזו שהיא אופינית לשדה האלקטרומגנטי וארוכה ממה שפיסיקאים או מהנדסים רגילים לעבוד ביומים.

בנוסף לתהודה הזמנית (המולקולרית), קיימת גם תהודה מרחבית אשר מופיעה כאשר המימדים הגיאומטריים של אזור שנחשף לקרינה הם שווים בקירוב לאורך הגל באותו אזור. כדי להמחיש תופעה זו, ניתן לבנות מודל של הראש בצורת כדור. בכדור שלוש שכבות המסמלות את המוח, השומן והעור; קוטר הכדור הוא 15cm ונבדקת הבליעה של שני אותות מיקרוגל: האחד ב-2.45GHz והשני ב-918MHz. בשני המקרים שטף האנרגיה הנכנס הוא 1mW/cm^2 . במקרים אלה, מקובל לבחון את הבליעה של הגוף באמצעות גודל הנקרא שיעור הבליעה ליחידת משקל (SAR - Specific Absorption Rate). לפני שנמשיך בדיון כדאי להסביר במספר מילים את מושג ה-SAR. זהו קריטריון, אשר קובע את היחס בין ההספק ליחידת נפח אשר נבלע בתחום נתון, לבין המשקל הסגולי של אותו תחום. מעצם הגדרה זו, ברור שנתן להגדיר גודל זה באופן מקומי (דיפרנציאלי) או גלובלי (אינטגרלי) והתוצאות תהינה שונות בתכלית. כמו כן, כדאי לשים לב שאין שום התייחסות מפורשת לזמן החשיפה בהגדרה זו אם כי כפי שנראה בהמשך, הערך המומלץ הוא ערך ממוצע בזמן למשך 6 דקות. שיעור הבליעה המיוחד במקרה של טלפונים אלחוטיים וסלולריים יידון בהמשך ביתר פירוט אך נציין כעת רק שהוא משתנה בין 0.08-4W/kg. נחזור כעת לתאור התוצאות של חישוב חדירת השדה בכדור המדמה את הראש. במקרה הראשון (2.45GHz), קיימת בליעה משמעותית בסנטימטר הראשון בקרבת פני השטח, שם שיעור הבליעה מגיע ל-2.0W/kg למרות ששיעור הבליעה הממוצע בכל הראש הוא 0.1W/kg. יתר על כן, במרכז הכדור קיים אזור קטן אשר בגלל התכונה הדיאלקטרית של המוח, שיעור הבליעה הוא 0.2W/kg. התמונה משתנה באופן משמעותי בתדר הנמוך יותר כי שיעור הבליעה במרכז המוח הוא 0.45W/kg בהשוואה ל-0.2W/kg קרוב לשפה החיצונית.

בסקירה יותר רחבה של הספקטרום, קיימים סימנים שראש האדם נמצא בתהודה עם תדרי שידור בין 0.4-0.5 GHz לכן, אם כבר להשתמש בקרינת מיקרוגל לצורכי תקשורת, אזי כנראה רצוי להשתמש בטלפונים הפועלים ב-2.0GHz על פני אלה שפועלים ב-0.8GHz כי ניתן להעריך שהאנרגיה אשר נבלעת במוח קטנה יותר, אם כי לא ברור מה ההשפעה של הקרינה הנבלעת בעור. כדי לא לקבל את הרושם שקרינה בהקשר של התהודה המרחבית תמיד פועלת לרעתנו, כדאי לזכור שהיא יכולה לשמש לטיפול בגידולים. לאלה, יש לעתים תכונות חשמליות שונות במקצת מאלו של רקמה בריאה, לכן במצבים מסוימים, ניתן לחמם את הגידול באופן דיפרנציאלי עד כדי פגיעה קטלנית בתאים נגועים, ללא נזק משמעותי לתאים הבריאים.

מחקרים ביו-מולקולרים וביו-רפואיים

ישנן הוכחות די משכנעות, לקיומם של הרבה מנגנוני אינטראקציה, אשר אינם בחינה מנגנוני תהודה אך במקרים אלה אנחנו יודעים רק לעשות קורלציה כללית בין הסיבה לתוצאה - מעט מאוד ידוע על תהליכי הביניים. כך למשל שדה אלקטרומגנטי חלש בתחום תדרים בין 10Hz לבין 450MHz יכול, ככל הנראה, לבצע אינטראקציה ישירה עם רקמת המוח וזו באה לידי ביטוי בהשפעות פיזיולוגיות או התנהגותיות. בפרט שדה חשמלי חלש (10^{-7}V/cm) המושרה במוח, משמש ציפורים בניווט או גורם לשינוי הקשרים של הקלציום ברקמת המוח של חתולים ואפרוחים. אותות בתדר נמוך (40Hz) הרוכבים על גל נושא המתאים לתדר מיקרוגל משפיעים על המוח. במקרה זה מתברר שמספיק שיושרה שדה חשמלי מסדר גודל של 100mV/cm על מנת לשנות את הדפוס של גלי המוח מחד ולשנות את שחרור הקלציום מרקמת המוח מאידך. במקביל, ידוע מזה מספר שנים שפולסים מגנטיים וחשמליים משמשים לערור עצבי. קיימים סימנים די ברורים שהיכולת של אנשים ללמוד, מושפעת משדות מגנטיים (1mT) המופעלים על המוח בתדר (45Hz) קרוב לזה של גלי המוח; באותם ניסויים, לא אובחן כל שינוי ביכולת התגובה המוטורית של בני האדם אשר התנדבו לניסוי. יותר מכך, שינויים כתוצאה מהפעלת שדות חיצוניים נמדדו גם בתמונת גלי המוח. תופעה מעניינת במיוחד התגלתה לפני מספר שנים כאשר נמצא שבמוח קיימים חלקיקים מגנטיים מזעריים. הללו עשויים להיות מושפעים על ידי שדות מגנטיים חיצוניים, בדומה למחט של מצפן בשדה המגנטי של כדור הארץ. במיוחד, הדבר עשוי להיות בעל חשיבות במקרה של שדה מגנטי של MRI אשר ערכו הוא פי 30,000 מהשדה המגנטי של כדור הארץ. היבט אחר של ניצול פולסים אלקטרומגנטיים מחוץ לגולגולת הוא ערור תחושה באוזניים של אנשים חרשים. הערך המקסימלי של השדה המגנטי אשר הופעל במקרים אלה היה 2T ונמשך כאלפית שניה.

נכון להיום, לא ידועים מנגנונים אשר באמצעותם השדה האלקטרומגנטי עשוי או עלול להשפיע על ביו-סינטזה של תאים. הנחת היסוד בשנים האחרונות היא, שהשדות הללו יבצעו תחילה אינטראקציה עם הממברנה של התא וזו אכן נחקרה בצורה מעמיקה. עם זאת, מתברר שקיימות תוצאות נסיוניות אשר מוסברות טוב יותר אם מניחים שהשדה החשמלי החיצוני מבצע אינטראקציה עם הזרמים בתוך האנזים אשר בתוך התא. מחקרים אשר פורסמו לאחרונה מצביעים על כך שבתוך מולקולת DNA ישנה תנועה של כ 10^6 אלקטרונים בשניה. הללו זורמים בתא שקוטרו האופייני הוא 2nm לכן צפיפות הזרם האופיינית היא 5A/cm^2 . כדי לקבל תחושה על סדר הגודל, הרי שאפשר להשוות זאת לצפיפות הזרם אשר זורמת ברדיו-טרנזיסטור המופעל בסוללה רגילה. אם נניח זרם אופייני של 0.01mA הזורם בחוט אשר קוטרו מילימטר אחד, אזי צפיפות הזרם במקרה זה היא שלושה סדרי גודל יותר קטנה קרי 1mA/cm^2 . סביר יהיה להניח ששדות אלקטרומגנטיים מחוץ לתא עשויים לבצע אינטראקציה עם צפיפות זרם זו. הדוגמא של הרדיו-טרנזיסטור מאפשרת להמחיש את המשמעות של המושג אינטראקציה בהקשר זה: הזמזום אשר הרדיו-טרנזיסטור משמיע כאשר אנחנו נמצאים בקרבת קו מתח גבוה הוא סימן מובהק לאינטראקציה בין השדה החיצוני וזרם שזורם באחד מהרכיבים של הרדיו-טרנזיסטור. חוקרים אינם מוציאים מכלל אפשרות שאינטראקציה של שדה חיצוני עם צפיפות זרם של כמה A/cm^2 עשויה או עלולה לשנות את מבנה ה-DNA. נכון להיום, אין עדיין הוכחה חותכת לכך ובודאי לא בכל הקשור לשדות שהקהל הרחב חשוף אליהם.

ברמה המערכתית, המחקרים הביולוגיים מראים שוני רב במידת ההשפעה של השדה האלקטרומגנטי: ברמה המקרו מולקולרית וברמה של מיקרו-אורגניזמים, לא נמצאה כל השפעה בתדר שמעל 5MHz מעבר להשפעה הכרוכה בעלייה בטמפרטורה. רוב המחקרים אשר בחנו את השפעת השדה האלקטרומגנטי על ההפריה, גידול וההתפתחות נערכו ב 2.45GHz שם רק מעט קרינה חודרת לתוך הגוף לכן באופן לא מפתיע לא נמצאה כל השפעה לשדה. גם המערכת ההורמונלית של הגוף נבחנה לרוב עם בתדר הזה ולא נמצאו כל אפקטים משמעותיים עבור SAR

פחות מ 0.4W/kg . כדאי מיד לציין שהרוב המכריע של המחקרים נערכו בסקלת זמן של מספר דקות עד מקסימום של מספר שעות; לא קיימים מחקרים אשר בחנו את ההשפעה על סקלה של ימים, חודשים או שנים. מערכת הדם והמערכת החיסונית נבדקו ונכון להיום לא נמצאו כל סימנים להשפעה בשיעור בליעה של פחות מ 1W/kg . יש סימנים ברורים להשפעת שדה אלקטרומגנטי על הלב על ידי עירור עצבי אם כי לא נמצאה השפעה עבור שטף אנרגיה מתחת ל 10mW/cm^2 או שיעור בליעה קטן מ 2W/kg . מבין המערכות המושפעות על ידי קרינת מיקרוגל העדשה של העין היא רגישה במיוחד לקרינה בתדרים $1-10\text{GHz}$. שפנים אשר נחשפו לשטף אנרגיה של למעלה מ 100mW/cm^2 למשך עד 100 דקות ממקור קרינה של 2.45GHz פיתחו קטרקט; יחד עם זאת, קופים אשר נחשפו לעצמות דומות לא פיתחו קטרקט.

השדה אלקטרומגנטי מבצע אינטראקציה עם המוח ובפרט עם מערכת העצבים המרכזית. ברור לחלוטין שהעצמה האופיינית של שדות אשר באופן ברור משפיעים על התפקוד, אינם גורמים להשפעות הללו דרך מנגנון תרמי אלא מנגנון תהודה מובהק או מנגנון בעל רגישות גבוהה במיוחד שאינו תהודתי אך הוא מוגבר בצורה מאוד יעילה. הזכרנו קודם את יכולת הניווט של ציפורים המבוססת על שדות חשמליים מזעריים (10^{-7}V/m) כאשר השדה המאולץ הוא זה של כדור הארץ ($30-50\mu\text{T}$); מתברר שלכרישים רגישות אפילו גדולה מזו (10^{-8}V/m) המשמשת אותם לניווט. בדיקות שנערכו על קופים מצביעות על כך שהפעלת שדה היצוני מסדר גודל של 2.5V/m בתדר של 7Hz משפיעה על יכולת ההערכה הסוביקטיבית של הזמן. השדה הפנימי במקרה זה הינו מסדר גודל של 10^{-3}V/m והתדר מצביע על אינטראקציה אפשרית עם גלי המוח. רק לשם השוואה נביא גם כמה שדות אופייניים במוח: השדה החשמלי לרוחב ממברנה של תא הוא מסדר גודל של 10^7V/m ואילו השדה הישיר הנמדד באלקטרו-אנצפלו-גרמה (EEG) הוא מסדר גודל של 10V/m !

מחקרים נוספים

משרד ההגנה של ארה"ב בוחן את השפעות השדה האלקטרומגנטי על הבריאות מזה שנים רבות למטרות ההגנה והתקפה. במסגרת ניסויים אשר בוצעו על עכברים, הללו נחשפו לפולסים של 80ns להספק של קרינת מיקרוגל בשיעור של 700MW כאשר תדר הקרינה הוא 3GHz עם הספק ממוצע נמוך (2W). בניסויים אשר יצוטטו בהמשך שיעור הבליעה היה תמיד מתחת ל 0.072W/kg - לשם השוואה, זהו שיעור אשר הינו נמוך יותר מהערך הממולץ על ידי הוועדה בינלאומית להגנה מפני קרינה לא מיננת (0.08W/kg) וכאמור טלפון סלולרי משדר הספק מקסימלי של 0.6W . אין זה מפתיע שכאשר חושפים עכבר לקרינה, שהיא שוות ערך למיליון תנורי מיקרוגל למשך 0.1 של מיליונית של שניה וחוזרים על התהליך 200 פעמים בשניה למשך 17 דקות, מוצאים שינויים בהתנהגות העכברים - על אף שלכאורה תנאי הניסוי היו הרבה מתחת ל"תקן". הדוגמא הזו מחדדת היבט אחר של חקירת התופעות הקשורות בשדות אלקטרומגנטיים וגוף האדם וזהו זמן החשיפה ומשך הזמן שהבדיקה נערכה. גם אם בסקלת זמן של מספר חודשים או מספר שנים המסקנה היא שאין השפעה לקרינה בעלת איפיונים מסוימים על גוף האדם, אין הדבר מבטיח שבסקלה של עשר או עשרים שנה המסקנה תהיה דומה. בדיקה מהימנה, מחייבת שיתוף פעולה מצד כל הגורמים הנוגעים בדבר, כאשר השיקול המנחה הוא התועלת ארוכת הטווח של הציבור, בריאותית וכלכלית כאחד.

במסגרת המגבלות אשר תוארו לעיל, אם בוחנים את ההשפעה של קרינת מיקרוגל התוצאות הן לא תמיד מעודדות. מחקר אשר בוצע באוסטרליה על עכברים לפני מספר שנים, עורר הדים רבים. תוצאותיו הראו גידול מובהק בהסתברות להתפתחות של לימפומה בעת חשיפת ארוכת טווח (יחסית) לקרינת מיקרוגל בתדר של 900MHz . החשיפה נערכה בשתי מנות יומיות של 30 דקות כאשר רוחבו של כל פולס הוא 0.6ms והקצב של הפולסים האלה הופעלו היה 217Hz ; החשיפות נערכו במשך 18 חודשים עם שטף אנרגיה שבין $2.6-13\text{W/cm}^2$ ושיעור הבליעה (SAR)

השתנה בין $0.08-4.2 \text{ W/kg}$. המחקר מצביע על קורלציה ברורה בין החשיפה לקרינה לבין ההסתברות להתפתחות לימפומה, אך הוא אינו דן במנגנון הפיזיקלי-כימי-ביולוגי אשר מוביל לכך.

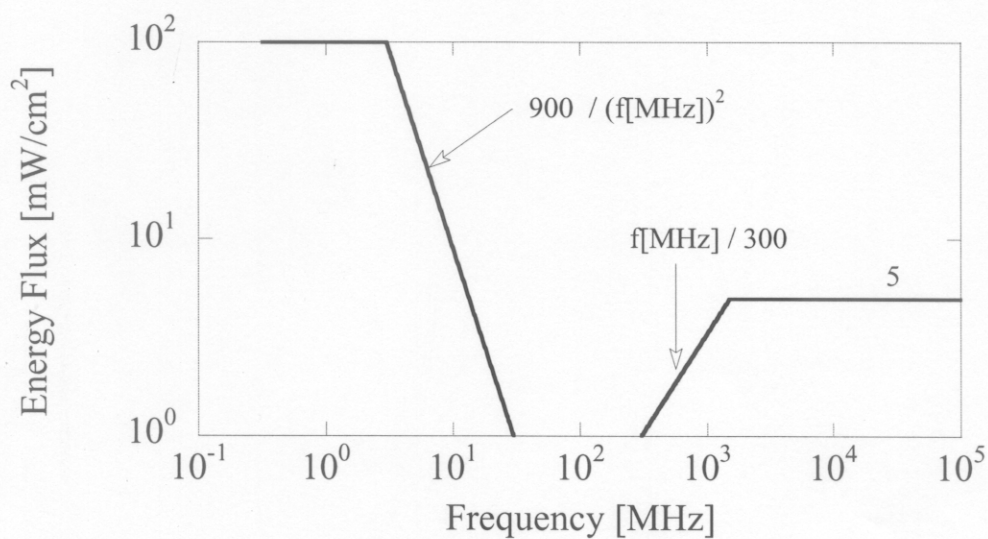
אי הבהירות בנושא של השפעת השדה האלקטרומגנטי על הבריאות, נובעת בחלקה מהעובדה שלא אחת, נתן להראות שקיימת השפעה כזו על מרכיבים כאלה או אחרים של מערכת ביו-מולקולריות אחת והעדר השפעה כלשהי על מערכת אחרת. כך למשל קרינת מיקרוגל בתדר של 2.45 GHz בשטף של עד 85 mW/cm^2 המופעלת למשך של פחות מ 10 דקות משפיעה על כרומוזומים של תאים חיים. לעומת זאת, במחקר אחר לא נמצאה השפעה כלשהי על נוירונים למרות שהחשיפה הייתה פי 100 מהתקן ($\text{SAR} < 174 \text{ W/kg}$). מחקרים אפידמיולוגיים בנושא, מצביעים על קורלציה בין החשיפה לקרינת מיקרוגל לבין מחלות שונות יחד עם זאת יש להיזהר ממסקנות חד משמעיות כל עוד לא מוכח באופן ברור מהו המנגנון אשר אחראי לכך. דוגמא לכך הייתה בארה"ב לפני מספר שנים כאשר פורסם שלילדים, אשר חיים בקרבת קווי מתח גבוה, סיכוי גבוה יותר ללקות בלאוקמיה ביחס לשאר האוכלוסיה. חוקרים אחרים בחנו את הקורלציה בין ההסתברות ללקות בלאוקמיה אצל ילדים דומים והקרה לכבישים מהירים - כי בהרבה מקרים קווי מתח נמצאים בקרבת כבישים מהירים. למרבה "הפלא" הקורלציה הייתה קרובה מאוד לקורלציה עם הקרה לקווי מתח גבוה. בהמשך נבדקה גם הקורלציה עם המצב החברתי-כלכלי של המשפחה וגם במקרה זה נמצאה קורלציה טובה. כמובן שהשאלה שנשאלת היא איזה מבין הגורמים הוא המשפיע ביותר: השדה האלקטרומגנטי, הגזים ממנועי המכוניות או גורמים הקשורים במצב החברתי-כלכלי של הילדים? כל עוד המדע לא יוכל להצביע באופן חד משמעי על המנגנון המקשר בין לאוקמיה אצל ילדים והשדה האלקטרומגנטי מקווי מתח, לא נוכל לדעת את התשובה באופן חד משמעי.

קוים מנחים להגנה בפני קרינה

אחת למספר חודשים, מתפרסמת סטטיסטיקה אשר מצביעה על השפעה גדולה של השדה האלקטרומגנטי על הבריאות או מחקר אשר קובע את ההיפך הגמור. מה שלא מתפרסם, זה שקיימים גם מחקרים מטה-סטטיסטיים אשר בוחנים את הסטטיסטיקה של המסקנות מן המחקרים הללו ובאופן לא מפתיע התוצאה שלהם היא שאין מסקנה חד משמעית!! פרסומים המצביעים על השפעה שלילית של שדה אלקטרומגנטי על הבריאות מלווים בדרך כלל בהודעה מטעם המשרד לאיכות הסביבה שכל האנטנות עומדות בתקן המשרד ואילו האחרון הוא מן "המחמירים בעולם". דבר שבדרך כלל רק מגביר את האי הבהירות כי אם התקן הוא מן המחמירים, סימן שיש כמה תקנים ואז למה להאמין לאחד ולאחר לא? יותר מכך, עובדת קיומם של מספר תקנים מצביעה על העדר דעה אחידה וזו תוצאה ישירה של אי הוכחת קיומו של מנגנון (או מנגנונים) ביו-רפואי אשר מצביע על השפעה ישירה של שדה לא מינן על בריאותנו. אז מהו התקן? התשובה היא שבמצב של העדר מסקנה חד משמעית על מידת ההשפעה של שדה אלקטרומגנטי על בריאות האדם, לא יכול להיות תקן במובן המדעי של המילה אלא ישנם קוים מנחים אשר גוף עסקי או ממשלה יכולים לאמץ לשם הגנת עובדיהם או אזרחיהם. כדי לתת תחושה של אמינות מכנים את הקוים המנחים האלה בשם תקן.

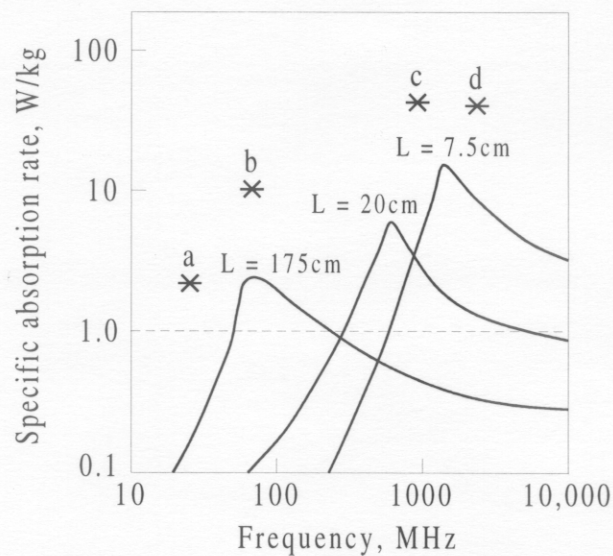
כדי שנקבל גם תמונה היסטורית של הקוים המנחים הקיימים נציין כמה אבני דרך בהיסטוריה של "התקן" האמריקאי. בשנת 1957 וועדה של שלושת הזרועות בצבא ארה"ב קבעה שיעור גג לחשיפת חיילים לקרינה - שיעור זה היה 10 mW/cm^2 והחלק נכבד במוטיבציה לקביעתו הייתה העובדה שאחרי מלחמת העולם השנייה מצאו שחיילים ביחידות מכ"מ, פיתחו קטרקט. כפי שכבר ציינו כאשר הדבר נחקר מצאו שבשטף אנרגיה העולה על 100 mW/cm^2 אכן מתפתח קטרקט בעיניים לכן קבעו את התקן כעשירית מהערך הזה. בזמנו החסם הזה היה נכון כמעט לכל הספקטרום ($10 \text{ MHz} - 100 \text{ GHz}$); כדאי להעיר כאן שבאותה תקופה ושנים לאחר מכן בבריה"מ

התקן לחשיפה בעבודה של לא יותר מ $10\mu\text{W}/\text{cm}^2$. כמעט שלושה סדרי גודל יותר קטן !! . בשנת 1966 מכון התקנים האמריקאי (ANSI) אימץ את המלצות הוועדה הצבאית והמליץ על אמוצו על ידי הגופים האזרחיים הרלוונטיים. בשנת 1975 חיל האויר האמריקאי פיצל את הספקטרום לשניים: לקרינה בתחום 10kHz - 10MHz הותרה חשיפה לשטף אנרגיה של עד $50\text{mW}/\text{cm}^2$ ואילו בתחומי תדר גבוהים יותר הושאר התקן הקודם. בשנת 1982 מכון התקנים האמריקאי עדכן את המלצותיו (ANSI C95.1-1982) לנתונים המופיעים בתמונה 2. כך למשל בכל הספקטרום בין 0.3-3MHz מותרת חשיפה של עד $100\text{mW}/\text{cm}^2$ לעומת זאת בתחום בין 3-30MHz שטף האנרגיה המותר הוא $900/f^2$ - בפרט עבור 10MHz החשיפה המותרת היא בשעור של $9\text{mW}/\text{cm}^2$.



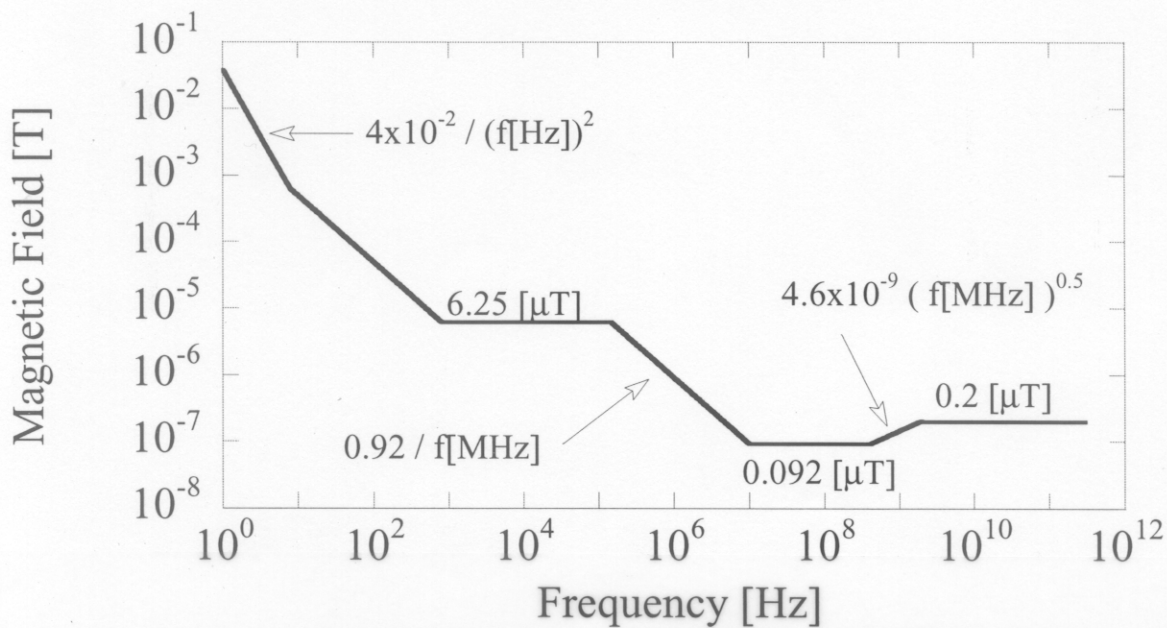
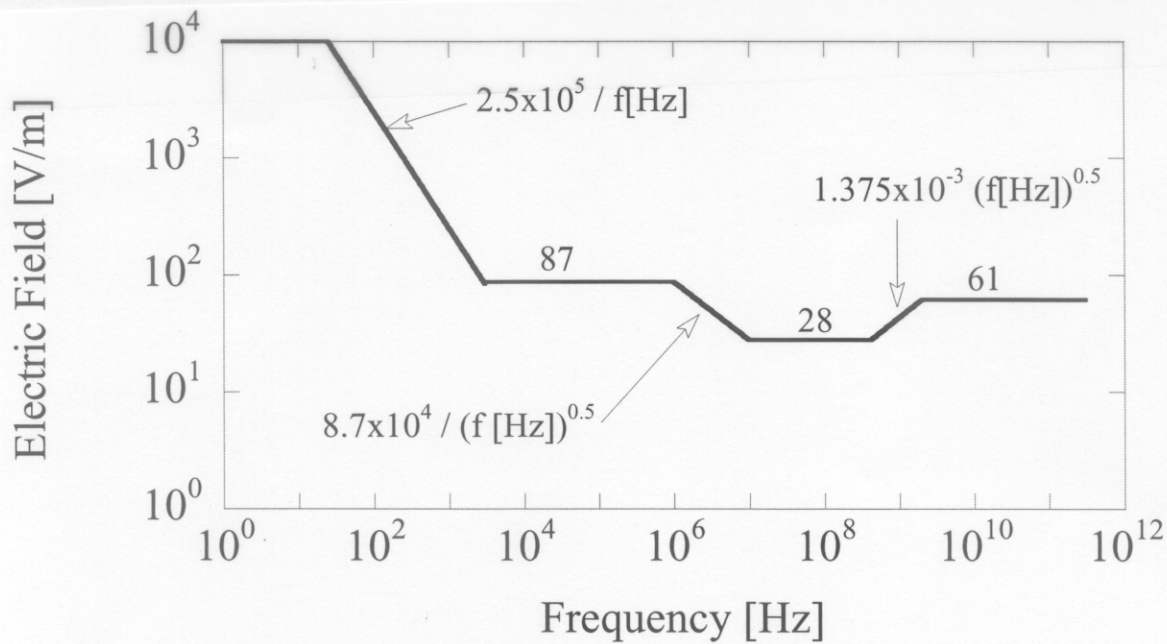
תמונה 2: שטף האנרגיה המותר בתדרים השונים

הנתונים הללו הם ההיפוך של תוצאות של חישוב שיעור הבליעה הממוצע (SAR) של ספריד באורכים שונים אשר נחשף ל 10mW/cm^2 בתדרים שונים ואשר את תוצאותיו מתוארות גרפית בתמונה 3. הנקודות מסמנות את מקסימום ה SAR המקומי אשר נמדד באדם (a, b), בחולדות (c) ובעכברים (d); האורכים מתאימים לאדם (175 ס"מ), לחולדה (20 ס"מ) ולעכבר (7.5 ס"מ). נקודת השיא בערך הבליעה מצביעה על תהודה מרחבית אשר הוזכרה לעיל. כדאי להדגיש שזו אינה תוצאה אוניברסלית ונקודה זו תלויה בגוף הנחשף ובצורת הערור של השדה. גל אשר מגיע ממרחק גדול ביחס לאורך הגל בריק (גל מישורי) יעורר תדרים מרחביים מסוימים ואילו אנטנה הממוקמת קרוב מאוד לגוף תעורר תדרים מרחביים אחרים.



תמונה 3: שיעור הבליעה (SAR) כפי שחושב בספרואיד באורכים שונים. הנקודות מתאימות למדידות אשר בוצעו בבני אדם (a,b), בחולדות (c) ובעכברים (d). בכל המקרים שטף האנרגיה הפוגעת הוא 10mW/cm^2 .

לשם השוואה בשנת 1998 פורסמו קווים מנחים להגבלות לחשיפה לשדה אלקטרומגנטי על ידי הוועדה הבינלאומית להגנה בפני קרינה לא מייננת. לציבור הרחב שיעור הבליעה ליחידת משקל (SAR) המומלץ עומד על 0.08 W/kg ממוצע על כל הגוף כאשר ההספק הוא הממוצע למשך 6 דקות והדבר מתייחס לתדרים בין 10 kHz - 10 GHz . באופן נקודתי, נאמר ליד הראש, הערך הזה יכול להיות גבוה בהרבה והשיעור המומלץ כאן הוא 2 W/kg ; על הגפיים שיעור זה יכול להגיע ל 4 W/kg . עבור תדרים העולים על 10 GHz ועד ל 300 GHz שיעור הבליעה אינו הקריטריון המתאים מאחר ורוב הקרינה נבלעת על פני השטח לכן הקריטריון הקובע הוא של שטף האנרגיה וזה עומד על 1 mW/cm^2 . כדי להשלים את התמונה הכללית, מוצגים למטה שני גרפים אשר מתמצתים את שיעור החשיפה המותר לשדה אלקטרומגנטי בתדרים שונים.



תמונה 4: השדה החשמלי והמגנטי המקסימליים כפונקציה של התדר; בתחום בין 10 kHz - 10 GHz צריך לעשות מצוץ על רבע השדות למשך 6 דקות.

ערכי מקסימום אלה נקבעו על ידי הוועדה אחרי שרכזה מספר גדול של מחקרים אשר נערכו בעולם ועל סמך התוצאות וההמלצות של המחקרים השונים קבעה ערכי מקסימום המותרים בחשיפת הציבור הרחב. קיימות כמובן המלצות עבור קבוצות יעודיות באוכלוסיה. המספרים המוצגים הם ערכי הממוצע (rms) למשך לפחות 6 דקות. כל תחום של הספקטרום נבחן בנפרד ונבדקו ההשפעות על חלקים שונים בגוף האדם כפי שבאים לידי ביטוי בפרסומים שונים. ערך הסף נקבע על ידי כך שערך ההספק שבו הובחנה השפעה כלשהי מחולק 10 ואז השיעור שמתקבל קובע את הערך המומלץ לאנשים העובדים בתחום (למשל עובדי חברת חשמל) ומחולק שוב ב 5 וכך נקבע שיעור החשיפה לציבור הרחב.

נקודה נוספת אשר אינה באה לידי ביטוי בצורה ישירה בערכים אשר פורטו בתמונה 4 היא משך זמן החשיפה או ההספק הרגעי של הפולס. כדוגמת המחקר של משרד ההגנה של ארה"ב, פולסי רגעי יכול להיות בעל הספק שהוא בהרבה סדרי גודל גבוה מההספק הממוצע. מעט מאוד ידוע על ההשפעה הביולוגית של פולסים אלה על הגוף. מתוך המעט שידוע, הוועדה ממליצה שהפולסים הבודדים לא יעלו בעצמתם על פי 1000 מן ההספק הממוצע - זאת אמרת השדות הרגעיים לא יעלו על פי 33 מהערך המומלץ לעיל. צד אחר של אותו מטבע הוא זמן החשיפה. כדי להמחיש את הבעיה והפתרון המומלץ נבחנה קרינה בתדרים בין 0.3GHz עד למספר GHz-ים בודדים - נניח שקרינה זו פוגעת וחודרת לראש. אם ההספק גבוה, קרינה זו עלולה לגרום לאפקטים טרמו-אלסטיים אשר מתבטאים השפעה על חוש השמיעה. הסף במקרה זה הוא לא רק שטף האנרגיה (הספק ליחידת שטח) אלא גם האנרגיה הכוללת - או במילים אחרות שטף האנרגיה מוכפל במשך זמן החשיפה. הדבר מגדיר קריטריון פחות נפוץ אשר לא דובר בו עד כה והוא בליעת האנרגיה (SA - Specific Energy Absorption). במקרה של אפקט על השמיעה הסף הזה הינו 4-16mJ/kg אשר אם מניחים פולסים של 0.03msec הדבר מתאים לשיעור בליעה (SAR) מקסימלי של 130-520W/kg. נכון להיום אין התייחסות מעמיקה למשך זמן החשיפה כך למשל, למרות האמור לעיל, שיעור הבליעה הממוצע הוא 0.08W/kg ואם מישור מדבר בטלפון סלולרי אשר פועל ליד הסף הזה במשך שעה אחת, אז בליעת האנרגיה היא קרוב ל 300J/kg יותר מפי עשרים הערך שהוזכר לעיל !!

סכום

אחת הסטטיסטיקות האחרונות מיקמה את ישראל באחד המקומות הראשוניים בכל הקשור במספר הטלפונים סלולריים ל 1000 תושבים בוגרים. למען האמת, אין אנו זקוקים לסטטיסטיקה לשם כך, מי שביקר לאחרונה באירופה או בארה"ב יבחין מיד כי מספר האנשים שברשותם טלפון סלולרי הוא קטן בהרבה מאשר בישראל. למרות השמוש הרחב, מעשית, שום משרד ממשלתי לא נרתם לקידום המחקר בנושא השפעת הקרינה של טלפונים או אנטנות מרכזיות על הבריאות. אפילו במישור העקרוני ההענות הייתה לא נלהבת במיוחד כאשר הנימוק הוא ש"השקעה בישראל היא טיפה בים לעומת מה שאירופה, יפן או ארה"ב משקיעות לכן מדינת ישראל מאמצת את התקן האמריקאי". מיותר לציין שהשפעות יחודיות לאזורנו כמו אקלים או "תוספת" של חשיפה לתקשורת צבאית לא נבחנו.

המבט הנוכחי על נושא השפעת השדה האלקטרומגנטי על גוף האדם, בא מכיוון מחקר הממוקד באינטראקציה של קרינה וחומר (אלקטרונים) ותוך כדי עניין אישי בהשפעת השדה האלקטרומגנטי על המוח. כדאי לזכור שברמה הבסיסית, כמעט כל התהליכים אשר מתרחשים בגופינו, מורכבים בסופו של דבר מאינטראקציה של מטענים חשמליים ושדות אלקטרומגנטיים לכן עקרונית, התשובה לשאלה האם יש אינטראקציה, היא טריוויאלית. והתשובה היא, כן! מהו המנגנון ומהו שיעור ההשפעה בכל תחום תדרים או הספקים, על כך אין התשובה, אם כי קיימים

כמה כיווני מחקר מעניינים. הידע העצום שנצבר באינטראקציה של שדות וחומר בשטחים פיסיקליים שונים, נתן לניצול בשימושים רפואיים ולא רק כדי להראות שלשדה כזה יש השפעה מוזיקה אלא ישנם הרבה מאוד היבטים אשר שדות אלה עשויים לתרום לבריאות ודוגמאות לא חסרות גם היום: MRI, איחוי עצמות באמצעות פולסים מגנטיים, חימום סלקטיבי של גידולים בלי צורך בניתוח ועוד....

בחינה אמינה של השפעת הקרינה על גוף האדם, רק תסייע להמשך התפתחותה המואצת של התקשורת הסלולרית. חוסר מידע אמין כיום, יוצר אי וודאות אשר בעקבותיה ישנה התנגדות לא רציונלית להתקנת אנטנות. גם אם יוכל להיות שלטון קצר הסוואת האנטנות מעיני התושבים הוא פתרון שעשוי לעבוד, זו בוודאי לא דרך להתמודד עם הבעיה. הפרספקטיבה ההיסטורית הקצרה יחסית של הטלפונים הסלולריים, מגבילה את יכולתם של מחקרים אפידמיולוגיים לקבוע בצורה נחרצת את מידת הסיכון. יש להתחיל מחקרים אלה היום כדי שבעוד עשר או אולי עשרים שנה תהינה תוצאות כלשהן. הדבר חיוני כיוון שלהבדיל מחשיפות אחרות, כמו עובדי הרשת של חברות חשמל, כאן רוב האוכלוסיה נמצאת ברמת חשיפה גבוהה.

בכל הקשור במחקר, מנקודת המבט של האינטראקציה של השדה האלקטרומגנטי עם חומר, ההשפעה המשמעותית ביותר עשויה לבוא לידי ביטוי במצבי תהודה משולבים עם תופעות קבוצתיות ואילו האפקטים התרמיים להם מוקדש חלק נכבד מן המחקר היום, הם בעלי חשיבות משנית. לבסוף, המסקנה ודרכי פעולה עבור המשתמש הבודד צריכים להיות שמוש פונקציונלי תוך כדי "המנעות זהירה" (prudent avoidance) אשר משמעותה היא שאין סיבה להימנע משיחה בטלפון סלולרי כאשר הנסיבות מחייבות אך באותה מידה, אין סיבה להתעקש ולהשתמש בטלפון סלולרי למשך דקות ארוכות כאשר האופציה של הטלפון הרגיל נמצאת בהישג יד.