

بررسی اثرات میدانهای الکترومغناطیسی بر روی بدن انسان

محمد حسین رهنورد

دانشگاه شیراز

چکیده :

در این مقاله رفتار ماده در میدان الکتریکی و مغناطیسی ساکن و با تغییرات زمانی مدل میشود. اثر این میدانها روی انسان مورد بررسی قرار میگیرد و مدل‌های مختلف برای آنالیز تشعشع روی انسان مطالعه میشود. ماکزیمم جذب ویژه الکترومغناطیسی قسمت‌های مختلف بدن در حالت ایستاده و دست‌های افتاده برای فرکانس خاص و پلاریزاسیونهای متفاوت داده خواهد شد. اثر فرکانس روی بدن انسان نیز مطالعه میشود. حد حفاظت بدن انسان به تشعشع موج الکترومغناطیسی و ضریب اطمینان در بهترین شرایط در نظر گرفته میشود. مقادیر استاندارد و حد حفاظت تشعشع در آمریکا و شوروی معرفی میشود. نکات الزامی نیز تذکر داده خواهد شد.

شرح مقاله :

بطور کلی ، امواج از نظر ماهیت به سه دسته تقسیم میشوند :

۱- امواج مکانیکی که ماهیت آنها تغییر فشار محیط است. مانند مداء، که تغییر فشار جو است ، یا امواج دریا ، که جابجائی تغییر فشار آب (ارتقاع آب) است .

۲- امواج یونیزه یا امواج سنگین که همچنانکه از نامشان پیداست ماهیت آنها

جابجایی ذرات باردار است . مانند اشعه (X) ایکس ، که جابجایی الکترون است یا امواج آلفای رادیو اکتیو (α) که جابجایی جرم و یون مثبت است .
 ۳- امواج الکترومغناطیسی ، ماهیت این امواج وجود میدان الکتریکی همراه با میدان مغناطیسی است .

گفتار ما در اینجا محدود به نکات ایمنی در مقابل امواج الکترومغناطیسی تا فرکانس 100 GHz است .

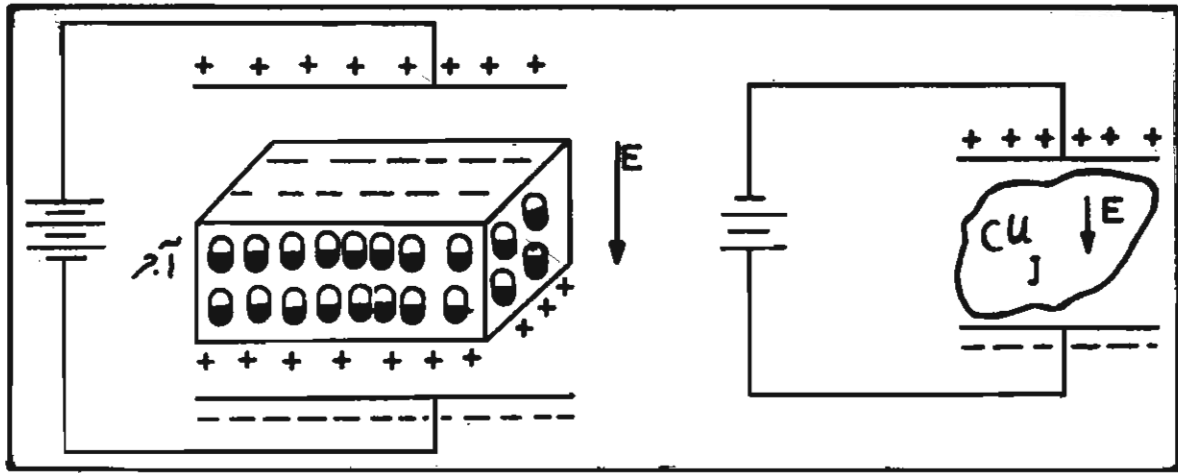
۱- خلاصه رفتار ماده در میدان الکتریکی :

شاخص رفتار هر ماده در میدان الکتریکی ، دو پارامتر هدایت ویژه الکتریکی (σ) و میزان پلاریزاسیون الکتریکی (ϵ) است . هدایت ویژه (σ) تعیین کننده میزان جریان الکتریکی است که به علت وجود میدان الکتریکی در ماده ایجاد میشود و در نتیجه انرژی الکتریکی به انرژی گرمایی در ماده تبدیل و تلف میگردد .

میزان پلاریزاسیون الکتریکی یا نفوذپذیری الکتریکی (ϵ) ، تعیین کننده میزان پلاریزاسیون الکتریکی یا دیپلهای الکتریکی است که به علت وجود میدان الکتریکی در جهت خلاف میدان اعمال شده ، در ماده پدید می آید . بدین ترتیب انرژی میدان الکتریکی به صورت دو قطبیهای الکتریکی در ماده ذخیره میشود . غیر فلزات و همه مواد ترکیبی حتماً این خاصیت را دارند.

پلاریزاسیون الکتریکی هر ماده کمیتی برداری است و در مواد غیر همگن در جهتهای متفاوت شبکه ساختمانی ماده ، متفاوت و مقداری مختلط است .
 ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ و $\epsilon = [\epsilon]$) . همچنین میدان الکتریکی شکست ، یعنی حدی که محیط ماده یونیزه میشود ، نیز مطرح است .

هنگامی که ضریب دیالکتریک ماده مختلط باشد ، جزء حقیقی (ϵ') نشان دهنده میزان پلاریزاسیون الکتریکی و جزء موهومی (ϵ'') نشان دهنده میزان تبدیل انرژی الکتریکی به جریان الکتریکی است . یعنی در واقع ϵ'' بیان دیگری از میزان هدایت σ میباشد به همین دلیل آن را (ϵ'') ضریب افت مینامند. در موارد بسیاری با رابطه خطی $\sigma = \epsilon'' / \lambda$ مشخص میشود که در آن ، σ ضریب هدایت و λ طول موج فرکانس میدان است .



$\pm \theta$: دیپل‌های الکتریکی آجر در میدان الکتریکی E قرار گرفته است و به علت فریب پلاریزاسیون الکتریکی آن (ε) انرژی را به صورت دو قطب‌های الکتریکی منظمی در خود ذخیره میکند .
 (ب) اثر میدان الکتریکی روی ماده‌ای که دارای خاصیت پلاریزاسیون الکتریکی است (ε).

مس (cu) در میدان الکتریکی (E) به علت خاصیت هدایت ویژه الکتریکی (σ = 5/8 × 10⁸ Ω/م) میدان الکتریکی تبدیل به جریان الکتریکی J = σE و تلف می‌گردد .
 (الف) اثر میدان الکتریکی روی ماده‌ای که دارای خاصیت هدایت الکتریکی است.

شکل ۱ - اثر میدان الکتریکی بر ماده

در صنعت نسبت ϵ''/ϵ' را فریب تلفات یا تانژانت افت می‌نامند :

$$D = \text{tg } \delta = \epsilon''/\epsilon'$$

فریب دی‌الکتریک ماده ($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$) تابعی از جنس ماده ، دما و فرکانس میدان الکتریکی اعمال شده است .

۲- خلاصه رفتار ماده در میدان مغناطیسی :

شاخص رفتار هر ماده در برابر میدان مغناطیسی ، نفوذپذیری مغناطیسی (μ) است . چنانچه جسمی در میدان مغناطیسی قرار گیرد ، پساامتر μ نشان میدهد که چگونه در آن دیپل‌های مغناطیسی ایجاد میشود و انرژی میدان مغناطیسی را در خود ذخیره یا تلف میکند . μ، چگونگی پلاریزاسیون مغناطیسی را نشان میدهد. μ ،

کمیتی بردار نیست و در مواردی ، در جهات مختلف ، شبکه ساختمانی ماده مقداری متفاوت است یعنی $[\mu] = \mu$ و همیشه در هر جهت مقداری مختلط است .
 $\mu' - \mu'' = \mu$ جزء حقیقی μ' ، عامل ذخیره انرژی یا تعیین کننده تعداد پلاریزاسیون مغناطیسی و جزء موهومی μ'' ، عامل تلفات انرژی مغناطیسی در ماده است .

معمولاً μ ، نفوذپذیری مغناطیسی ماده نسبت به پلاریزاسیون اتر (محیط فرضی خالی از ماده (Free Space) با $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m) سنجیده میشود .

$$\mu_r = \mu / \mu_0 = \mu_r' - j\mu_r''$$

\downarrow
 شاخص مغناطیسی ماده

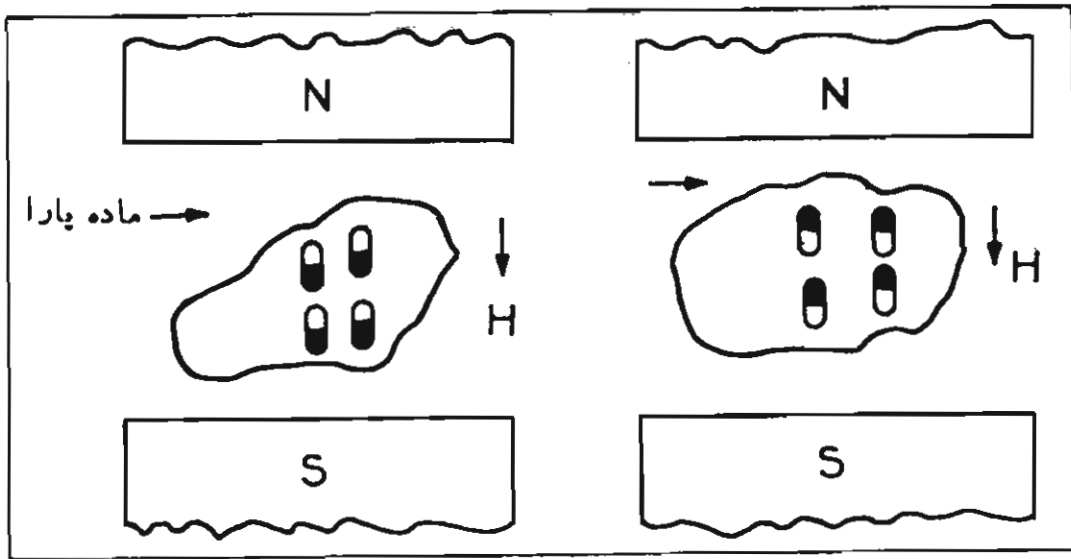
\downarrow
 عامل ذخیره میدان مغناطیسی

\downarrow
 عامل تلفات میدان مغناطیسی

جزء حقیقی μ_r' یعنی عامل ذخیره انرژی ، برحسب نوع ماده متفاوت است . دسته‌ای از مواد در مقابل میدان مغناطیسی به میزان خیلی کم در جهت میدان مغناطیسی اعمال شده ، پلاریزه مغناطیسی میشود . بدین ترتیب کمی در میدان تحت تاثیر نیروی دافعه است (مانند بلور نمک طعام) . در این گونه مواد μ_r' کمی کوچکتر از یک است $1 \rightarrow \mu_r' = 0.9998$. این گونه مواد را دیامغناطیس مینامند . آب مقطر ، مس ، نقره و قلع از این گونه‌اند .

مواد دیگری در مقابل میدان مغناطیسی به میزان خیلی کم در جهت خلاف میدان مغناطیسی اعمال شده به دیپلهای مغناطیسی تبدیل میشود . به این مواد در میدان مغناطیسی ثابت نیروی جاذبه بسیار جزئی وارد میشود . در این گونه مواد μ_r' کمی بیشتر از یک است $1 \rightarrow \mu_r' = 100$. این مواد پارامغناطیس نامیده میشوند . هوا آلومینیوم و پتاسیم از نمونه‌های این نوع است . [۱] و [۲]

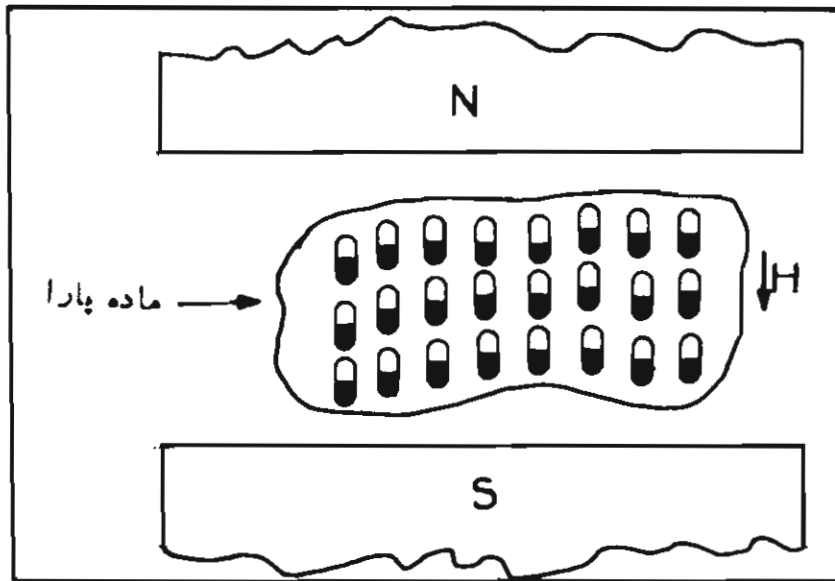
دسته دیگر تحت تاثیر میدان مغناطیسی ، در جهت خلاف میدان اعمال شده شدیداً به دیپلهای مغناطیسی پلاریزه میشوند . نفوذپذیری مغناطیسی این نوع خیلی زیاد است ($1000000 \rightarrow \mu_r' = 100$) . این مواد بطور کلی مواد مغناطیسی نامیده میشوند و برحسب خاصیت‌های متفاوتشان به فرومغناطیس ، فریت ، آنتی فرومغناطیس و سوپر پارامغناطیس تقسیم میشوند . [۱] و [۲]



(ب) چگونگی دیپل‌های مغناطیسی
ایجاد شده در ماده پارامغناطیس
(مانند هوا، پتاسیم و آلومینیوم)

$$\mu_r \approx 1 + \Delta \quad \text{با} \quad \mu_r = 1 + \Delta$$

(الف) چگونگی دیپل‌های مغناطیسی ایجاد
شده در ماده دیامغناطیس (مانند آب،
نمک، قلع، مس) با $\mu_r \approx 1 - \Delta$



(پ) چگونگی دیپل‌های مغناطیسی ایجاد شده در مواد مغناطیسی

(مانند کوبالت، نیکل، آهن و مشتقات آن) با $\mu_r = 100 \rightarrow 1000000$

شکل ۲ - اثر میدان مغناطیسی بر ماده

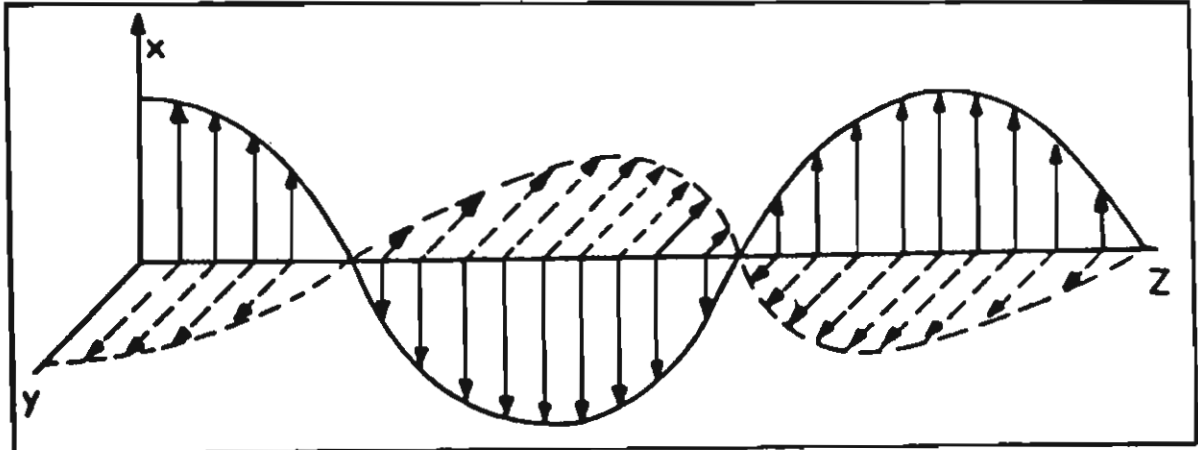
۳- ماده در میدان الکترومغناطیسی :

امواج الکترومغناطیسی از نظر ماهیت دارای دو مؤلفه میدان الکتریکی و

میدان مغناطیسی است (شکل ۳). علاوه بر دو میدان مزبور، تغییرات آنها با فرکانس

نیز پارامتر دیگری از موج است. قدرت موج نیز در میدان آنها مستتر است.

در نتیجه : $E(t) = E_x \cos [\omega(t - z\sqrt{\mu\epsilon})] \hat{a}_x = E_x \cos (\omega t - \beta z) \hat{a}_x$



$H(t, z) = H_y \cos (\omega t - \beta z) \hat{a}_y = [|E(t, z)| / \eta] \hat{a}_y$

$E(t, z)$: با خط پیوسته ، مؤلفه‌های میدان الکتریکی که در جهت \hat{a}_x است .

$H(t, z)$: با خط بریده ، مؤلفه‌های میدان مغناطیسی که در جهت \hat{a}_y است .

$\omega = 2\pi f$: فرکانس موج

میدان الکتریکی E ، میدان مغناطیسی H و فرکانس f سه پارامتر موج .
 β و η (به ترتیب امپدانس و ثابت فاز) پارامترهای ماده است که بیانی
 دیگر از سه پارامتر الکترومغناطیسی ماده (σ و ϵ و μ) است .

شکل ۳- موج الکترومغناطیسی در فضای بدون افت

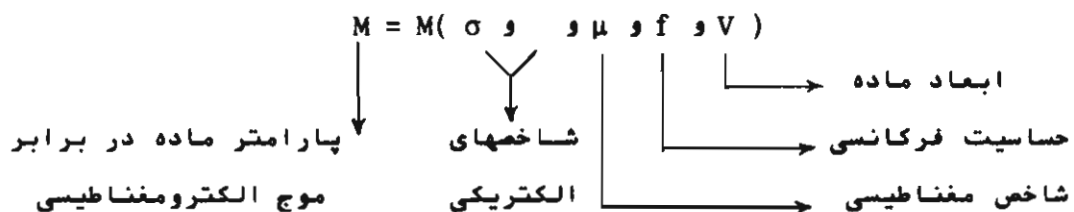
چنانچه جسمی در میدان الکترومغناطیسی قرار گیرد ، متناسب با سه پارامتر موج (میدان الکتریکی ، میدان مغناطیسی و فرکانس موج) باید چگونگی اثر روی جسم را بررسی کرد . متناسب با میدان الکتریکی موج ، پارامترهای الکتریکی ماده یعنی ضریب هدایت σ و ضریب پلاریزاسیون الکتریکی ϵ مطرح و رفتاری که شرح دادیم در جسم ایجاد میشود . علاوه بر این چنانچه ϵ ماده نسبت به محیط مجاور بالا باشد ، عمده انرژی در ماده ذخیره میشود و ماده متناسب با شکل خود دارای فرکانس تشدید شده و مانند تشدید کننده‌های دی‌الکتریک عمل میکند .

متناسب با مؤلفه مغناطیسی موج ، پارامتر مغناطیسی ماده یعنی تلفات μ و میزان پلاریزاسیون مغناطیسی μ مطرح است و عکس‌العملی که شرح دادیم در جسم ایجاد میشود .

فرکانس تغییرات میدان پارامتر مهم دیگری است که به نحوی هر ماده‌ای به آن حساسیت دارد. ملکولها یا شبکه‌کریستالی ماده با فواصل منظمی از اتمهای تشکیل دهنده نسبت به یکدیگر، شکل گرفته‌اند. وجود ماده هم به علت حفظ تعادل الکتریکی و مغناطیسی درون ماده است. فواصل مشخص و تعادلهای الکتریکی و مغناطیسی، حساسیت جدیدی در ماده نسبت به فرکانس امواج الکترومغناطیسی ایجاد میکند. بنابراین، علاوه بر پارامترهای تعریف شده (σ و ϵ و μ)، فرکانس جذب ماده یا فرکانس تشدید، شاخص رفتار دیگری از ماده در مقابل امواج الکترومغناطیسی است. به عنوان نمونه در دو فرکانس ۲۲/۲۴ GHz و ۱۸۴ GHz، انرژی الکترومغناطیسی را جذب و سپس به صورت گرما در خود تلف می‌کنند.

همچنین در طبیعت، موادی وجود دارد که فرکانس تشدید آنها تابع شرایط دیگری است و بر خلاف آب و اکسیژن، فرکانس تشدید مشخصی ندارند. به عنوان نمونه فریتها، فرکانس تشدید دارند و مقدار آن تابعی خطی از میدان مغناطیسی اعمال شده است. (اغلب $f_r = 2/8 H$ ، فرکانس برحسب MHz و H میدان مغناطیسی اعمال شده برحسب اورستد). یا شبکه‌های کریستالی کوارتز که فرکانس تشدید آنها در جهت‌های مختلف شبکه کریستالی، تابع ضخامت و سطوح شبکه کریستالی است.

امواج الکترومغناطیسی با فرکانس کم در داخل فلزات هم اثر می‌گذارند. هر چه فرکانس زیادتر شود، دیگر انرژی به صورت جریانهای سطحی در می‌آید و به دنبال آن عمق نفوذ یعنی ضخامتی که عمده جریان سطحی در آن متمرکز است، تعریف میشود $[\delta = 1/(\pi f \sigma \mu)^{0.5}]$ (عمق جریان یا عمق نفوذ). μ شاخص مغناطیسی ماده، σ شاخص الکتریکی ماده، $\eta = 2/14$ و f فرکانس موج الکترومغناطیسی اعمال شده بر ماده است. ماده متناسب با شکل خود، در مقابل امواج الکترومغناطیسی حساسیت دارد و در موارد بسیاری به عنوان تشدید کننده‌های دی‌الکتریک (E بالا) و یا آنتن مطرح است. بنابراین پارامترهای هر ماده‌ای در مقابل امواج الکترومغناطیسی تابعی از شاخصهای الکتریکی (ϵ و σ)، شاخص مغناطیسی (μ)، حساسیت فرکانسی (f) و ابعاد ماده (v) است.



چنانچه جسمی از مخلوط مواد مختلف تشکیل شده باشد، پارامترهای هر یک جداگانه به علاوه ابعاد نهایی جسم مطرح است . [۱] و [۲] و [۳] و [۴]

۲- انسان در میدان الکترومغناطیسی :

تا به حال درباره اثر میدان الکترومغناطیسی روی ماده بسیار (بدون دیپل الکتریکی یا دیپل مغناطیسی اولیه) صحبت کردیم . در ضمن ماده را یکنواخت در نظر گرفتیم . یعنی یک عنصر خاص با یک ترکیب و حجم مشخص . بنابراین ، میتوانستیم پارامترهای الکتریکی (σ و ϵ) مغناطیسی (μ - μ_0) و حساسیت فرکانسی را مشخص ، و سپس رفتار ماده را در میدان بررسی کنیم .

از نظر میدان الکترومغناطیسی ، انسان از مواد گوناگونی (یعنی پارامترهای E و σ و μ و f متفاوتی) تشکیل یافته است . از طرفی همه مواد تشکیل دهنده انسان خنثی نیستند . سلولهای عصبی ، مراکز کنترل حرکت قلب و ... از جمله نقاطی است که خنثی نیستند و همیشه دارای میدان الکترومغناطیسی است . عصب در حال سکون تنها دارای دیپل الکتریکی DC است . ولی به محض تحریک پلاریته آن عوض میشود و سیگنال الکتریکی متغیری با سرعتهای متفاوتی که تا به 100 m/s میرسد ، انتقال مییابد . بنابراین طبق قانونهای ماکسول میدان الکترومغناطیسی تولید و منتشر میشود . قلب حرکت خود را با دو گره عصبی انجام میدهد . این دو گره با پخش میدان الکتریکی به ماهیچههای قلب ، حرکت پمپ گردش خون بدن را کنترل میکند . طیف فرکانس این دو گره در حالت نرمال معمولاً 30 Hz است و چگالی انرژی به ترتیب در فرکانسهای 1 ، 5 ، 6 و 18 هرتز است [۱۱] . یعنی در انسان از نظر الکترومغناطیسی به ازای مواد متفاوت خنثی ($M_i = M_i (\sigma_i , \epsilon_i , \mu_i , f_i , V_i)$) های مختلفی وجود دارد . اندیس $i \in \mathbb{N}$ شاخص مواد خنثی سازنده بدن است علاوه بر اینها تاثیر میدان روی مراکز باردار مطرح است .

شناخت پارامترهای مختلف هر جزء بدن ($M_i = M_i (\sigma_i , \epsilon_i , \mu_i , f_i , V_i)$) هنوز مراحل اول علمی را میگذرانند و به رشد خود نرسیده و از نظر حساسیت فرکانسی چندان آزمایشی نشده است . اغلب اندازه گیریها با فرکانسهای مشخص $27/13 \text{ MHz}$ ، 450 MHz ، $2/45 \text{ GHz}$ ، $9/4 \text{ GHz}$ و 64 GHz انجام شده است که آن هم نه به دلیل حساسیت خاصی در جایی از بدن نسبت به این فرکانسها است بلکه برای اینکه از قوانین FCC (Federal Communication Commission) تبعیت کنند . شناخت

پارامترهای الکترومغناطیسی اجزای مختلف بدن در تشخیص پزشکی جای بسیاری باز میکند . مثلاً در تشخیص تومورهای سرطانی ، حتی در مراحلی که عکس برداری با اشعه ایکس X جواب نمیدهد با اندازه گیری پارامترهای الکتریکی قابل تشخیص است .

دانشمندان اثر امواج الکترومغناطیسی را روی حیواناتی از قبیل موش ، خرگوش و ... انجام داده اند و نتیجه آزمایش اثر میدان روی تک تک مواد و اجزاء و شناخت M_1 نیست ، بلکه به اشکالی که زودتر به چشم خورده و یا یک اشکال خاص پیورده اند .

فعلاً ازدیاد دمای اجزای بدن ناشی از برخورد میدان الکترومغناطیسی ، شاخص رفتار میدان است . ازدیاد دمای بدن عمدتاً ناشی از گرم شدن ماهیچه ها در مقابل موج است . بدین ترتیب که "ع" یا "ع" ماهیچه ها ، انرژی الکترومغناطیسی را به صورت حرارت در خود ماهیچه تبدیل و تلف میکند . در اینجا هم ، تأکید گفتار ما روی تأثیر میدان در ماهیچه های بدن است که تعیین کننده این شرایط است .

ماهیچه های بدن خاصیت مغناطیسی چندانی ندارند ($\mu \approx \mu_0$) و بیشتر خاصیت الکتریکی آنها مطرح است . ماهیچه های بدن را میتوان به سه نوع دسته بندی کرد. در جدول (۱) خاصیت الکتریکی انواع ماهیچه در فرکانس ۴۵۰ MHz دیده میشود. ϵ' میزان پلاریزاسیون الکتریکی یا میزان ذخیره انرژی الکتریکی در عضله است. σ که بیانی دیگر از ϵ'' است ($\epsilon'' = \epsilon' \tan \delta$) عامل تلفات میدان الکتریکی است. با تلفات میدان الکتریکی، متناسب با امپدانس عضله ($Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$) میدان مغناطیسی نیز از بین میرود . در فرکانسهای دیگر (به جز ۴۵۰ MHz) ، به شرط اینکه دمای بدن ثابت باشد ، $T = 37^\circ C$ ، میزان پلاریزاسیون الکتریکی ثابت ($\epsilon' = \text{etc}$) و تنها میزان تلفات یعنی ضریب هدایت σ متناسب با فرکانس تغییر میکند .

$$\sigma_f = f \text{ (MHz)} / 450 \text{ MHz} \times 450 \text{ MHz}$$

$$SF = \text{Scale Factor} = f \text{ (MHz)} / 450 \text{ MHz}$$

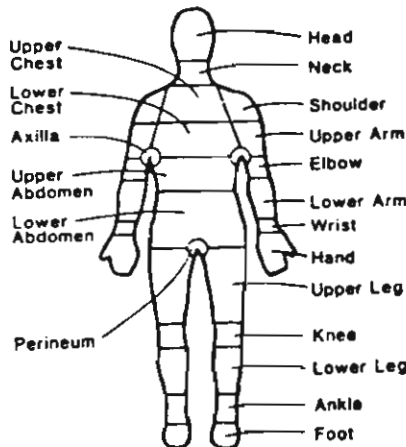
ضریب تصحیح σ در جدول

پلاریزاسیون افقی برخورد از سر نوع I پلاریزاسیون افقی برخورد از سر نوع II

$$(-KHE) \quad \begin{array}{c} H \\ \leftarrow \odot \\ E \end{array} \quad \begin{array}{c} H \\ \odot \rightarrow \\ E \end{array} \quad (-KEH)$$

$$\begin{array}{c} \dot{E} \\ \uparrow \\ H \odot \rightarrow K \\ (EKH) \end{array}$$

پلاریزاسیون عمودی
برخورد از چپ



$$\begin{array}{c} \uparrow E \\ K \leftarrow \odot \\ H \\ (-EKH) \end{array}$$

پلاریزاسیون عمودی
برخورد از راست

$$\begin{array}{c} \uparrow E \\ K \leftarrow \odot \\ H \\ (-HKE) \end{array}$$

$$\begin{array}{c} H \uparrow \\ E \odot \rightarrow K \\ (EKH) \end{array}$$

پلاریزاسیون افقی
برخورد از چپ

$$\begin{array}{c} \uparrow K \\ E \leftarrow \odot \\ H \\ (EKH) \end{array} \quad \begin{array}{c} \uparrow K \\ H \leftarrow \odot \\ E \\ (KHE) \end{array}$$

پلاریزاسیون افقی برخورد از پا نوع II پلاریزاسیون افقی برخورد از پا نوع I

چگونگی محور مختصات: محور X در جهت بدن و عمود بر زمین

$$\begin{array}{c} \uparrow E \\ H \odot \rightarrow K \\ (-EHK) \end{array}$$

پلاریزاسیون عمودی
برخورد از پشت

$$\begin{array}{c} \uparrow E \\ K \leftarrow \odot \\ H \\ (EHK) \end{array}$$

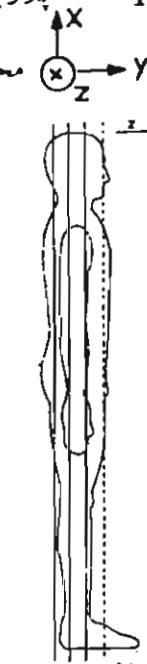
پلاریزاسیون عمودی
برخورد از روبرو

$$\begin{array}{c} \uparrow E \\ H \odot \rightarrow K \\ (-HEK) \end{array}$$

پلاریزاسیون افقی
برخورد از پشت

$$\begin{array}{c} \uparrow E \\ K \leftarrow \odot \\ H \\ (HEK) \end{array}$$

پلاریزاسیون افقی
برخورد از روبرو



چگونگی محور مختصات:

شکل ۴ قسمتهای مختلف بدن در معرض امواج الکترومغناطیس با پلاریزاسیون و جهت های متفاوت

CHARACTERISTICS OF SCALE MODELS (SYNTHETIC TISSUES) FOR
SIMULATING 450-MHz EXPOSURE AT 2450-MHz RFR

Full-Scale Dielectric Constant (T=37°C)	Scale Synthetic Tissue	Composition % Total Weight					Scale + Dielectric Constant (T=20°C)	Specific Heat (kcal/kg °C)	Density (g/cm ³)	
		H ₂ O	Ethylene Glycol	NH ₄ Cl	NaCl	PEP				TX150
c'=53 σ = 1.18	Muscle (gel)	82			4.2	5.8	8.0	c'=53.3 σ = 6.4	.86	1.000
c'=53 σ = 1.18	Muscle (liquid)	53.9	40.6	5.5				c'=50.2 σ = 6.4	.87	1.074
c'=33 σ = 0.98	Mixture (liquid: 2/3 muscle; 1/3 fat)	29	65.2	5.8				c'=33.1 σ = 4.8	.71	1.099

*Scale Factor—5.44

جدول ۱ - مشخصه الکتریکی علفه مصنوعی در فرکانس ۴۵۰ MHz در فرکانسهای دیگر به شرط اینکه دما ثابت باشد ، تنها شاخص تلفات σ به طور خطی با فرکانس تغییر میکند . [A]

در قسمتهای متفاوت بدن میزان جذب انرژی الکترومغناطیسی و ذخیره آن (عوامل ϵ' و μ) و همچنین میزان جذب انرژی الکترومغناطیسی و تبدیل آن به گرما (عوامل σ $\lambda = 60$ و ϵ'') به مواد و شکل و اجزای بدن و چگونگی برخورد موج و فرکانس موج بستگی دارد .

اثر امواج الکترومغناطیسی در ارتباط با عوامل پلاریزاسیون اجزای بدن (ϵ' و μ) هنوز از نظر علمی چندان بررسی نشده است . البته در تشخیص درمان مثلاً در شناخت تومورهای سرطانی از اندازه گیری دیفراکشن (Diffraction) یعنی میزان انحراف موج در تومور و یا به تعبیر علمی ، اندازه گیری میزان پلاریزاسیون الکتریکی قسمتهای متفاوت تومور [$\epsilon = [\epsilon]$] استفاده میشود . و یا در اندازه گیری μ خون برای تشخیص ناراحتیهای خونی مطالعه میشود . ولی اثرهای جنبی پلاریزاسیون میدان الکترومغناطیسی (عوامل ϵ' و μ) به خصوص در مدت طولانی در بدن هنوز مطالعه علمی چندان نشده است . ولی اثر امواج الکترومغناطیسی در ارتباط با جذب انرژی و تبدیل آن به گرما در اجزای مختلف بدن (بطور عمده عامل σ $\lambda = 60$ و ϵ'') تا حدودی مطالعه شده است تبدیل میدان الکتریکی و مغناطیسی به گرما سبب افزایش دمای جزء بخصوص بدن در معرض موج است ، میشود . به منظور سهولت مطالعه ، نسبت درم توان الکترومغناطیسی جذب شده از

موج برخورد کرده که به گرما تبدیل میشود به جرم هر جزء بدن را جذب ویژه الکترومغناطیس * SAR مینامند.

جذب ویژه الکترومغناطیس SAR طبق رابطه زیر بیان کننده میزان افزایش دمای هر جزء بدن در مقابل موج است .

$$SAR_{avg} = 4.184 \times 10^3 C. \Delta T / \Delta t$$

که در آن :

C : گرمای ویژه بر حسب $Kcal/Kg - ^\circ C$

ΔT : افزایش دما بر حسب سانتیگراد $^\circ C$

Δt : زمانی که ماده در معرض موج الکترومغناطیسی است (بر حسب ثانیه)

SAR_{avg} : جذب ویژه الکترومغناطیس ماده (مقدار متوسط)

طبیعی است که هر جزء بدن با توجه به مواد تشکیل دهنده خاص آن و همچنین جهت و فرکانس موج اعمال شده ، جذب ویژه خاصی دارد . در نتیجه اجزای بدن در مقابل موج افزایش دمای متفاوتی از خود نشان میدهند . چون اثر موج روی هر جزء به تنهایی قابل اندازه گیری نیست ، بنابراین بدن را با توجه به عطفه های گوناگون ، به صورت بلوکهای متفاوتی در نظر میگیرند و سپس SAR جذب ویژه الکترومغناطیس را اندازه گیری میکنند . در یک نمونه بدن را مطابق شکل (۴) به بلوکهای گوناگون تقسیم میکنند و میزان جذب ویژه در حالت ایستاده و (دستها) افتاده با پلاریزاسیونهای متفاوت برخورد در فرکانس ۴۵۰ MHz اندازه گیری شده و نتیجه جدول (۲) میباشد. در شکل (۴) بدن در مختصات z و y و x است . طول بدن در راستای x است . صفحه yz موازی سطح زمین ، و محور z عمود بر صورت است . مؤلفه میدان الکتریکی با E ، مؤلفه میدان مغناطیسی با H ، و جهت برخورد موج با K مشخص شده است . علامت مشخصه برداری است که عمود بر صفحه کاغذ و جهت آن به سمت ما است . علامت مشخصه برداری است که عمود بر صفحه کاغذ و جهت آن به سمت داخل است . این اندازه گیری در سال ۱۹۳۸ میلادی (۱۳۶۲ هجری شمسی)

درصد انرژی EM جذب شده که به گرما تبدیل میشود

Electromagnetic

از موج برخورد کرده در هر جزء

Specific =

Absorption Rate

جرم آن جزء

توسط A.W.Guy , C.Kwang Chou و B.Nenhau برای نیروی هوایی آمریکا در دانشگاه جرج واشینگتن در حالت‌های مختلف انسان (نشسته، "ایستاده دستها پایین"، " ایستاده دستها بالا"، "ایستاده دستها باز") با پلاریزاسیونهای متفاوت برخورد، انجام شده است [A]

همچنانکه در جدول (۲) دیده میشود جذب ویژه تابعی است از نحوه برخورد موج و نوع جزء بدن . بنابراین بهتر است با توجه به میزان افزایش کلی دمای

Body Part	Polarization									
	EMK	-EMK	EKH	HEK	-HEK	MKE	KEM	-KEM	MKE	-MKE
Head	.084	.100	.108	.061	.074	.150	.076	.164	.065	.249
Neck	.110	.150	.198	.032	.033	.032	.100	.164	.069	.024
Shoulder	.114	.100	.143	.066	.081	.056	.064	.279	.079	.048
Upper Chest	.099	.080	.055	.000	.000	.003	.028	.095	.049	.014
Upper Arm	.056	.056	.211	.140	.120	.048	.080	.115	.015	.010
Lower Chest	.021	.002	.128	.009	.000	.020	.032	.012	.060	.011
Axilla	.032	.020	.120	.154	.167	.057	.715	.111	.016	.020
Elbow	.266	.300	.300	.184	.119	.106	.214	.076	.013	.030
Upper Abdomen	.018	.006	.023	.000	.000	.816	.050	.006	.010	.016
Lower Arm	.403	.300	.270	.143	.101	.120	.484	.088	.045	.026
Wrist	.406	.250	.589	.109	.143	.10	.420	.140	.062	.029
Lower Abdomen	.020	.021	.014	.003	.000	.055	.171	.150	.000	.020
Perineum	.016	.027	.022	.219	.189	.084	.270	.030	.060	.169
Hand	.129	.084	.581	.258	.295	.135	.767	.724	.037	.244
Upper Leg	.081	.178	.207	.047	.114	.080	.150	.015	.052	.052
Knee	.187	.090	.144	.059	.076	.097	.157	.087	.049	.045
Lower Leg	.222	.108	.238	.061	.098	.050	.201	.195	.189	.053
Ankle	.230	.214	.264	.070	.101	.140	.275	.262	.090	.068
Foot	.077	.084	.113	.116	.158	.144	.138	.082	.295	.100

جدول ۲ - ماکزیمم جذب ویژه الکترومغناطیسی قسمت‌های مختلف بدن در حالت ایستاده و دستها افتاده (شکل ۴) که در معرض موج ۴۵۰ MHz با پلاریزاسیونهای متفاوت قرار گرفته است .

بدن یک جذب متوسط برای بدن مطرح شود . مثلاً " بطور متوسط انرژی الکترومغناطیسی جذب شده ۲ W برای هر کیلوگرم بدن انسان باعث افزایش دمای ۳°C در مدت کوتاهی میگردد . آستانه انرژی جذب متوسط در مدت زمان ۶ دقیقه (۰/۱ h) در انسان که باعث تب محسوس میگردد ۴ W/Kg است . از این روی ، مؤسسه استانداردهای ملی آمریکا ANSI در سپتامبر ۱۹۸۲ (شهریور ۱۳۶۱) یک دهم این مقدار را (۰/۴ W/Kg) به عنوان حد مجاز SAR تعیین کرده است . با رعایت این

نکته دیگر افزایش دما یا تب در انسان به چشم نمیخورد ولی اثرهای تدریجی در بر دارد که باید آنها را در نظر گرفت [۹].

دانشمندان تعدادی موش نر در معرض امواج میکروویو ، پایین تر از حد استاندارد ، در فرکانسهای ۹/۴ GHz و ۲/۴۵ و ۰/۹۱۵ قرار داده‌اند و مشاهده کرده‌اند که در سلولهای تولید مثل (Chromosom) ناراحتی ایجاد شده است . (چهار تا دوازده درصد سلولهای Spermprecursor معیوب میگردند) . در حالی که بطور طبیعی تنها ۵ تا ۹ موش در هر ده هزار تا موش به این ناراحتی دچار میشوند در این آزمایش موشها به مدت دو هفته و هر هفته ۶ روز ، روزانه ۳۰ دقیقه در معرض قدرت ۰/۰۵ W/Kg یعنی ۱/۸ حد استاندارد ، قرار گرفته‌اند . آزمایش مزبور را با فرکانس ۲۷ MHz هم انجام داده‌اند ولی نتایج دیده نشده است . سپس آزمایش فوق را با میزان قدرت ۱ W/Kg یعنی ۲/۵ برابر حد مجاز انجام دادند ، این بار آنچنان اسپرم موشها معیوب گردید که دیگر قدرت باروری تولید مثل را از دست دادند [۷]

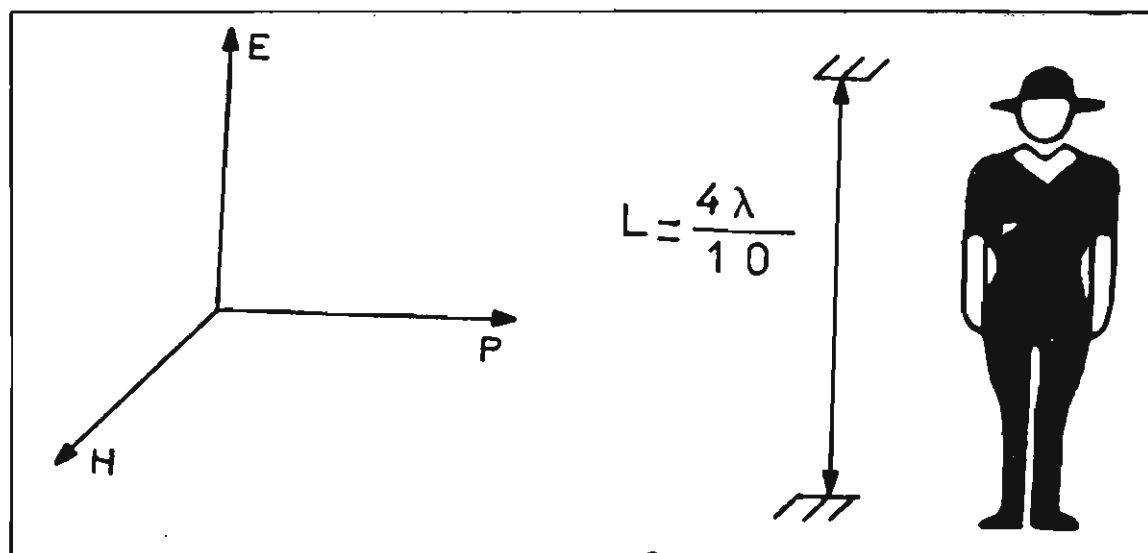
دکتر Swicard نشان داد که مواد ژنی، DNA در فرکانس ۱۱ GHz انرژی الکترومغناطیسی را چهارصد بار بیشتر از آب جذب میکند و به دنبال آن DNA به طولهای کوتاهتری شکسته میشود [۷]

برخی اثر امواج در بدن را به دو دسته تقسیم کرده‌اند [۵] . اول ، اثر برگشت پذیر (reversible) مانند گرمایی که روی آهن اثر میگذارد و دمای آن را افزایش میدهد ، ولی بعد از سرد شدن آهن ، ماهیت آن همچنان حفظ است . اثر امواج روی بیضه در صورتی که به از بین رفتن آن منتهی نشود ، از این دسته است دوم ، اثر غیر قابل برگشت (irreversible) ، مانند گرمایی که روی تخم مرغ اثر میگذارد هم دما را افزایش میدهد و هم ماهیت آن را تغییر میدهد و پس از سرد شدن به وضع اول بر نمیگردد . اثر امواج روی قسمتهای بسیاری از بدن از جمله چشم ، از این دسته‌اند. مواد چسبنده چشم در مقابل امواج الکترومغناطیسی مانند سفیده تخم مرغ در مقابل کرما ، اسفت شده و ناراحتی آب مروارید را به دنبال دارد .

۳- حساسیت فرکانسی بدن در مقابل امواج الکترومغناطیسی :

کل بدن انسان را میتوان مشابه یک تشدید کننده دی‌الکتریک در نظر گرفت بدن را میتوان معادل یک استوانه دارای قطر ، ارتفاع و ϵ دانست . مقدار

متوسط ϵ_r بالاست ($\epsilon_r > ۲۵$) ، بنابراین مشابه تشدید کننده‌های دی‌الکتریک عمل میکند . ماکزیمم جذب انرژی زمانی است که طول بدن تقریباً " برابر چهار دهم طول موج میدان باشد و جهت میدان الکتریکی موج موازی قامت بدن انسان باشد . چنانچه طول بدن را بین ۸۰ Cm تا ۱۸۰ Cm در نظر بگیریم ، به ترتیب فرکانسهای ۱۵۰ MHz تا ۷۰ MHz فرکانسهای جذب بدن خواهند بود ، بنابراین میتوان گفت که قدرت جذب بدن در فرکانسهای باند VHF ، بیشتر از فرکانسهای دیگر است . در شکل ۵ ، قدرت جذب متوسط بدن در محدوده ۱۰۰۰ MHz → ۱۰ نشان داده شده است [۹]



- ۱ : طول بدن که موازی میدان الکتریکی (E) موج است .
- λ : طول موج .

H : میدان مغناطیسی موج .

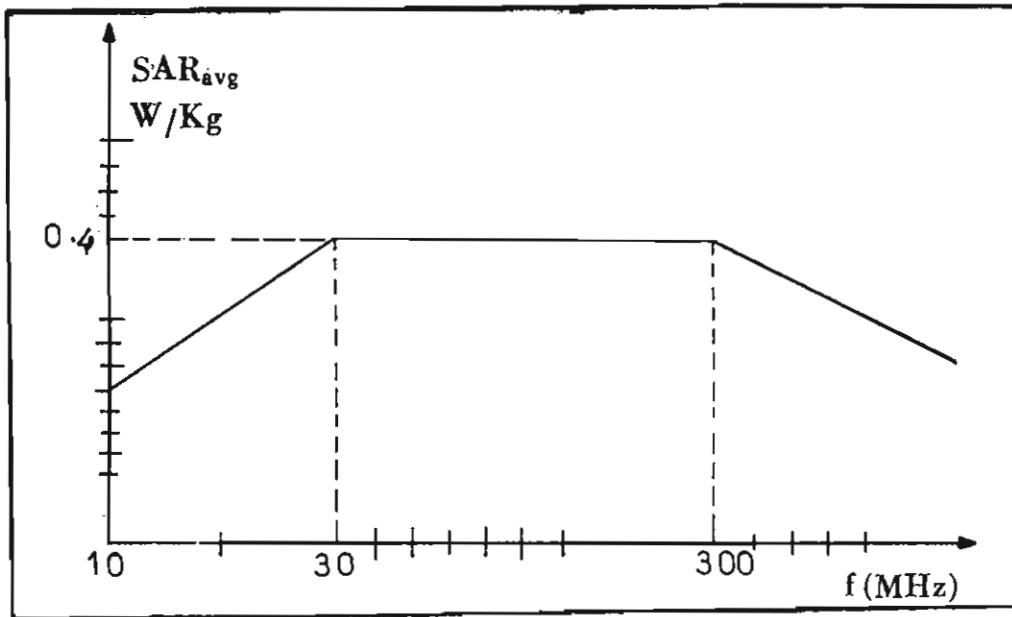
E : میدان الکتریکی موج .

S : چگالی انرژی ($S = E \times H$) .

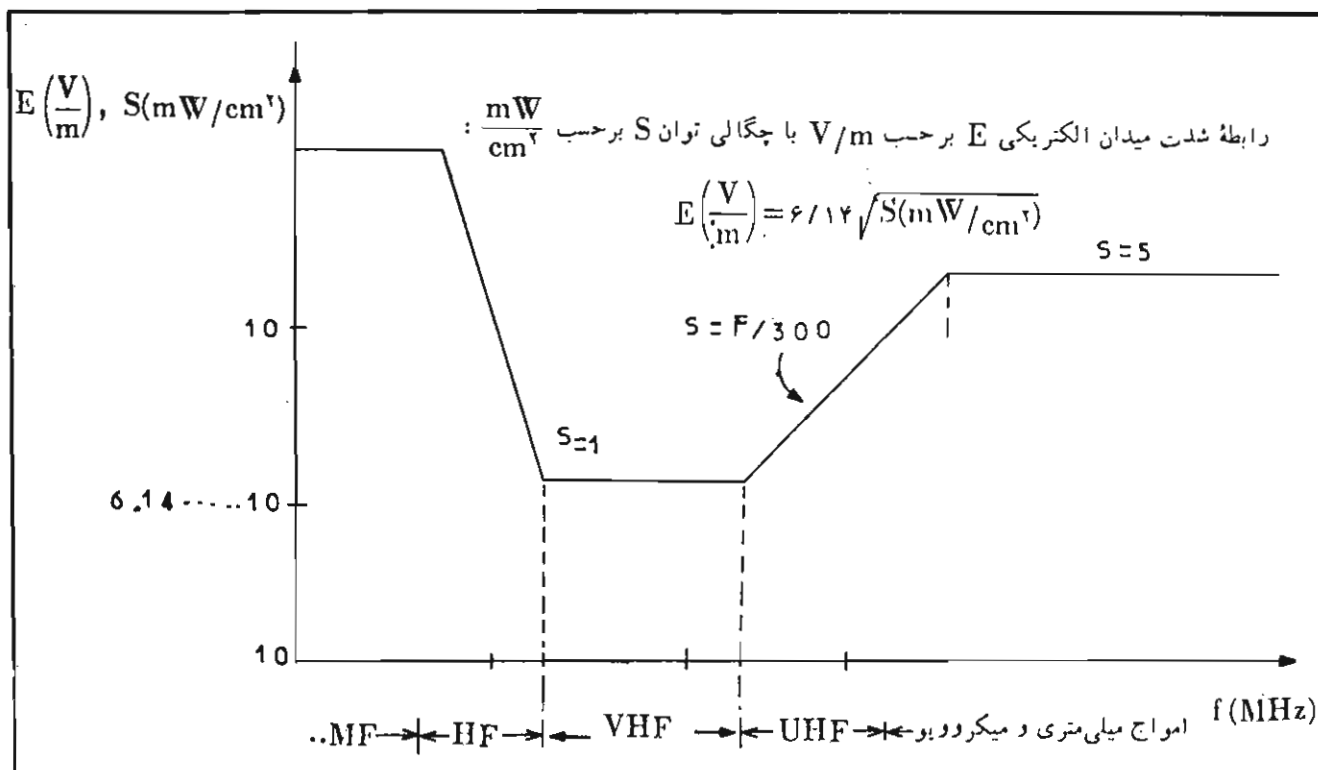
جهت برخورد موج به سمت انسان است .

$$\lambda = 2/5 l = 2/5 (۸۰ \text{ cm} \rightarrow ۱۸۰ \text{ cm})$$

$$f = ۱۵۰ \text{ MHz} \rightarrow ۷۰ \text{ MHz}$$



شکل ۵ - ماکزیمم القای موج در بدن و منحنی جذب متوسط [۹]



شکل ۶ - حد حفاظت تشعشع موج الکترومغناطیسی به بدن انسان با در نظر گرفتن $SAR_{avg} = 0.4 W/Kg$ و منحنی جذب بدن. ضریب اطمینان بین یک در بهترین شرایط تا ۰.۴ در بدترین شرایط است. پیشنهاد از ۱۹۸۲ - ۹۵/۱ - ANSI - C [۹] (مقیاس در هر دو بعد لگاریتمی است).

فرستنده‌های رادیویی ، تلویزیونی ، رادار ، اورژانس ، ارتباطات پلیس ، ارتباطات شهری ، ارتباطات ارتش ، ارتباطات هواپیمایی و ، مولد امواج الکترومغناطیسی است . در بناند جذب بدن ، قدرت فرستنده‌های FM رادیویی و تلویزیونی VHF از همه بیشتر است .

از طرفی چون موج پیوسته منتشر میشود (CONTINUOUS WAVE) علاوه بر مراکز فرستنده ، در سطح شهر هم میدان الکترومغناطیسی به میزان زیادی وجود دارد . بنابراین نکات ایمنی را نه تنها برای پرسنلی که با مراکز فرستنده کار می‌کنند ، بلکه در سطح شهر نیز باید رعایت کرد .

اهمیت حفاظت در مقابل امواج الکترومغناطیسی باعث در نظر گرفتن حدود استاندارد در محیط کار و محیط مسکونی شده است . مؤسسه استانداردهای ملی امریکا (ANSI) با توجه به آستانه توان RF ، 0.4 W/Kg ، منحنی جذب انرژی RF و سطح مقطع متوسط بدن ، یک منحنی چگالی توان $S = E \times H$ به عنوان حد حفاظت ارائه داده است . این منحنی در سپتامبر ۱۹۸۲ (شهریور ۱۳۶۱) ، ارائه شد . حد مزبور تنها در مورد یک تک فرکانس خاص است و چنانچه زمان وجود میدان بیش از یک دهم ساعت (۶ دقیقه) باشد ، یا فرکانسهای دیگری نیز وجود داشته باشد ، با یک ضریب تمحیح $1/10 \rightarrow 1/4$ ، تغییر مییابد . از طرفی چون حد حفاظت بر مبنای توان متوسط است ، در سیستمهای پالسی ، مانند فرستنده‌های رادار ، با توجه به PRF (Pulse Repetaion Frequency) یا فرکانس تکرار پالس و عرض پالس (τ) باید تعیین گردد .

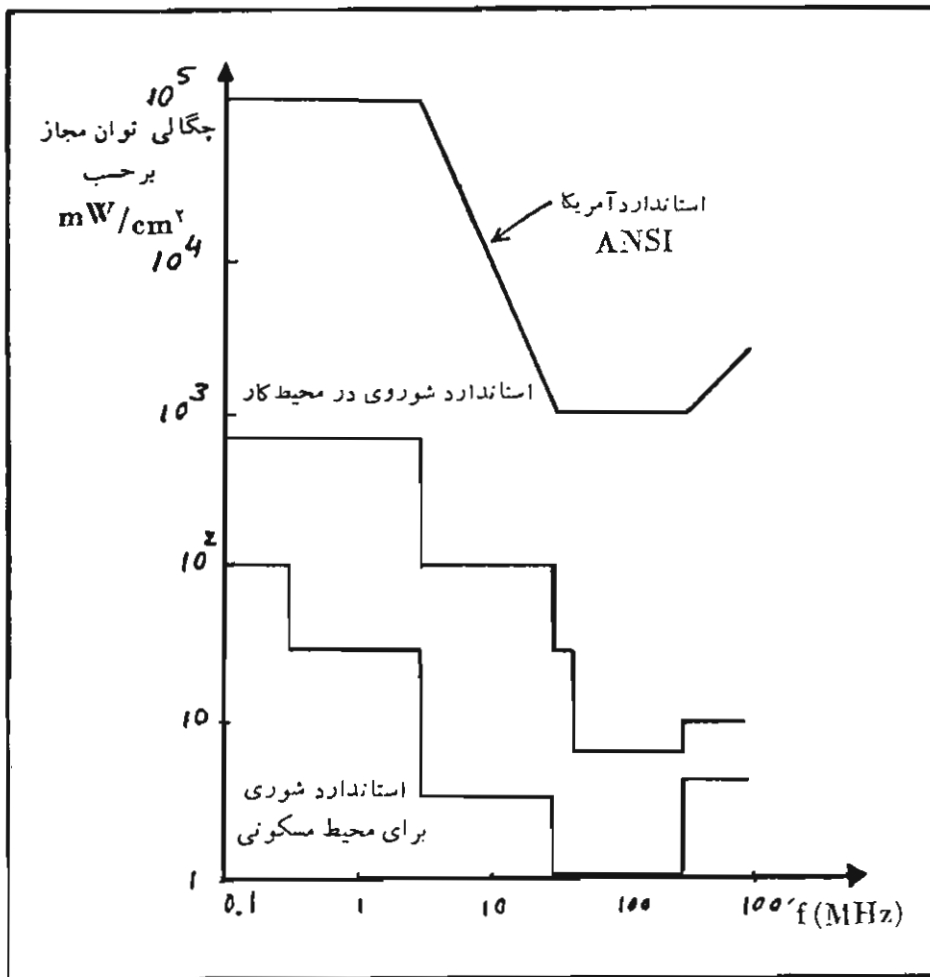
$$P_{avg} = P_t \cdot \tau \cdot PRF = P_t \text{ (duty factor)}$$

$$\tau/T = \tau \cdot PRF$$

عرض پالس \rightarrow تکرار فرکانس \rightarrow توان متوسط \leftarrow توان فرستنده رادار

مؤسسه بهداشت شوروی در ژانویه ۱۹۸۲ (دی ۱۳۶۰) پس از تمحیح استانداردهای دو سال پیش خود ، حد حفاظت را بر مبنای چگالی توان قرار نداده ، بلکه بر مبنای چگالی انرژی دریافت شده قرار داده و حد مجاز را $0.72 \text{ J/cm}^2 = 200 \text{ } \mu\text{Wh/cm}^2$ در نظر گرفته است که با توجه به منحنی جذب بدن ، سطح مقطع مؤثر ، چگالی توان مجاز را برای هشت ساعت مطابق شکل (۷) ارائه داد. در اینجا با توجه به اینکه در محیط کار نکات ایمنی ایزوله کردن پرسنل در مقابل موج انجام میشود ولی در محیط مسکونی چنین نیست ، حد مجاز محیط مسکونی را تقریباً $1/8$ محیط کار

در نظر گرفته است (شکل ۷) . استاندارد شوروی در اروپای شرقی نیز رعایت میشود [۶].

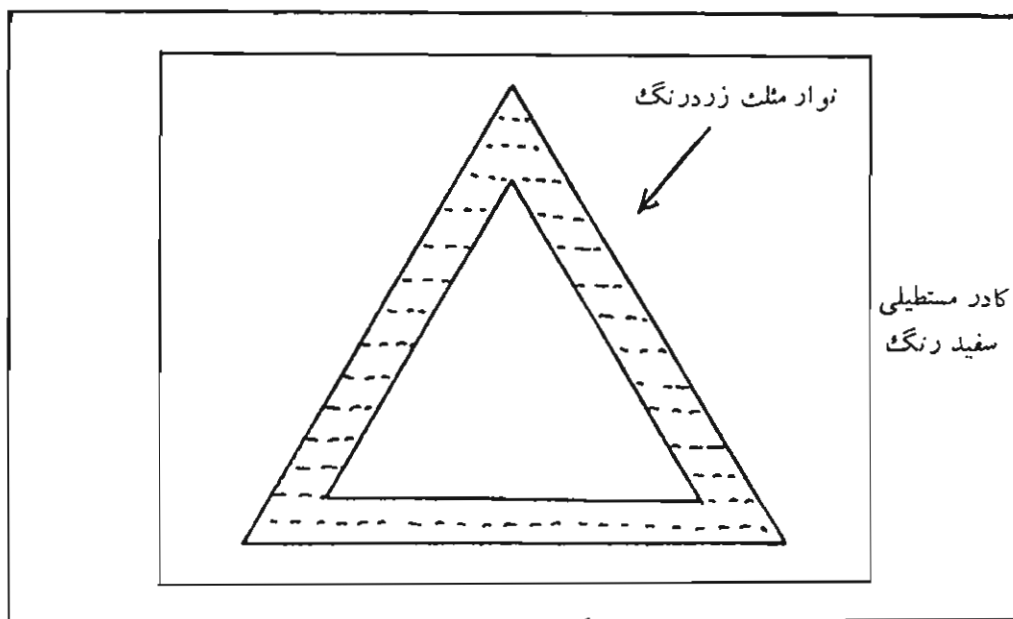


شکل ۷ - حد حفاظت تشعشع موج الکترومغناطیسی به بدن انسان با استانداردهای شوروی و امریکا

۶- آرم خطر (Warning Symbol) :

آرم خطر ، علامتی است که از طرف مؤسسه استانداردهای ملی امریکا ارائه شده است (ANSI - C ۹۵/۲- ۱۹۸۲) . با توجه به نمودار تشعشی آنتن فرستنده (Pattern) ، قدرت متوسط فرستنده ، حد استاندارد چگالی توان مجاز بر مبنای شکل (۶) و یا مؤسسه بهداشت شوروی شکل (۷) ، منطقه خطر در دو ناحیه افقی (Azimuth) و ارتفاع (elevation) محاسبه و رسم میشود . مناطقی که در معرض خطر موج است با آرم تشعشی که در داخل یک مثلث زرد رنگ رسم شده است ،

مشخص میشود . کادر زمینه مستطیلی و سفید رنگ است . برای ابعاد این آرم استاندارد وجود ندارد ، بهتر است در زیر آرم ، نوع خطر هم نوشته شود .



خطر تشعشع امواج فرستنده رادیویی FM
 شکل ۸ - آرم خطر تشعشع امواج الکترومغناطیس [۱۵]

۷- نکات الزامی :

در اینجا بیشتر نکات الزامی در فرستنده‌های رادیویی ، تلویزیونی و رادار و سایت‌های فرستنده ماهواره‌ای ، مورد نظر است . در ارتباطات نقطه به نقطه ، تنها رعایت حد حفاظت برای پرسنل سایت فرستنده کافی است ، رعایت احتیاط برای محیط مسکونی و محیط کار ، شکل متفاوتی دارد .

۷-۱- نکات الزامی برای محیط مسکونی :

- ۷-۱-۱- با توجه به نمودار تشعشی آنتن ، قدرت فرستنده ، حد استاندارد ، منطقه را در دو بعد افقی (Azimuth) و عمودی (elevation) به دست آورده و محیط خطر با علامت لازم مشخص شود .
- ۷-۱-۲- در منطقه خطر موج ، مناطق مسکونی ایجاد نگردد . یا هنگام نصب توجه شود که محیط مسکونی در معرض خطر موج قرار نگیرد .

۷-۲- نکات الزامی در محیط کار :

۷-۲-۱- میدان داخل اتاق کنترل پرسنل فرستنده ، با شیلد کردن پایین‌تر از حد استاندارد نگهداشته شود.

۷-۲-۲- چنانچه حد استاندارد ANSI استفاده میشود ، در صورتی که چند فرستنده همزمان کار میکنند ، همه ارقام چگالی توان را در ضریب اطمینان 0.4 ، ضریب کنید.

۷-۲-۳- از لباسهای دی‌الکتریک یا جاذب موج که مخصوص ایزوله نگهداشتن بدن در مقابل موج است ، استفاده شود. در لباسهای دی‌الکتریک هر چه که ϵ_r' و ϵ_r'' بالاتر و ضخیم‌تر باشد بهتر است . پیشنهاد میشود که $\epsilon_r'' \geq 0.3$ باشد.

۷-۲-۴- در صورتی که در محیط کار حتی $C \leq 0.5$ تب بسمورد داشتید ، چگالی توان محیط را اندازه‌گیری کنید و چنانچه بیشتر از حد استاندارد باشد ، برای رفع اشکال ایجاد شده بکوشید و در صورتی که میدان اتاق کنترل پایین‌تر از حد استاندارد است و با لباس دی‌الکتریک چنین مسئله‌ای بطور تکراری وجود دارد ، محل کار باید عوض شود .

۷-۲-۵- محیط کار افرادی که در فرستنده‌ها کار میکنند ، باید به طور تناوبی عوض شود . این تناوب هنوز حالت استاندارد ندارد ولی پیشنهاد میشود هر پنج سال کار در فرستنده‌ها ، یکسال کار در محیط خالی از میدان باشد.

نتیجه :

در این مقاله رفتار میدان الکتریکی و مغناطیسی ساکن و با تغییرات زمانی مدل شده است . اثر این میدانها روی انسان مورد بررسی قرار گرفته است و مدلهای مختلف برای آنالیز تشعشع روی انسان مطالعه شده است . ماکزیمم جذب ویژه الکترومغناطیسی قسمت‌های مختلف بدن در حالت ایستاده و دستهای افتاده برای فرکانس خاص و پلاریزاسیونهای متفاوت داده شده است . اثر فرکانس روی بدن انسان نیز مطالعه شده است . حد حفاظت بدن انسان به تشعشع موج الکترومغناطیسی و ضریب اطمینان در بهترین شرایط در نظر گرفته شده است . مقادیر استاندارد و حد حفاظت تشعشع در آمریکا و شوروی معرفی شده و نکات الزامی نیز تذکر داده شده است .

- 1- W.H.Hayt, Engineering Electromagnetics, Mc Graw Hill, 1981 .
- 2- Kraus & Carver, Electromagnetic , Mc Graw Hill, 1973 .
- 3- Dekker, A.J., Electrical Engineering Materials , Printice Hall , 1983.
- 4- Dolakhanov , M., Propagation of Radio Waves, Mir Publishers , 1971 .
- 5- Skolnik , M.I., Introduction to Radar Systems, Mc Graw Hill, 1980 .
- 6- Electromagnetics Hazards, IEEE Spectrum March 1984 .
- 7- Biological effects of electromagnetic field, IEEE Spectram, May 1984.
- 8- A.W.Guy, C.Chung Chou & B.Neuhaus, (Average SAR and SAR Distributions in Man at 450 MHz) , IEEE , Microwave theory & techniques , August 1984 , Special issue on electromagnetic wave interactions with biological systems.
- 9- American National Standard Institute, ANSI C 95.1-1982.
Safety levels with respect to human exposures to radio frequency electromagnetic fields , 300 KHz 100 GHz .
- 10- American National Standard Institute, ANSI C 95.2-1982. Radio frequency radiation hazard warning symbol.
- 11- K.H.. Hohne ,V. Obermoller, M.Riemer & G. Witte, Fourier Domain Techniques for Digital Angiography of the Heart, Medical Imaging, IEEE June 1984.