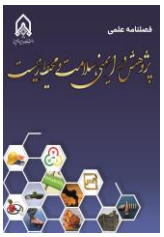
فصلنامه علمی پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست / سال ۱۴۰۳/ دوره ۲/ شماره۱/ صفحه ۱-۱۳

فصلنامه علمی پژوهش در ایمنی، سلامت و محیط زیست



ارزیابی اثرات امواج الکترومغناطیس بر نرخ جذب خاص بدن انسان مبتنی بر الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی

رضا اصفهانی[1*]

نویسنده مسئول:[1] استادیار گروه مخابرات، دانشکده و پژوهشکده ارتباطات و شبکه، دانشگاه .جامع امام حسین علیه السلام، تهران، ایران

چکیده

با گسترش روزافزون فناوری‌های ارتباطی و حضور امواج (میدان) الکترومغناطیس (EMF)در محیط زندگی، نگرانی‌هایی در خصوص تأثیرات زیست‌محیطی و سلامت انسان مطرح شده است. همچنین با گسترش روزافزون فناوری‌های بی‌سیم و پدیده اینترنت اشیاء (IoT)، انسان در معرض تراکم بالایی از امواج الکترومغناطیس قرار دارد. ارزیابی دقیق اثرات زیست‌محیطی این امواج و تأثیر آن بر بافت‌های زنده، یکی از چالش‌های اصلی بهداشت محیط و مهندسی پزشکی است. این پژوهش به بررسی مکانیسم‌های اثرگذاری امواج بر بافت‌های بدن و استانداردهای ایمنی می‌پردازد. هدف اصلی، ارائه راهکارهای عملی برای کاهش مواجهه و حفاظت از بدن در برابر تابش غیریون‌ساز است. نتایج نشان می‌دهد که رعایت اصول ایمنی و پدافند غیرعامل، افزایش فاصله از منبع تشعشع و استفاده از وسایل حفاظتی، می‌تواند احتمال آسیب‌های حرارتی و غیرحرارتی را به حداقل برساند. روش‌های سنتی اندازه‌گیری و شبیه‌سازی عددی (مانند روش FDTD) زمان‌بر و پرهزینه هستند. روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی پس از مرحله آموزش، با سرعتی فوق‌العاده بالا پاسخ می‌دهند و هزینه محاسباتی بسیار پایینی دارند، هرچند که دقت آن‌ها وابسته به کیفیت و حجم داده‌های آموزشی است و ممکن است در شرایط ناشناخته دچار خطا شوند. این مقاله به بررسی کاربرد هوش مصنوعی (AI) و یادگیری ماشین (ML) به عنوان ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی نرخ جذب خاص (SAR) و ارزیابی خطرات ناشی از امواج می‌پردازد. روش پیشنهادی این مقاله (به کمک پیاده‌سازی پایتون)، شامل دو مرحله است تا بتوان به درک مناسبی از تاثیر امواج الکترومغناطیس رسید. ابتدا نحوه نفوذ امواج الکترومغناطیس به بافت‌های بدن مبتنی بر SAR پیشنهاد شده و در مرحله دوم، یک چارچوب شبیه‌سازی پیش‌بینی SAR با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی ارائه شده است که جایگزینی کارآمد برای تکنیک‌های شبیه‌سازی سنتی برای ارزیابی ریسک و مدیریت مواجهه، ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد هرچه فاصله بین منبع انتشار و بدن انسان، بیشتر و توان کمتر باشد، مقدار SAR در وضعیت بهتری قرار می‌گیرد. البته کاهش فرکانس هم هرچند کمتر از دو پارامتر ورودی (فاصله و توان)، ولی تاثیرگذار خواهد بود.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹

*نویسنده مسئول: resfahani@ihu.ac.ir

کلید واژه‌ها:

امواج الکترومغناطیس

یادگیری ماشین

الگوریتم جنگل تصادفی

ایمنی بدن انسان

SAR

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

© نویسندگان

این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License- CC BY) در دسترس شما قرار گرفته است.

۱- مقدمه

امواج الکترومغناطیس (EMF[۱]) به عنوان بخشی جدایی‌ناپذیر از زندگی مدرن، از فرستنده‌های رادیویی و پخش تلویزیونی گرفته تا تلفن‌های همراه، شبکه‌های وای‌فای و سیستم‌های راداری، همگی منابع تولید این امواج بوده و به عبارتی در طیف وسیعی از فرکانس‌ها از امواج رادیویی تا پرتوهای گاما وجود دارند. در دهه‌های اخیر، استفاده از تلفن‌های همراه، آنتن‌های مخابراتی، شبکه‌های وای‌فای و دستگاه‌های خانگی الکتریکی باعث شده است که میزان مواجهه انسان با این امواج به شدت افزایش یابد. نگرانی‌های اصلی در مورد تأثیرات زیست‌محیطی این امواج به دو دسته تقسیم می‌شوند: اثرات حرارتی (گرمایش بافت) و اثرات غیرحرارتی (تأثیرات بلندمدت بر سیستم عصبی و سلولی) .سازمان‌هایی مانند پیچیدگی آناتومی بدن انسان و تنوع در فرکانس‌ها، نیاز به روش‌های هوشمندانه‌تری برای ارزیابی دقیق‌تر ایجاد کرده است. سازمان بهداشت جهانی (WHO) و آژانس بین‌المللی تحقیقات سرطان (IARC)، امواج رادیویی فرکانس بالا (RF) را در گروه «سرطان‌زای احتمالی برای انسان» دسته‌بندی کرده‌اند. اگرچه شواهد قطعی برای ارتباط مستقیم با سرطان‌های خاص هنوز در حال بررسی است، اما اثرات حرارتی (گرمایش بافت) و غیرحرارتی (تأثیر بر سیستم عصبی و سلولی) محرز شده است. لذا، اتخاذ رویکردهای پیشگیرانه و ایمنی‌محور ضروری به نظر می‌رسد. در این مقاله ابتدا در بخش ۲ به مبانی نظری و مکانیسم‌های اثرگذاری پرداخته شده و سپس در بخش ۳، نقش هوش مصنوعی در ارزیابی و راهکارهای ایمنی و پدافند غیرعامل مبتنی بر آن بیان شده است. در بخش ۴، روش پیشنهادی و مقایسه با سایر شیوه‌ها آورده شده است.

۲- مبانی نظری

امروزه بیش از گذشته افراد در معرض اثرات مخرب امواج الکترومغناطیسی هستند. لوازم خانگی و تجهیزات صنعتی، ارتباطات از راه دور، همگی منبع این امواج مخرب می باشند . میدان های الکتریکی با فرکانس پایین مانند هر ماده دیگری که از ذرات باردار تشکیل شده است، بر بدن انسان تأثیر می گذارند. هنگامی که میدان الکتریکی روی مواد رسانا عمل می کند، بر توزیع بارهای الکتریکی در سطح آنها تأثیر می گذارد. امواج مغناطیسی حتی با فرکانس پایین، در بدن انسان جریان پیدا می کنند. قدرت این جریان ها بستگی به شدت میدان مغناطیسی خارج دارد. این جریان ها می توانند باعث تحریک اعصاب و ماهیچه ها شوند، یا بر سایر فرآیندهای بیولوژیکی تأثیر بگذارند. شش اثر مهم مخرب امواج الکترومغناطیس بر بدن انسان به شرح زیر است [۱]:

۱- امواج الکترومغناطیسی می توانند اثرات بیولوژیکی را تحریک کنند؛ امواج الکترومغناطیسی می توانند اثرات بیولوژیکی را تحریک کنند. اثرات بیولوژیکی، پاسخ های قابل اندازه‌گیری به یک محرک یا تغییر در محیط هستند. این تغییرات لزوماً برای سلامتی مضر نیستند. بدن دارای مکانیزم‌های پیچیده‌ای برای تنظیم با تأثیرات متنوعی است که در محیط خود با آن‌ها روبرو می‌شود. تغییر مداوم، بخش عادی از زندگی انسان را تشکیل می‌دهد، اما مطمئناً، بدن، مکانیزم جبران کافی برای همه اثرات بیولوژیکی را ندارد. تغییراتی که برگشت‌ناپذیر هستند و برای مدت طولانی برسیستم بدن تأثیر می‌گذارند، ممکن است یک خطر برای سلامتی باشند. اثر نامطلوب تغییرات بیولوژیکی باعث ایجاد اختلال در سلامتی فرد در معرض، یا فرزندان وی می‌شود. جای تردید نیست که میدان‌های الکترومغناطیسی فراتر از حد مجاز می‌توانند اثرات بیولوژیکی را تحریک کنند و در نهایت بر سلامت ماهیچه‌ها و اعصاب بدن تاثیر گذارند.

۲- علائم گزارش شده در مورد اثرات مخرب امواج الکترومغناطیس بر بدن؛ علائم گزارش شده در مورد اثرات مخرب امواج الکترومغناطیس بر بدن، شامل سردرد، اضطراب، خودکشی، فسردگی، حالت تهوع، خستگی و از بین رفتن میل جنسی است. لازم به ذکر است که تا به امروز، شواهد علمی ارتباطی بین این علائم و قرار گرفتن در معرض میدان‌های الکترومغناطیسی خفیف را گزارش نکرده است.

[۱] Electromagnetic Fields

۳- اثرات مخرب امواج الکترومغناطیس برحاملگی؛ گزارشات، حاکی ازاثرات مخرب امواج الکترومغناطیس برحاملگی است. شواهد نشان می دهند که قرار گرفتن در معرض امواج الکترومغناطیس قوی، خطر سقط‌های خود به خود، ناهنجاری‌ها، وزن کم هنگام تولد و بیماری‌های مادرزادی را افزایش می‌دهد.

۴- اثرات مخرب امواج الکترومغناطیس برآب مروارید؛ اثرات مخرب امواج الکترومغناطیس برسوزش چشم و آب مروارید، بین کارگران در معرض مقادیر بالای امواج الکترومغناطیس گزارش شده است، اما مطالعات حیوانی از این عقیده پشتیبانی نمی‌کنند. هیچ مدرکی وجود ندارد که نشان دهد، این تأثیرات در سطحی که عموم مردم تجربه می‌کنند، رخ دهد.

۵- اثرات مخرب امواج الکترومغناطیس و سرطان؛ رابطه بین امواج الکترومغناطیس و سرطان، بسیار بحث برانگیز است. با این حال، واضح است امواج الکترومغناطیسی با رشد سرطان ارتباط مستقیم دارند. تعدادی از مطالعات اپیدمیولوژیک حاکی از افزایش ابتلا به لوسمی در کودکان است. علت این امر، قرار گرفتن در معرض میدان مغناطیسی با فرکانس پایین در خانه است. با این حال، دانشمندان همچنان در حال بررسی و تحقیق هستند. در حال حاضر مطالعات گسترده ای در چندین کشور در حال انجام است، که ممکن است به رفع این مشکلات کمک کند.

۶- حساسیت و افسردگی الکترومغناطیسی؛ از دیگر عوارض قرار گرفتن در معرض امواج الکترومغناطیسی، حساسیت و افسردگی الکترومغناطیسی است. که می تواند با درد، سردرد، افسردگی، بی حالی، اختلالات خواب و حتی تشنج و صرع همراه باشد. مطالعات اخیر نشان می دهند که قرار گرفتن در معرض میدان الکترومغناطیسی، واکنش‌های مداوم و یکسانی ایجاد نمی کند، اما در بسیاری موارد علائم ذکر شده، گزارش شده است.

بررسی اثرات زیست‌محیطی امواج الکترومغناطیس بر اعضا و جوارح انسان از اهمیت بالایی برخوردار است. امواج الکترومغناطیس بر اساس فرکانس به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- *تابش یون‌ساز*[۱]: مانند پرتوهای X و گاما که انرژی کافی برای شکستن پیوندهای شیمیایی مولکول‌های DNA را دارند
- *تابش غیریون‌ساز*[۲]: شامل امواج رادیویی، مایکروویو و میدان‌های فرکانس پایین که انرژی آن‌ها برای یونیزه کردن کافی نیست اما می‌تواند باعث تحریک الکتریکی یا گرمایش بافت‌ها شود.

امواج می‌توانند از طریق دو مکانیسم اصلی بر بدن تأثیر بگذارند:

- *اثرات حرارتی:* مهم‌ترین اثر شناخته‌شده امواج با فرکانس بالا (بالای ۱۰۰ کیلوهرتز) جذب انرژی و تبدیل آن به گرما در بافت‌های بدن است. این پدیده می‌تواند باعث افزایش دمای بدن و آسیب به بافت‌های حساس مانند چشم، بیضه و اسپرم شود [۲] که توانایی کمتری در دفع گرما دارند. پارامتر کلیدی برای سنجش این اثر، «نرخ جذب خاص» (SAR[۳]) است که مقدار انرژی جذب شده امواج رادیویی (الکترومغناطیس) توسط واحد جرم بافت بدن انسان را هنگام استفاده از دستگاه‌هایی مانند تلفن همراه یا . . . نشان می‌دهد و واحد اندازه‌گیری آن معمولاً وات بر کیلوگرم (W/kg) است.
- *اثرات غیرحرارتی:* برخی مطالعات نشان می‌دهند که مواجهه طولانی‌مدت با سطوح پایین امواج ممکن است بر سیستم عصبی مرکزی، الگوی خواب و ترشح هورمون‌ها (مانند ملاتونین) تأثیر بگذارد. همچنین، تغییرات در نفوذپذیری غشای سلولی و تولید رادیکال‌های آزاد از دیگر موارد مورد بحث در محافل علمی است.

در این مقاله SAR به خاطر اهمیت آن، معیار ارزیابی مورد نظر است. برای حفاظت از سلامت عمومی، سازمان‌هایی مانند «کمیسیون بین‌المللی حفاظت در برابر تابش غیریون‌ساز» (ICNIRP[۴])، «کمیسیون ارتباطات فدرال ایالات

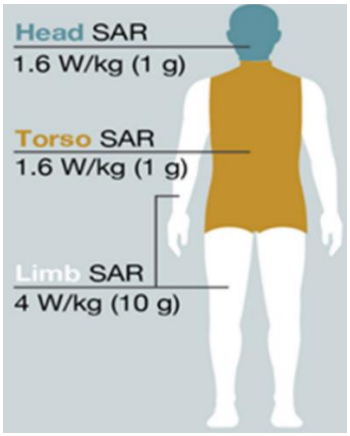
[۱] Ionizing

[۲] Non-ionizing

[۳] Specific Absorption Rate

[۴] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

متحده» (FCC[۱]) و «مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران» استانداردهایی را برای سطوح SAR مجاز برای دستگاه‌های RF تعیین کرده‌اند. این استانداردها بر اساس «نرخ جذب خاص» (SAR) تنظیم می‌شوند [۳] که حداکثر مقدار انرژی جذب شده توسط بدن انسان را محدود می‌کند. این استانداردها برای محافظت از سلامت انسان در برابر اثرات بالقوه مضر امواج RF طراحی شده‌اند [۴]. برای مثال، حد مجاز SAR برای عموم مردم معمولاً کمتر از ۲ وات بر کیلوگرم بافت در نظر گرفته می‌شود. برای حفظ ایمنی عمومی، مقادیر مجاز SAR توسط سازمان‌های مختلف تعیین می‌شود. برای مثال در ایالات متحده (FCC)، محدودیت ۱٫۶ وات بر کیلوگرم (میانگین روی ۱ گرم بافت) و در اروپا (ICNIRP)محدودیت ۲٫۰ وات بر کیلوگرم (میانگین روی ۱۰ گرم بافت). سطوح مجاز SAR در بعضی قسمت‌های بدن انسان در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱) سطوح مجاز SAR در بعضی قسمت‌های بدن انسان

رابطه (۱)، فرمول محاسبه SAR است. همچنین این فرمول پایه و اساس طراحی آنتن‌های موبایل و تست‌های ایمنی دستگاه‌های مخابراتی هستند.

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \qquad (۱)$$

SAR: نرخ جذب اختصاصی - وات بر کیلوگرم یا W/kg

E: شدت میدان الکتریکی در بافت - ولت بر متر یا V/m

ρ (رو): چگالی جرمی بافت بدن - کیلوگرم بر متر مکعب یا Kg/m^3

σ (سیگما): رسانایی الکتریکی بافت بدن - زیمنس (A/V) بر متر یا A/(Vm)

۳- روش تحقیق

روش‌های کلاسیک شبیه‌سازی الکترومغناطیسی مانند روش «تفاضل محدود در حوزه زمان» (FDTD[۲]) یا «روش اجزای محدود» (FEM[۳]) دقیق هستند [۵] اما نیازمند منابع محاسباتی سنگین هستند. هوش مصنوعی با استفاده از داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌های قبلی یا اندازه‌گیری‌های واقعی، می‌تواند مدل‌های جایگزینی را ارائه دهد:

- *پیش‌بینی سریع SAR*: شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)می‌توانند با دریافت پارامترهایی مانند فرکانس، توان، فاصله از آنتن و نوع بافت، مقدار SARرا در کسری از ثانیه پیش‌بینی کنند [۶ و ۷].
- *طبقه‌بندی خطرات:* الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند الگوهای پیچیده در داده‌های تماس[۴] را شناسایی کرده و مناطق پرخطر را در محیط‌های شهری یا صنعتی مشخص کنند.
- *بهینه‌سازی طراحی:* با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک و یادگیری تقویتی، می‌توان آنتن‌هایی را طراحی کرد که بیشترین بهره‌وری را داشته باشند و کمترین میزان اشباع امواج را در بافت‌های حساس بدن ایجاد کنند.

[۱] Federal Communications Commission

[۲] Finite-Difference Time-Domain: یکی از روش‌های اصلی و قدرتمند در محاسبات عددی الکترومغناطیس است که برای تحلیل و شبیه‌سازی برهم‌کنش امواج الکترومغناطیسی با اجسام و محیط‌های مختلف (مانند بافت بدن انسان) استفاده می‌شود. در این روش، معادلات ماکسول با استفاده از تقریب‌های تفاضلی در حوزه زمان حل می‌شوند.

[۳] Finite Element Method: یک روش عددی قدرتمند برای حل مسائل مهندسی و فیزیکی است. در زمینه الکترومغناطیس، FEM معمولاً برای تحلیل مسائل در حوزه فرکانس (Frequency Domain) و شبیه‌سازی دستگاه‌های آنتن یا محاسبه توزیع میدان در هندسه‌های پیچیده استفاده می‌شود. در این روش، دامنه مسئله به تعداد زیادی زیربخش کوچک (عنصر یا Element) تقسیم می‌شود.

[۴] Exposure

استفاده از هوش مصنوعی تنها برای تشخیص خطر نیست، بلکه برای ارائه راهکارهای حفاظتی نیز کاربرد دارد [۸]. با توجه به اصل احتیاط، راهکارهای متعددی برای کاهش مواجهه با امواج وجود دارد که می‌توان آن‌ها را در دسته‌های زیر طبقه‌بندی کرد:

- *افزایش فاصله:* قانون توان در فاصله بیان می‌کند که شدت میدان با مجذور فاصله از منبع رابطه عکس دارد. بنابراین، حفظ فاصله از منابع تشعشع (مانند نگه داشتن گوشی موبایل در فاصله دور از گوش و مغز در زمان مکالمه) مؤثرترین روش کاهش جذب انرژی است.
- *کاهش زمان مواجهه:* کاهش مدت زمان تماس تلفنی و استفاده از هندزفری یا پیام‌متنی به جای مکالمه صوتی طولانی، میزان جذب امواج را به شدت کاهش می‌دهد.
- *استفاده از پوشش‌های محافظ‌ها*[۱]: استفاده از مواد رسانا (مانند فلزات) برای مسدود کردن یا انحراف امواج. در طراحی ساختمان‌ها می‌توان از شیشه‌های دوجداره با لایه فلزی یا رنگ‌های خاص برای کاهش نفوذ امواج از بیرون به داخل استفاده کرد. همچنین استفاده از پوشش‌های محافظ برای گوشی موبایل که آنتن را نمی‌پوشانند اما امواج سمت بدن را هدایت می‌کنند، توصیه می‌شود یادگیری ماشین می‌تواند در طراحی مواد متامتریال و پوشش‌های لباس که امواج مضر را دفع یا جذب می‌کنند، کمک کند.
- *سبک زندگی سالم:* تقویت سیستم ایمنی بدن از طریق تغذیه سالم (مصرف آنتی‌اکسیدان‌ها)، ورزش منظم و خواب کافی، می‌تواند توانایی بدن برای مقابله با استرس‌های ناشی از تشعشعات محیطی را افزایش دهد. البته پوشیدنی‌های هوشمند می‌توانند سطح مواجهه فرد را در طول روز ثبت کرده و در صورت نزدیک شدن به حد مجاز، هشدار دهند.
- *مدیریت هوشمند تماس*[۲]: سیستم‌های هوشمند می‌توانند با سنجش تراکم امواج در محیط، به صورت خودکار توان فرستنده‌ها را کاهش دهند یا کاربران را نسبت به مناطق پرخطر آگاه کنند.

در این مقاله از روش هوش مصنوعی مبتنی بر الگوریتم جنگل تصادفی[۳] بهره برده شده است. الگوریتم جنگل تصادفی یکی از روش‌های یادگیری ماشین است که هم برای مسائل «دسته‌بندی[۴]» (پیش‌بینی برچسب‌ها) و هم برای «رگرسیون» (پیش‌بینی مقادیر عددی) استفاده می‌شود. این الگوریتم با ساخت تعداد زیادی «درخت تصمیم» در زمان آموزش کار می‌کند. موضوعات درخت تصمیم[۵]، یادگیری گروهی[۶]، کیسه‌بندی یا بگینگ[۷] و تصادفی بودن در این الگوریتم یادگیری ماشین، کاربرد دارد. *درخت تصمیم* مانند یک نمودار جریان است. در هر گره، یک سوالی پرسیده می‌شود (مثلاً: «آیا فرکانس بیشتر از ۱۸۰۰ مگاهرتز است؟») و بر اساس پاسخ، مسیر به شاخه‌های مختلف تقسیم می‌شود تا در نهایت به یک نتیجه (برگ درخت) برسد. در *یادگیری گروهی*، جنگل تصادفی یک روش گروهی است. یعنی به جای تکیه بر یک الگوریتم واحد، چندین الگوریتم (در اینجا چندین درخت) را ترکیب می‌کند تا یک پیش‌بینی قدرتمندتر ایجاد کند. این ایده بر اساس «خرد جمعی» استوار است. بگینگ، الگوریتم زیرمجموعه‌های تصادفی متعددی از داده‌های اصلی ایجاد می‌کند (انتخاب با

[۱] Shielding

[۲] Exposure Management

[۳] Random Forest

[۴] Classification

[۵] Decision Tree

[۶] Ensemble Learning

[۷] Bagging

جایگزینی). روی هر زیرمجموعه، یک درخت تصمیم جداگانه آموزش داده می‌شود. در *تصادفی بودن* هنگام تقسیم کردن یک گره در درخت، الگوریتم به جای بررسی تمام ویژگی‌ها، فقط یک زیرمجموعه تصادفی از آن‌ها را بررسی می‌کند. این کار باعث می‌شود درخت‌ها متنوع باشند و همبستگی کمتری با هم داشته باشند. نحوه عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی در شکل (۲) آورده شده است.

شکل (۲) نحوه عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی

- *انتخاب نمونه‌های تصادفی*: انتخاب رکورد تصادفی از مجموعه داده را شامل می‌شود.
- *ساخت درخت‌های تصمیم*: ساخت یک درخت تصمیم برای هر نمونه. در هر گره، فقط از زیرمجموعه‌ای تصادفی از ویژگی‌ها برای پیدا کردن بهترین تقسیم استفاده می‌شود.
- پیش‌بینی:
  - *برای دسته‌بندی*: هر درخت رأی می‌دهد. دسته‌ای که بیشترین رأی را دارد، به عنوان پیش‌بینی نهایی انتخاب می‌شود.
  - *برای رگرسیون*: هر درخت یک عدد پیش‌بینی می‌کند. پیش‌بینی نهایی برابر با میانگین تمام پیش‌بینی‌های درخت‌ها است.

۴- یافته‌ها

روش پیشنهادی این مقاله، شامل دو مرحله است تا بتوان به درک مناسبی از تاثیر امواج الکترومغناطیس رسید:

- نحوه نفوذ امواج الکترومغناطیس به بافت‌های بدن مبتنی بر SAR
- شبیه‌سازی پیش‌بینی SAR با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی

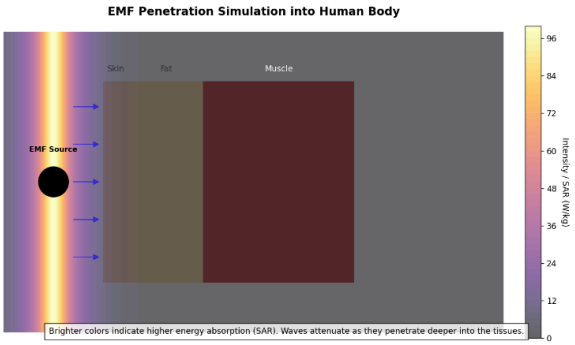
یک شبیه‌سازی گرافیکی و دقیق از نحوه نفوذ امواج الکترومغناطیس به بافت‌های بدن و توزیع گرما (SAR) ترسیم شده است. در این روش، همان‌طور که در خروجی شبیه‌سازی شکل (۳) نشان می‌دهد چگونه امواج از یک منبع (مانند گوشی موبایل) ساطع شده و به صورت نمایی در بافت‌های بدن (مانند پوست، چربی و عضله) کاهش می‌یابند و انرژی جذب می‌کنند. با اجرای این کد، یک نمودار رنگی[۱] حاصل خواهد شد که عمق نفوذ و شدت امواج را نشان می‌دهد. خروجی شبیه‌سازی، شکل (۳)، دارای ویژگی‌های زیر است:

- *لایه‌های بدن*: سمت چپ تصویر، لایه‌های پوست، چربی و عضله با رنگ‌های مختلف نمایش داده شده‌اند.
- *منبع امواج*: یک دایره سیاه در سمت چپ که نشان‌دهنده آنتن یا منبع تابش است.
- *نقشه حرارتی (Heatmap)*: رنگ‌ها از زرد روشن (شدت بالا) به بنفش تیره (شدت پایین) تغییر می‌کنند.
  - مشاهده خواهید کرد که بیشترین شدت و گرما در نزدیکی منبع و در لایه اولیه (پوست) است.

[۱] Heatmap

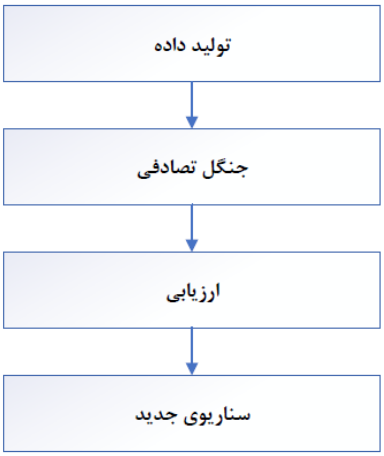
- با حرکت به سمت عمق بدن، رنگ‌ها تیره می‌شوند که نشان‌دهنده *میرایی امواج* و کاهش جذب انرژی در لایه‌های عمیق‌تر است.

- *فلش‌های آبی:* جهت انتشار امواج از منبع به سمت بدن را نشان می‌دهند.



شکل (۳) چگونگی جذب انرژی امواج در بافت‌های بدن (مانند پوست، چربی و عضله)

برای شبیه‌سازی پیش‌بینی نرخ جذب خاص (SAR) با استفاده از الگوریتم «جنگل تصادفی» ارائه شده است. این مدل فرض می‌کند که ما مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشگاهی یا شبیه‌سازی شده داریم که رابطه بین فرکانس، توان، فاصله و نوع بافت با مقدار SAR را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده، فرایند دارای چهار بخش است:

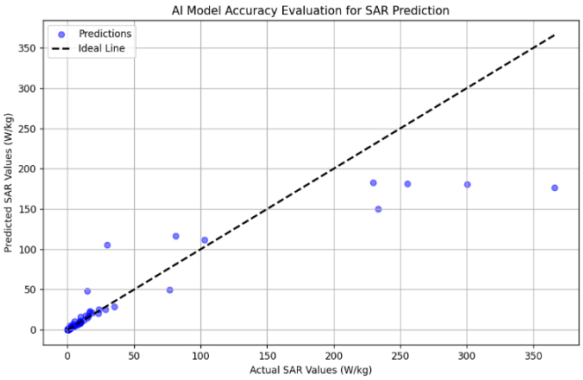


شکل (۴) چهار بخش روش پیشنهادی

- *تولید داده؛* از آنجا که دسترسی به داده‌های واقعی پزشکی محدود است، داده‌هایی براساس روابط فیزیکی تقریبی تولید شده است.
- *مدل جنگل تصادفی؛* این مدل یکی از الگوریتم‌های قدرتمند یادگیری ماشین است که برای پیش‌بینی مقادیر عددی (رگرسیون) بسیار مناسب عمل می‌کند و می‌تواند روابط غیرخطی بین پارامترها را به خوبی یاد بگیرد.
- *ارزیابی؛* با استفاده از معیارهای R2 وMSE ، دقت مدل سنجیده می‌شود.
- *سناریوی جدید؛* در انتهای کد، مدل قادر است برای یک شرایط خاص (مثلاً نحوه استفاده از گوشی موبایل) میزان خطر را محاسبه کند.

در کد پایتون، از RandomForestRegressor استفاده شده است. این نسخه خاص از الگوریتم برای مسائل رگرسیون (پیش‌بینی اعداد پیوسته مثل مقدار SAR) طراحی شده است. این مدل ۱۰۰ درخت تصمیم (**n_estimators=100**) را روی داده‌های مصنوعی آموزش داده و میانگین پیش‌بینی‌های آن‌ها را محاسبه می‌کند تا مقدار SAR را برای ورودی‌های جدید تخمین بزند. نتیجه شبیه‌سازی پیش‌بینی نرخ جذب خاص (SAR) با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی، مقادیر زیر و شکل (۵) خواهد بود:

- *مقدار میانگین مربعات خطا (MSE):* ۳۶۹/۳۱۵۲۴
- وضعیت: مقدار SAR در محدوده ایمن است.
  - *پارامترهای ورودی:* فرکانس ۱۸۰۰ مگاهرتز، توان ۵۰۰ میلی‌وات، فاصله ۲ سانتی‌متر
  - *مقدار SAR پیش‌بینی شده برای بدن:* ۶،۸۲۲۰ وات بر کیلوگرم
  - *هشدار:* مقدار SAR بالاتر از حد مجاز ایمنی است.



شکل (۵) شبیه‌سازی پیش‌بینی نرخ جذب خاص (SAR) با استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی

با توجه به این که بیشترین سطح ایمن SAR برابر با W/kg ۱/۶۰ است، مطابق جدول (۱) مشاهده می‌شود تغییر ورودی‌ها منتج به اعلام وضعیت‌های ایمن / هشدار خواهد شد.

جدول (۱) خروجی اعلام وضعیت ایمن/ هشدار منتج‌شده از تغییر ورودی‌ها

ردیف	پارامترهای ورودی			پارامترهای خروجی		
	فرکانس (MHz)	توان (mW)	فاصله (cm)	SAR پیش‌بینی‌شده (W/kg)	فاصله با بیشترین سطح ایمن SAR	اعلام وضعیت
۱	۲۵۰۰	۵۰۰۰	۲	۲۱/۷۲۱۶	۲۰/۱۲۱۶	هشدار (شدید)
۲	۲۵۰۰	۵۰۰۰	۵	۲/۳۹۷۰	۰/۷۹۷	هشدار
۳	۲۵۰۰	۵۰۰۰	۱۰	۰/۸۴۳۷	-۰/۷۵۶۳	ایمن
۴	۲۵۰۰	۵۰۰	۲	۶/۶۹۸۶	۵,۰۹۸۶	هشدار (مهم)
۵	۲۵۰۰	۵۰۰	۵	۰/۷۹۷۳	-۰/۸۰۲۷	ایمن
۶	۲۵۰۰	۵۰۰	۱۰	۰/۲۶۶۵	-۱/۳۳۳۵	ایمن
۷	۲۵۰۰	۵۰	۲	۱/۹۰۷۹	۰/۳۰۷۹	هشدار
۸	۲۵۰۰	۵۰	۵	۰/۱۵۵۲	-۱/۴۴۴۸	ایمن
۹	۲۵۰۰	۵۰	۱۰	۰/۰۷۲۹	-۱/۵۲۷۱	ایمن
۱۰	۱۸۰۰	۵۰۰۰	۲	۲۰/۳۰۰۰	۱۸,۷	هشدار (شدید)
۱۱	۱۸۰۰	۵۰۰۰	۵	۲/۳۹۰۷	۰/۷۹۰۷	هشدار
۱۲	۱۸۰۰	۵۰۰۰	۱۰	۰/۸۳۰۸	-۰/۷۶۹۲	ایمن
۱۳	۱۸۰۰	۵۰۰	۲	۶/۸۲۲۰	۵/۲۲۲	هشدار (مهم)
۱۴	۱۸۰۰	۵۰۰	۵	۰/۷۳۹۳	-۰/۸۶۰۷	ایمن
۱۵	۱۸۰۰	۵۰۰	۱۰	۰/۲۶۰۸	-۱/۳۳۹۲	ایمن
۱۶	۱۸۰۰	۵۰	۲	۲/۰۴۰۹	۰/۴۴۰۹	هشدار
۱۷	۱۸۰۰	۵۰	۵	۰/۱۴۹۳	-۱/۴۵۰۷	ایمن
۱۸	۱۸۰۰	۵۰	۱۰	۰/۰۸۳۱	-۱/۵۱۷۹	ایمن

همان‌طور که در جدول (۱) مشاهده می‌گردد، هرچه فاصله بیشتر و توان کمتر باشد، مقدار SAR در وضعیت بهتری قرار می‌گیرد. البته کاهش فرکانس هم هرچند کمتر از دو پارامتر ورودی قبلی، ولی تاثیرگذار خواهد بود.

در ادامه مقایسه روش «هوش مصنوعی» با روش‌های متداول «شبیه‌سازی عددی (FDTD)» و «اندازه‌گیری آزمایشگاهی» ارائه شده است. البته با توجه به نوع سخت‌افزار و پیچیدگی مسئله، این مقایسه می‌تواند تا حد کمی متغیر باشد. معیارهای مورد استفاده در مقایسه جدول (۲) عبارتند از:

- *زمان محاسبه*[۱]: مدت زمان لازم برای محاسبه یا پیش‌بینی مقدار SAR برای یک شرایط خاص (مثلاً یک موقعیت خاص گوشی نسبت به سر).
- *هزینه اجرا*[۲]: هزینه‌های جاری شامل برق، استهلاک تجهیزات، یا استفاده از ابررایانه‌ها برای هر بار تحلیل جدید.
- *دقت نتایج*[۳]: میزان نزدیکی خروجی به مقادیر واقعی فیزیکی یا استانداردهای مرجع.
- *قابلیت بهینه‌سازی*[۴]: توانایی روش در استفاده داخل حلقه‌های تکرار برای یافتن بهترین طراحی (مثلاً بهترین محل قرارگیری آنتن).
- *هزینه اولیه*[۵]: سرمایه‌گذاری مورد نیاز برای شروع کار (خرید نرم‌افزار، ساخت مدل‌های فیزیکی بدن، یا جمع‌آوری دیتاست).
- *انعطاف‌پذیر*[۱]: سهولت در تغییر پارامترهای مسئله (فرکانس، توان، زاویه تابش) بدون نیاز به تغییرات اساسی در ساختار کار.

[۱] Computation Time
[۲] Operational Cost
[۳] Accuracy
[۴] Optimization Capability
[۵] Initial Setup Cost

جدول (۲) مقایسه روش هوش مصنوعی با روش‌های FDTD و اندازه‌گیری آزمایشگاهی

معیار ارزیابی	شبیه‌سازی عددی (FDTD/FEM)	اندازه‌گیری آزمایشگاهی	هوش مصنوعی (Machine Learning)
زمان محاسبه (برای هر حالت)	بسیار بالا (چند دقیقه تا چند ساعت)	متوسط تا بالا (تنظیم تجهیزات)	بسیار پایین (کمتر از ۱ ثانیه)
هزینه اجرا (هر بار)	بالا (منابع محاسباتی)	بسیار بالا (مصرفی و تجهیزات)	بسیار پایین (پردازش ساده)
دقت نتایج	بسیار بالا (حل معادلات ماکسول)	بالا (داده‌های واقعی)	متوسط تا بالا (وابسته به آموزش)
قابلیت بهینه‌سازی	ضعیف (بسیار زمان‌بر)	ناممکن	بسیار بالا (مناسب برای طراحی)
هزینه اولیه (راه‌اندازی)	متوسط (نرم‌افزار و لایسنس)	بسیار بالا (خرید فانتوم و آنتن)	متوسط (جمع‌آوری داده و آموزش)
انعطاف‌پذیری در پارامترها	بالا (تغییر هندسه سخت است)	پایین (نیاز به تغییر فیزیکی)	بسیار بالا (تغییر ورودی‌ها آسان)

روش‌های عددی مانند FDTD دقت فیزیکی بسیار بالایی دارند اما به دلیل حجم محاسبات سنگین، زمان اجرای طولانی و نیاز به سخت‌افزارهای قدرتمند، برای ارزیابی‌های بلادرنگ[۲] نامناسب‌اند. اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی اگرچه استاندارد طلایی محسوب می‌شوند، اما پرهزینه، غیرقابل تکرار آسان و وابسته به تجهیزات حساس هستند. در مقابل، روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی پس از مرحله آموزش، با سرعتی فوق‌العاده بالا (نزدیک به آنی) پاسخ می‌دهند و هزینه محاسباتی بسیار پایینی دارند، هرچند که دقت آن‌ها وابسته به کیفیت و حجم داده‌های آموزشی است و ممکن است در شرایط ناشناخته دچار خطا شوند. این رویکرد نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از هوش مصنوعی برای جایگزینی شبیه‌سازی‌های سنگین و ایجاد ابزارهای سریع برای ارزیابی ایمنی امواج استفاده کرد.

۵- بحث و نتیجه‌گیری

اگرچه تکنولوژی‌های بی‌سیم مزایای بسیاری را برای بشر به همراه داشته‌اند، اما نادیده گرفتن اصول ایمنی در برابر امواج الکترومغناطیس می‌تواند پیامدهای سلامتی داشته باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که رعایت استانداردهای بین‌المللی و ملی، همراه با اجرای راهکارهای ساده ایمنی و پدافند غیرعامل مانند افزایش فاصله از منبع و کاهش زمان مواجهه، می‌تواند ریسک‌های احتمالی را به حداقل برساند. پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده بر روی اثرات بلندمدت و نسل‌های جدید ارتباطی (مانند 5G و 6G) متمرکز شوند. تلفیق هوش مصنوعی با مطالعات زیست‌الکترومغناطیس، افق‌های جدیدی را برای درک و مدیریت اثرات امواج بر بدن انسان گشوده است. این فناوری امکان ارزیابی سریع‌تر، دقیق‌تر و پویاتر را فراهم می‌کند و به متخصصان کمک می‌کند تا دستگاه‌هایی را طراحی کنند که ضمن حفظ کارایی، ایمنی زیستی را نیز رعایت کنند. تحقیقات آینده باید بر روی افزایش دقت داده‌های آموزشی و در نظر گرفتن پارامترهای پیچیده بیولوژیکی تمرکز کنند.

۶- منابع

[1] https://www.who.int/

[2] Persian: M. H. Khorasani Zadeh, S. Davaudi, A. Heydarzadeh, H. R. Amrollahi, S. Esfandiary, "An Investigation into the Effects of Electromagnetic Waves on Various Parts of the Human Body ", Journal of Elite Sciences and Engineering, Vol. 5, No. 1, 2020 .

[3] Robert F. Cleveland, David M. Sylvar, Jerry L. Ulcek, “Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields”, Federal Communications Commission (FCC), OET Bulletin 65 (Edition 97-01), 1997.

[4] Persian: M. A. Ebrahimi Ganjeh, A. R. Attari, " Calculation of Specific Absorption Rate (SAR) of Electromagnetic Waves in a Six-Layer Spherical Model of the Human Head at Two Frequencies of 900 MHz and 1800 MHz", 13th Iranian Conference on Biomedical Engineering, 2006.

[5] Persian: M. A. Torani Anarjan, H. Tokli, Zh. Pirzad Jahromi, H. Tokli, "Calculation of Specific Absorption Rate (SAR) of Electromagnetic Wave Energy in the vicinity of a human head phantom at different distances using CST simulator software," Quarterly Journal of Paramedical Sciences and Military Health, Vol. 14, No. 3, 2019.

[۱] Flexibility

[۲] Real-time

[6] Azeez Abdullah Barzinjy, Najim Hama-Amin, Ari Othman, “Mathematical Modeling of the Impact of Cell Phone Radiation on the Human Brain”, Eurasian Journal of Science & Engineering (EAJSE), 2018.

[7] E.F. Meliadò, A.J.E Raaijmakers, A. Sbrizzi, B.R. Steensma, M. Maspero, M.H.F. Savenije, P.R. Luijten, C.A.T. van den Berg, “A deep learning method for image-based subject-specific local SAR assessment”, Magnetic Resonance in Medicine, 2019.

[8] Abubakar Salisu, Mahmud Abd Elwanis, Issa Elfergani, Umar Musa, AbdulgaforAlfares, Ibrahim Gharbia, Jonathan Rodriguez, Chan H. See, RaedAbd-alhameed, “Machine learning-optimized compact wearable frequency reconfigurable antenna for sub6GHz/mm-wave 5G integration”, Springer Nature - nature portfolio - Scientific Reports, 2025.

Journal of Research in safety, health and environment/ 2026/ Vol.3/ No.4/ 1-13

Journal of Research in safety, health and environment

Assessment of the electromagnetic waves effects on the SAR of human body based on the random forest machine learning algorithm

Reza Esfahani[1],

[1] Assistant Professor, Communications Department, Faculty and Research Institute of Communications and Networking, University of IHU, City Tehran, Country Iran

ARTICLE INFO

Article history:
Article Type: Research paper
Received: 29 march 2024
Received in revised form: 7 December 2024
Accepted: 12 December 2024
Available online: 16 December 2024

*Correspondence:
resfahani@ihu.ac.ir

Keywords:
Electromagnetic Waves
Machine Learning
Random Forest Algorithm
Human Body Safety
SAR

ABSTRACT

With the rapid proliferation of communication technologies and the pervasive presence of electromagnetic fields (EMF) in the living environment, concerns regarding environmental impacts and human health have been raised. Furthermore, the expanding adoption of wireless technologies and the Internet of Things (IoT) has significantly increased human exposure to elevated levels of electromagnetic radiation. The precise assessment of the environmental effects of these waves and their impact on living tissues constitutes a primary challenge in environmental health and biomedical engineering. This research investigates the biophysical mechanisms through which electromagnetic waves interact with human tissues and reviews current safety standards. The primary objective is to propose practical strategies for minimizing exposure and protecting the human body against non-ionizing radiation. Findings indicate that adherence to established safety protocols, implementation of passive protective measures, increasing physical distance from radiation sources, and the use of shielding equipment can effectively reduce the risk of both thermal and non-thermal biological damage. Conventional approaches for measurement and numerical simulation—such as the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method—are often time-consuming and resource-intensive. After the training phase, AI-based methods respond with exceptionally high speed and incur very low computational costs; however, their accuracy depends on the quality and volume of training data, and they may exhibit errors under unknown conditions. This paper explores the application of Artificial Intelligence (AI) and Machine Learning (ML) as powerful tools for predicting the Specific Absorption Rate (SAR) and evaluating risks associated with electromagnetic waves. The proposed methodology, implemented in Python, consists of two sequential stages aimed at enhancing the understanding of electromagnetic wave–tissue interactions. First, a SAR-based model is introduced to characterize the penetration of electromagnetic waves into biological tissues. Second, a predictive SAR simulation framework utilizing the Random Forest algorithm is presented, offering an efficient alternative to traditional simulation techniques for risk assessment and exposure management. The results indicate that SAR values improve as the distance between the emission source and the human body increases and as the transmitted power decreases. Although less significant than distance and power, frequency reduction also exerts a considerable influence.