

علمی- پژوهشی

ارائه روش محاسباتی هوشمند در تخمین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی فرکانس قدرت خطوط شبکه توزیع با استفاده از شبکه عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی نرمالیزه شده

معصومه خودسوز^{۱*}، سید میثم سیدبزرگر^۲

۱- استادیار، دانشگاه علم و فناوری مازندران، ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت: ۹۹/۰۱/۲۲، پذیرش: ۹۹/۰۳/۰۶)

چکیده

در سال‌های اخیر، رشد جمعیت در منطقه شهری و افزایش تقاضای انرژی الکتریکی، منجر به گسترش شبکه برق‌رسانی، بارگذاری بیشتر در خطوط انتقال انرژی الکتریکی و کاهش حریم خطوط شده است. به واسطه چنین شرایطی، احتمال قرار گرفتن در معرض میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در محیط‌های مسکونی و کاری افزایش یافته است. از آنجایی که قرار گرفتن در معرض میدان‌های الکترومغناطیسی در فرکانس قدرت بر سلامت انسان تأثیرگذار می‌باشد، این عامل به‌عنوان چالشی جدی مطرح شده است. به‌منظور آگاهی از چگونگی انتشار میدان‌های الکترومغناطیسی، مدل‌سازی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی با استفاده از روش هوش مصنوعی به‌عنوان روشی دقیق و سریع مورد توجه و بررسی قرار گرفته است. در این مقاله از شبکه عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی نرمالیزه شده به‌منظور تخمین میدان‌های الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی استفاده شده است. داده‌های مورد نیاز به‌منظور آموزش و اعتبارسنجی مدل ارائه شده، با استفاده از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود پنج آرایش متفاوت از خطوط شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت توسط نرم‌افزار COMSOL استخراج شده است. بر اساس شبیه‌سازی انجام شده، مقادیر میدان‌های الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی در مختصات‌های طولی و عرضی مختلفی از فضای اطراف خطوط اندازه‌گیری شده است. مقایسه نتایج تخمین زده شده و اندازه‌گیری شده نشان داده است که مدل ارائه شده دارای دقت بسیار خوبی در تعیین میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی در نقاط مختلف اطراف خطوط در ساختارهای مختلف شبکه توزیع است.

کلیدواژه‌ها: خطوط شبکه توزیع، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، تخمین داده‌ها، شبکه عصبی، روش اجزاء محدود

۱. مقدمه^۱

مضر میدان‌های الکترومغناطیسی فرکانس قدرت بر سلامت انسان، به طرز چشمگیری افزایش یافته است [۳]. از اثرات مخرب ناخواسته دیگری که به‌واسطه مواجهه با میدان‌های الکترومغناطیسی ایجاد شده است می‌توان به افزایش احتمال خطر سقط جنین، بیماری‌های عصبی، افسردگی و بیماری آلزایمر [۴] اشاره کرد.

تحقیقات نشان داده است، افرادی که در مجاورت ۵۰ متری از خط انتقال زندگی می‌کنند نسبت به افرادی که در مسافت ۵۰ تا ۱۰۰ متر زندگی می‌کنند، تا ۳۳٪ بیشتر خطر ابتلا به سرطان در آنها وجود دارد [۵]. با توجه به اجتناب‌ناپذیر بودن استفاده از خطوط در انتقال انرژی الکتریکی، سازمان‌های بهداشت محیط زیست معیارهایی را برای سطح آلودگی الکترومغناطیسی بر اساس میزان حضور افراد در مکان‌های مختلف در نظر گرفته‌اند. اکثر سازمان‌ها مقدار چگالی شار مغناطیسی $0.4 \mu T$ و برخی از آنها $0.2 \mu T$ را برای مواجهه طولانی مدت به‌عنوان سطح بحرانی در بیماری سرطان خون مطرح نموده‌اند [۶-۷].

یکی از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در انتقال انرژی الکتریکی که مورد توجه پژوهشگران بوده است، مطالعه بر روی اثرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ناشی از خطوط هوایی در سطح زمین می‌باشد. از آنجایی که قرار گرفتن در معرض چنین میدان‌هایی، اثرات نامطلوبی بر بهداشت سلامتی موجودات زنده باقی می‌گذارد، انتقال انرژی الکتریکی در فرکانس قدرت نگرانی بسیاری از محققان و مؤسسات پژوهشی را به همراه داشته است [۱-۲]. مطالعات اخیر نشان داده است که خطر ابتلا به سرطان خون برای کودکان و همچنین خطر ابتلا به سرطان در بزرگسالان به علت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی ناشی از خطوط انتقال انرژی الکتریکی در حال افزایش است. در مناطق مسکونی، سرطان‌های کودکان و در محیط کاری، سرطان‌های وابسته به مشاغل مانند سرطان پستان، مغز و خون به دلیل اثرات

^۱ نویسنده پاسخگو: m.khodsouz@mazust.ac.ir

توانایی یادگیری مؤثر، مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای آموزش NRBF از روش نزول گرادینان استفاده شده است. آنچه در این مقاله از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، فراهم‌سازی داده‌های مورد نیاز در آموزش شبکه عصبی می‌باشد. داده‌های ورودی برای آموزش شبکه عصبی از طریق شبیه‌سازی شبکه ۲۰ کیلوولت توسط نرم‌افزار مبتنی بر اجزاء محدود COMSOL به دست آمده است. بر این اساس، آرایش‌های مختلفی از خطوط شبکه توزیع شبیه‌سازی و مقادیر میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی در مختصات‌های مختلفی از فضای اطراف خط استخراج شده است.

۲. آرایش خطوط در شبکه توزیع

با توجه به تعدد بسیار زیاد خطوط هوایی در شبکه توزیع و انواع شرایط بارگذاری کشور، مواردی همچون رعایت فاصله مجاز بین هادی‌ها، رعایت فاصله افقی سیم از پایه، سادگی در بهره‌برداری و تعمیرات، رعایت حریم خطوط و ایجاد تقارن در نیروی وارده به پایه موجب تنوع در آرایش خطوط شبکه توزیع شده است. در بحث آرایش خطوط در شبکه توزیع لازم است تا چگونگی نگهداری سیم‌های هوایی نسبت به یکدیگر مورد توجه قرار گیرد. چگونگی نگهداری هادی‌ها نسبت به هم به سه گروه آرایش هادی‌ها به صورت مثلثی، افقی و عمودی تقسیم می‌شود. بر اساس نوع کراس‌ارم و کنسول‌های قابل نصب بر روی پایه‌های شبکه توزیع، آرایش‌های متنوعی از خطوط قابل اجرا است. بر اساس موارد فوق‌الذکر، در این مقاله پنج آرایش خطوط شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت مطابق با آنچه در شکل (۱) نشان داده است، مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفته است [۲۳]. در تمام این طرح‌ها بیشینه جریان عبوری از هادی‌های فاز ۲۰۰ آمپر مطابق با ظرفیت خطوط در نظر گرفته شده است. در تمام طرح‌های مورد بررسی، فاصله متوسط فازها از سطح زمین ۱۰ m در نظر گرفته شده است. فواصل فازها از یکدیگر بسته به نوع آرایش در نظر گرفته شده در شکل نشان داده شده است.

۳. شبیه‌سازی اجزاء محدود

روش اجزای محدود، به‌عنوان یک روش حل عددی مطرح می‌باشد. با استفاده از روش اجزاء محدود، می‌توان مسائلی که به‌وسیله معادلات دیفرانسیل با مشتقات جزئی و شرایط مرزی معین تقریب زده می‌شوند را برای اشکال گوناگون با مرزهای نامنظم و ابعاد مختلف تحلیل کرد. معادلات به‌کاررفته در روش اجزاء محدود جهت تحلیل الکترومغناطیسی مسئله به‌صورت رابطه (۱) نوشته می‌شود:

با توجه به اهمیت بسیار زیادی که این موضوع در جوامع علمی دارد، اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی همواره به‌عنوان یک معضل مهم، سد راه محققان در این زمینه بوده است. عدم دسترسی مناسب به خطوط با توجه به شرایط زمانی و مکانی، نیاز به تجهیزات گران‌قیمت جهت اندازه‌گیری، دقت اندازه‌گیری، قابلیت تحلیل اطلاعات و نبود نیروی خبره را می‌توان از مشکلات اساسی پیرامون این کار دانست [۸]. استفاده از مدل‌سازی به‌عنوان راه‌کاری مناسب این قابلیت را در اختیار کاربر قرار می‌دهد تا بتواند با دقت قابل قبولی به بررسی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بپردازد.

به‌منظور انجام مدل‌سازی، روش تحلیلی و عددی برای محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی در محور خطوط انتقال انرژی الکتریکی پیشنهاد شده است [۹-۱۲]. از دیگر روش‌های مورد استفاده در مدل‌سازی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، رویکرد تخمین آنها است. در این راستا استفاده از روش‌های هوش مصنوعی مانند منطق فازی، شبکه‌های عصبی و برنامه‌نویسی ژنتیک به‌کار گرفته شده است [۱۳]. این روش‌ها در سال‌های اخیر برای رفع مشکلات سیستم‌های قدرت مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله کاربردهای شبکه عصبی مصنوعی^۱، مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده غیرخطی است. MLP^۲ که توسط الگوریتم انتشار پس‌خور آموزش داده می‌شود، یکی از شبکه‌های عصبی مصنوعی است که در مشکلات مهندسی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است [۱۴]. شبکه عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی^۳ RBF قابلیت تقریب همه‌منظوره را به‌عنوان پرسپترون چندلایه دارا است [۱۵-۱۶]. در سال‌های اخیر از روش‌های شبکه عصبی به‌منظور پیش‌بینی میدان‌های الکترومغناطیسی در خطوط انتقال انرژی استفاده شده است [۱۷-۲۲].

در این مقاله به بررسی چگونگی تخمین داده‌های میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی برای انواع آرایش خطوط در شبکه توزیع پرداخته شده است. به‌طور کلی هدف از انجام این تحقیق، ایجاد یک مدل با قابلیت تخمین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی شبکه توزیع برای پژوهشگرانی است که به بررسی اثرات بیولوژیکی این میدان‌ها بر روی انسان‌ها می‌پردازند. در این مقاله مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی مبتنی بر توابع پایه شعاعی نرمالیزه شده NRBF^۴ برای تخمین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در اطراف خطوط انتقال نیرو در شبکه توزیع، ارائه شده است. شبکه‌های NRBF به دلیل ساختار ساده اما سازگار و

^۱ artificial neural network

^۲ multilayer perceptron

^۳ radial basis function

^۴ normalized radial basis function

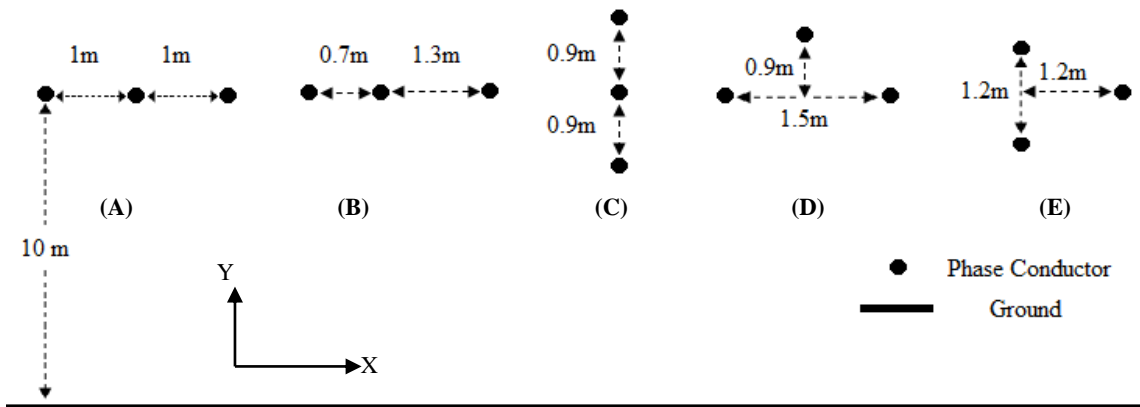
الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی است، به صورت لینک با یکدیگر در نرم افزار COMSOL اجرا شده است. شرایط اولیه و مرزی پارامترهای مختلف در محیط‌های شبیه سازی در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای به کاررفته در محیط شبیه سازی

ماده	AL	Air
Relative Permittivity (ϵ)	1	1
Relative Conductivity (σ)	3.744e7[S/m]	0[S/m]
Relative Permeability (μ)	1	1
شرایط اولیه	Electric	Electric Potential
شرایط مرزی	Magnetic	Surface Current
		Continuity
		Continuity

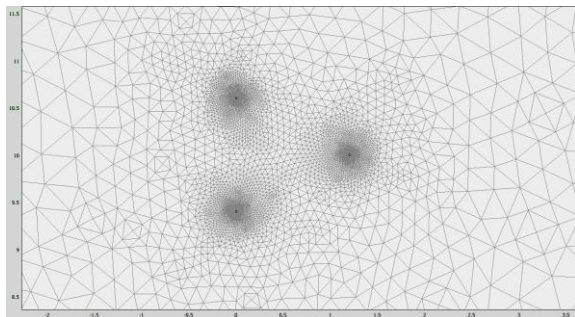
$$\begin{aligned} \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H &= J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \cdot D &= \rho \end{aligned} \quad (1)$$

در این معادله E میدان الکتریکی، J چگالی جریان الکتریکی، B چگالی شار مغناطیسی، ρ چگالی بار الکتریکی و D و H میدان‌های ایجادشده توسط چگالی قطبش الکتریکی و مغناطیسی هستند [۲۴]. در این مقاله تجزیه و تحلیل عددی با استفاده از نرم افزار COMSOL به صورت دویبعی و متغیر با زمان انجام شده است. از آنجایی تحلیل الکترومغناطیسی مورد نیاز می باشد، می بایست پارامترهای لازم جهت تحلیل هر کدام از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در نرم افزار بارگذاری گردد. بر این اساس دو محیط که یکی از آنها وابسته به تحلیل الکترواستاتیک با محوریت پارامتر ضریب گذردهی و دیگری وابسته به تحلیل الکترومغناطیس با محوریت قابلیت هدایت



شکل (۱): آرایش خطوط مورد بررسی در شبکه توزیع

این شکل دیده می شود، ناحیه اطراف هادی‌ها با توجه به حساسیت و دقت محاسبات در آن دارای مش بندی ریز و فشرده می باشد. این در حالی است که با توجه به حجم زیاد فضای شبیه سازی شده و بالا بودن سطح محاسبات، ابعاد مش در نواحی دورتر از هادی‌ها به صورت هدفمند بزرگ تر شده است.



شکل (۲): محیط مش بندی شده آرایش خط D در نرم افزار COMSOL

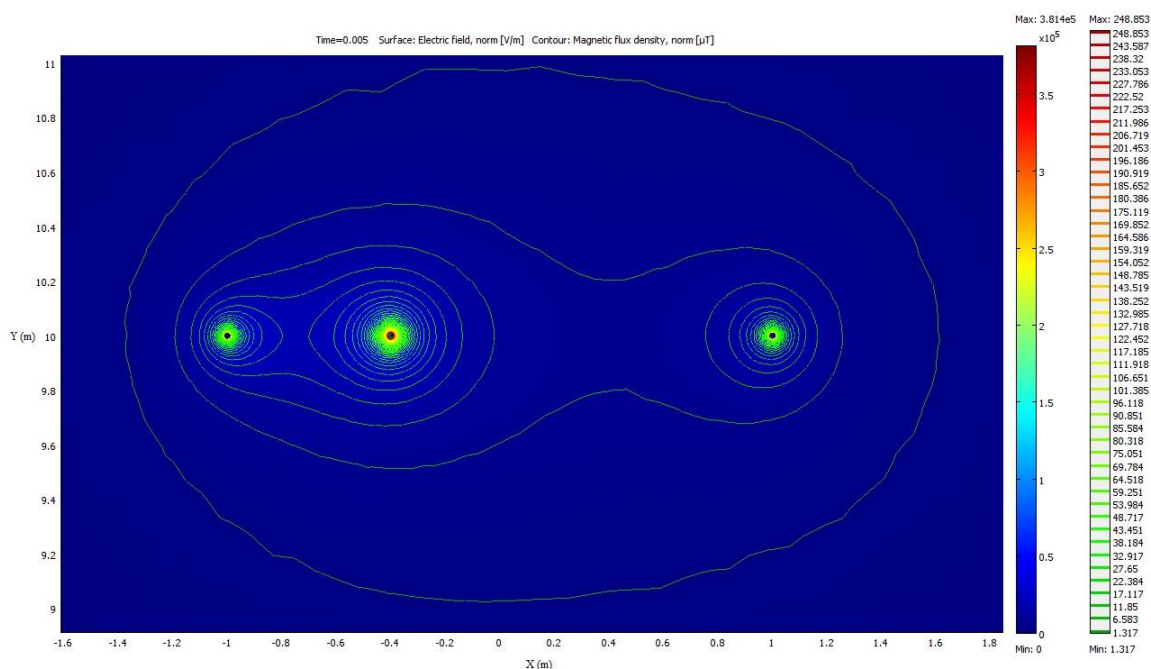
تمامی آرایش‌های خطوط ارائه شده در شکل (۱)، شبیه سازی و نقاط مختلف فضا با مختصات معین برای اندازه گیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تعیین شده اند. ولتاژ و جریان اعمال شده به هادی فاز در نرم افزار مطابق رابطه (۲) به صورت سه فاز متعادل و متقارن در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} i_a &= I \sin(\omega t) \\ i_b &= I \sin(\omega t - 120) \quad I = 200 \text{ [A]} \\ i_c &= I \sin(\omega t + 120) \\ v_a &= V \sin(\omega t) \\ v_b &= V \sin(\omega t - 120) \quad V = 16330 \text{ [V]} \\ v_c &= V \sin(\omega t + 120) \end{aligned} \quad (2)$$

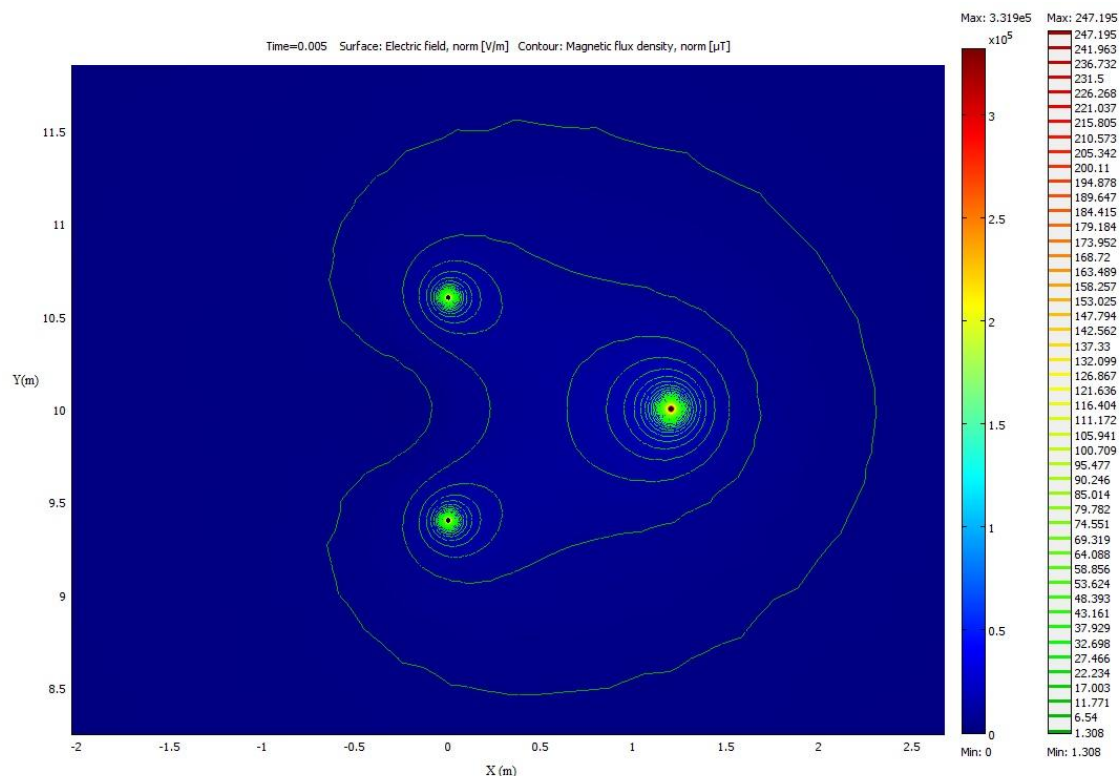
محیط مش بندی شده شبیه سازی آرایش خط D در نرم افزار COMSOL در شکل (۲) نشان داده شده است. همان طور که در

اختلاف ۱۲۰ درجه‌ای دارای دامنه‌ای کمتر می‌باشند. بسته به نوع آرایش خطوط، توزیع میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی در بخش پایینی و کناری خطوط دارای تغییرات زیادی می‌باشد که از این رو، لازم است تا حریم مورد نیاز برای عدم قرار گرفتن در معرض تشعشعات میدانی رعایت گردد.

شکل (۳) و (۴) توزیع میدان‌های الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی منتهی از سه فاز را در اطراف خطوط شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار COMSOL برای آرایش نوع (B) و (E) نشان می‌دهند. نتایج حاصل به‌گونه‌ای نمایش داده شده است که فاز وسط در شکل (۳) و فاز سمت راست در شکل (۴) در زمان 0.005s در بیشینه دامنه خود قرار گرفته‌اند و دو فاز دیگر با



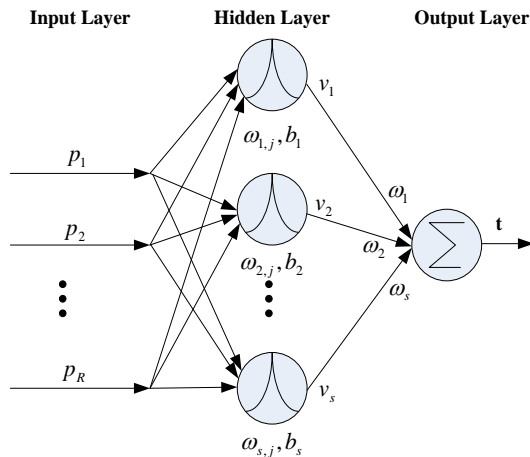
شکل (۳): تغییرات میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی برای آرایش نوع B.



شکل (۴): تغییرات میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی برای آرایش نوع E.

۴. مدل سازی شبکه عصبی

نورون‌های پنهان و یک خروجی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): مدلی ساده از شبکه NRBF.

رایج ترین راهبردهای یادگیری موجود برای هر دو شبکه عصبی RBF و NRBF را می توان به شرح زیر طبقه بندی کرد:

الف- راهبردهای انتخاب مراکز (NRBF) به طور تصادفی از داده‌های آموزش.

ب- راهبردهای استفاده از روش های بدون نظارت برای انتخاب مراکز (NRBF) RBF.

پ- راهبردهای استفاده از روش های نظارت شده برای انتخاب مراکز (NRBF) RBF.

در این مقاله از روش نزول گرادیان به عنوان یکی از ساده ترین الگوریتم آموزش نظارت شده استفاده شده است. در آموزش به روش نزول گرادیان، پارامترها در هر مرحله از زمان با حرکت دادن آنها در جهت مخالف گرادیان تابع هدف تنظیم می شوند. روش نزول گرادیان یک الگوریتم بهینه سازی است که با انجام اقدامات متناسب با شیب (یا شیب تقریبی) تابع در نقطه فعلی به یک حداکثر محلی از عملکرد نزدیک می شود. روش یادگیری به مجموعه ای از داده ها برای آموزش نیاز دارد $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_N\}$. هر عنصر از مجموعه $q_k = (p_k, t_{dk})$ توسط بردار ورودی $p_k = \{p_{1k}, p_{2k}, \dots, p_{Rk}\}$ و پاسخی مطلوب از t_{dk} تعریف شده است. به طور کلی الگوریتم یادگیری، تابع هدف ارائه شده در رابطه (۶) را به حداقل می رساند.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (t_{dk} - t_k)^2 \quad (6)$$

در این رابطه، هنگامی که بردار ورودی p_k است، t_k به عنوان خروجی شبکه به دست خواهد آمد. الگوریتم نزول گرادیان برای به دست آوردن حالت بازگشتی در راستای به روزرسانی پارامترهای

در این بخش خصوصیات اساسی معماری شبکه عصبی RBF و روش آموزش آن بیان شده است. ساختار شبکه RBF در مراجع [۲۵] ارائه شده است. شبکه RBF از یک لایه پنهان تشکیل شده و توابع گاوسی، توابع پایه آن را تشکیل می دهند.

انتخاب تعداد لایه های پنهان نقش مهمی در ساخت مدل دارد. در تعیین لایه پنهان لازم است ذکر شود که هنوز هیچ قانون مشخصی برای تعیین تعداد بهینه سلول های عصبی پنهان ایجاد نشده است. معمولاً تعداد لایه های پنهان از طریق تجربی و سعی خطا مشخص می شود. با توجه به بررسی و تجربه نویسندگان، تعداد بهینه سلول های عصبی پنهان در این مقاله ۱۹ در نظر گرفته شده است. با توجه به تعداد سلول های لایه پنهان، ورودی های p_1, p_2, \dots, p_R به تمام سلول های عصبی موجود در لایه پنهان اعمال می گردد. خروجی v_i هر واحد لایه پنهان i توسط رابطه (۳) محاسبه می شود:

$$v_i = e^{-n_i} \quad i = 1, 2, \dots, s \quad (3)$$

$$n_i = \sum_{j=1}^R \frac{(p_j - \omega_{ij})^2}{2b_i^2}$$

$\omega_{i,j}$ و b_i به ترتیب مرکز و شعاع توابع گاوس برای نورون پنهان i هستند. مقدار خروجی را می توان به صورت رابطه (۴) محاسبه کرد:

$$t = \sum_{i=1}^s v_i \omega_i \quad (4)$$

که در آن، ω_i وزنی از نورون لایه پنهان i تا نورون خروجی است. از جنبه های شبکه عصبی RBF می توان به NRBF اشاره نمود. در شبکه های NRBF، نقش های سنتی وزن و فعالیت هایی که در لایه پنهان RBF انجام می شد، تغییر یافته است. گره های پنهان تابعی شبیه به Voronoi Tolleration از فضای ورودی را اجرا می کنند و وزن های خروجی به عنوان یک خروجی شبکه از طریق پارتیشن تعریف شده توسط گره های پنهان تبدیل می شوند. در نتیجه، شبکه های NRBF خصوصیات متمرکز شبکه های استاندارد RBF را از دست می دهند و از ویژگی های عمومی سازی عالی برخوردار هستند [۲۶]. ساختار NRBF در رابطه (۵) بیان شده است.

$$t = \frac{\sum_{i=1}^s v_i \omega_i}{\sum_{i=1}^s v_i} \quad (5)$$

همچنین ساختار معمول شبکه NRBF با ورودی های p

نیز به عنوان خروجی مورد استفاده قرار گرفته است. در نتیجه انجام مدل سازی، شبکه عصبی به دست آمده برای هر یک از میدان های الکتریکی و مغناطیسی دارای ۵ لایه ورودی سه بعدی و یک لایه خروجی یک بعدی می باشد.

۵. جمع آوری داده های میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی

به منظور جمع آوری داده های مورد نیاز در آموزش شبکه عصبی، نتایج حاصل از شبیه سازی به کار گرفته شده است. بر این اساس مقادیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی برای تمامی آرایش های خطوط در مختصات هابی به صورت رابطه (۱۴) استخراج شده است.

$$\begin{cases}
 Y = 0 \\
 Y = 0.5 \text{ m} \\
 Y = 1 \text{ m} \\
 Y = 1.5 \text{ m} \\
 Y = 2 \text{ m}
 \end{cases}
 \quad , \quad
 \begin{cases}
 X = 2 \text{ m} \\
 X = 3 \text{ m} \\
 X = 4 \text{ m} \\
 X = 5 \text{ m} \\
 X = 6 \text{ m}
 \end{cases}
 \quad (14)$$

بر اساس مختصات داده شده، در امتداد سطح زمین و در ارتفاع های مختلف، مقادیر دامنه میدان های الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی، منتجه از اثر هر سه فاز، اندازه گیری شده است. در هر یک از ارتفاع های تعیین شده، اندازه گیری مقادیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی با فاصله ۵۰ سانتی متری در راستای محور X انجام شده است که در نتیجه آن هر شکل موج دارای ۴۱ نمونه خواهد بود. با در نظر گرفتن پنج مکان مختلف برای Y، برای هریک از آرایش خطوط، ۲۰۵ نمونه برای میدان های الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی به دست خواهد آمد. به منظور آموزش شبکه عصبی، ۷۰ درصد از داده های استخراج شده مورد استفاده قرار گرفته است. در این حالت به طور کلی در آموزش شبکه عصبی NRBF برای مدل سازی میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی، در مجموع ۱۴۳۵ نمونه مورد استفاده قرار گرفته است. در حالت عمود بر سطح زمین، اندازه گیری ها مشابه با حالت قبل تکرار شده است. بر این اساس نمونه برداری بر روی محور Y با فاصله ۵۰ سانتی متری صورت گرفته است. ۲۰۵ نمونه در راستای محور Y برای هر یک از موقعیت ها استخراج خواهد شد. با در نظر گرفتن ۷۰ درصد از نمونه های هر موج مطابق آرایش های خطوط شبکه توزیع، ۱۴۳۵ نمونه در مدل سازی میدان های الکتریکی و مغناطیسی استخراج و مورد استفاده قرار

از ω_i و b_i و $\omega_{i,j}$ به گونه ای که E در رابطه (۶) به حداقل برسد از جفت داده های آموزش $q_k = (p_k, t_{dk})$ استفاده می نماید. مجموعه روابط پایه در محاسبات NRBF در روابط (۷) تا (۱۳) ارائه شده است.

$$\omega_{i,j}(l+1) = \omega_{i,j}(l) - \eta_\omega \frac{\partial E}{\partial \omega_{i,j}} \quad (7)$$

$$\omega_{i,j}(l+1) = \omega_{i,j}(l) - \eta_\omega \sum_{k=1}^N \frac{(t_{dk} - t_k) P_{jk} - \omega_{i,j}}{b_i^2} v_{ik} (\omega_i - t_k) \quad (8)$$

$$b_i(l+1) = b_i(l) - \eta_b \frac{\partial E}{\partial b_i} \quad (9)$$

$$b(l+1) = b_i(l) - \eta_b \frac{(t_{dk} - t_k)}{\sum_{i=1}^s v_{ik}} \sum_{j=1}^R \frac{(p_{jk} - \omega_{i,j})^2}{b_i^3} (\omega_i - t_k) \quad (10)$$

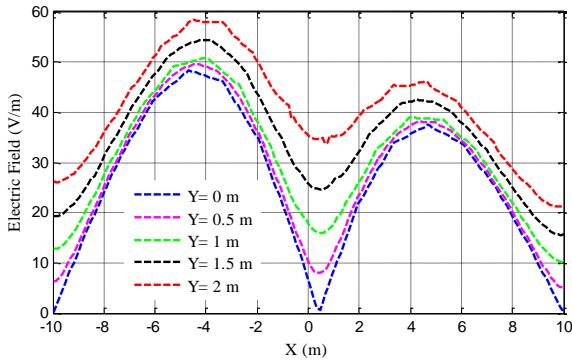
$$\omega_i(l+1) = \omega_i(l) - \eta_\omega \frac{\partial E}{\partial \omega_i} \quad (11)$$

$$\omega_i(l+1) = \omega_i(l) - \eta_\gamma \frac{(t_{dk} - t_k)}{\sum_{i=1}^s v_{ik}} v_{ik} \quad (12)$$

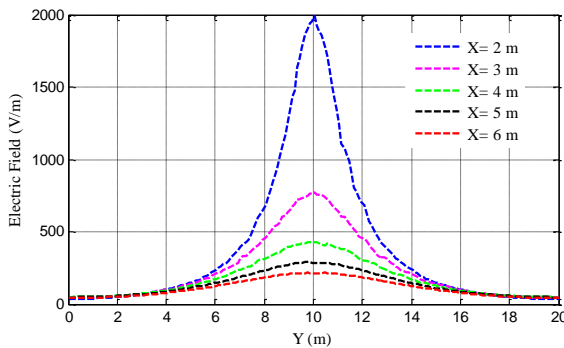
$$v_{ik} = e^{-\sum_{j=1}^R \frac{(p_{jk} - \omega_{i,j})^2}{2b_i^2}} \quad (13)$$

در این روابط، η_ω ، η_b و η_γ به ترتیب نرخ به روزرسانی پارامترهای ω_i و b_i و $\omega_{i,j}$ هستند. با توجه به روابط ارائه شده، الگوریتم نزول گرادیان بر اساس روابط (۹)، (۱۱) و (۱۳) برای آموزش شبکه NRBF قابل پیاده سازی است.

در این مقاله از شبکه NRBF برای تخمین میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی استفاده شده است. از این رو لازم است تا شبکه NRBF بر اساس داده های حقیقی مدل سازی گردد. به منظور مدل سازی شبکه عصبی لازم است تا لایه های ورودی و خروجی به طور کامل مشخص گردند تا با توجه به آنها داده های مورد نیاز استخراج شوند. در این مقاله، مختصات در راستای محورهای X و Y و همچنین آرایش خط به عنوان ورودی شبکه NRBF به کار برده شده است. بر این اساس، ورودی های شبکه عصبی به صورت (x,y,z) در نظر گرفته خواهد شد که x مختصات به موازات سطح زمین، y مختصات عمود بر سطح زمین و z کلاس طراحی است که در این مقاله برای آرایش A تا E از شماره ۱ تا ۵ تغییر خواهد یافت. با توجه به مختصات داده شده در فضای دوبعدی، دامنه میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی



شکل (۸): تغییرات میدان الکتریکی برای آرایش نوع A در راستای محور X (عمود بر سطح زمین).



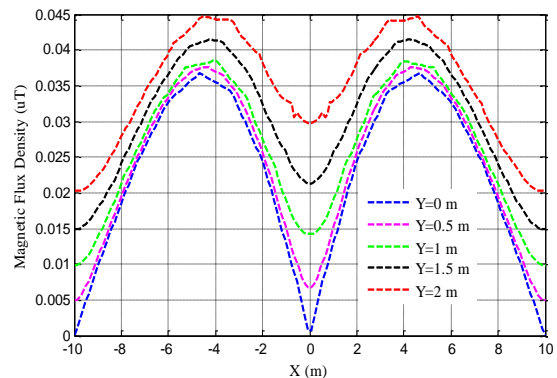
شکل (۹): تغییرات میدان الکتریکی برای آرایش نوع A در راستای محور Y (عمود بر سطح زمین).

۶. شبیه‌سازی و نتایج

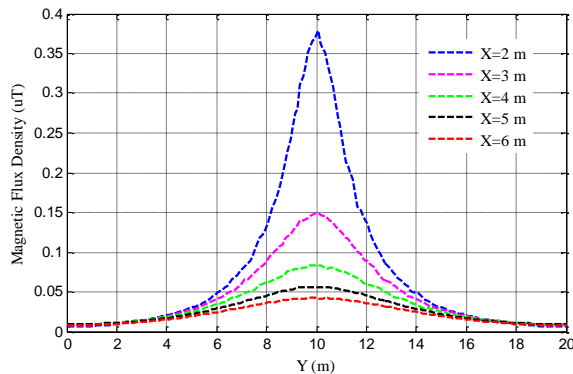
به‌منظور راستی‌آزمایی شبکه عصبی مدل‌سازی شده، نتایج حاصل از تخمین میدان‌های الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی به‌دست‌آمده از NRBF، در مقایسه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده با نرم‌افزار COMSOL در این بخش ارائه شده است. شکل (۱۰) تغییرات چگالی شار مغناطیسی برای دو حالت اندازه‌گیری شده و تخمین زده‌شده در امتداد سطح زمین و عمود بر آن را نشان می‌دهند. در شکل (۱۰-الف)، مقادیر چگالی شار مغناطیسی در فاصله دو متری از سطح زمین برای تمامی آرایش‌های خطوط شبکه توزیع اندازه‌گیری و با مقادیر به‌دست‌آمده از مدل‌سازی مقایسه شده است. به‌منظور اعتبار سنجی مدل حاصل از NRBF، ۳۰ درصد از داده‌ها که در مرحله آموزش استفاده نشده‌اند، برای انجام آزمایش شبکه عصبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شکل (۱۰-ب) مقادیر اندازه‌گیری شده و تخمین زده‌شده برای چگالی شار مغناطیسی را در امتداد خطی عمود بر سطح زمین و در فاصله ۳ متری از مرکز هادی‌ها برای تمامی آرایش خطوط شبکه توزیع نشان می‌دهد. مطابق با نتایج ارائه‌شده دیده شده است که مدل به‌دست‌آمده از NRBF به‌خوبی

گرفته است. بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده، از مجموع ۴۱۰۰ داده استخراج‌شده از میدان‌های الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی، ۲۸۷۰ داده جهت آموزش و ۱۲۳۰ داده برای آزمایش شبکه مدل‌سازی شده در نظر گرفته شده است.

در شکل‌های (۶) تا (۹) تغییرات میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی را در آرایش خط نوع (A)، که هادی وسط آن در مختصات $X=0$ و $Y=10$ قرار دارد، به ازای ارتفاع‌های مختلف نمایش می‌دهد. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده دیده شده است که، اگرچه مقادیر میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی در راستای محور X (امتداد سطح زمین) و در ارتفاع‌های مختلف در رنج مقادیر استاندارد و یا نزدیک به آنها قرار دارند، اما در راستای محور Y (شرایط عمود بر سطح زمین) و در فواصل مختلف، چگالی شار مغناطیسی مقادیری بسیار بزرگ‌تر را به‌دست آورده که این امر می‌تواند منجر به خطرات زیست‌محیطی عظیمی گردد. خطوط شبکه توزیع که از مجاورت مجتمع‌های مسکونی عبور می‌نمایند نمونه بارزی از امکان پرخطر نسبت به تشعشعات میدانی محسوب می‌شوند.



شکل (۶): تغییرات چگالی شار مغناطیسی برای آرایش نوع A در راستای محور X (امتداد سطح زمین).

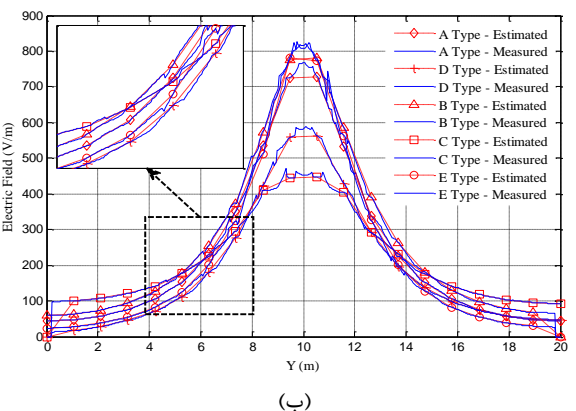
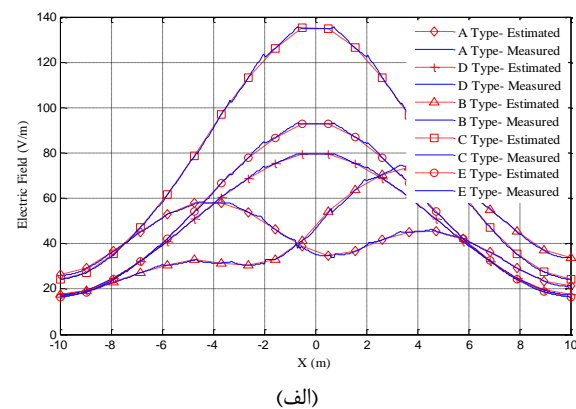


شکل (۷): تغییرات چگالی شار مغناطیسی برای آرایش نوع A در راستای محور Y (عمود بر سطح زمین).

اندازه‌گیری شده و مقادیر تخمین زده شده مطابق با رابطه (۱۵) استفاده شده است. در این رابطه مقدار به دست آمده از شبیه‌سازی انجام شده توسط نرم‌افزار مبتنی اجزای محدود COMSOL برای چگالی شار مغناطیسی (μT) و میدان الکتریکی (V/m) و $A_{Estimated}$ مقدار به دست آمده از مدل شبکه عصبی NRBF برای دو متغیر می‌باشد.

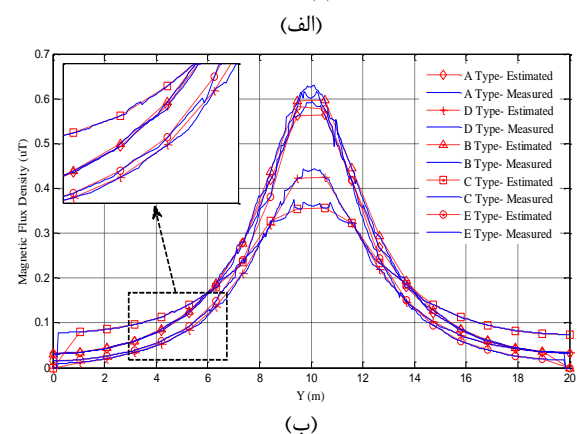
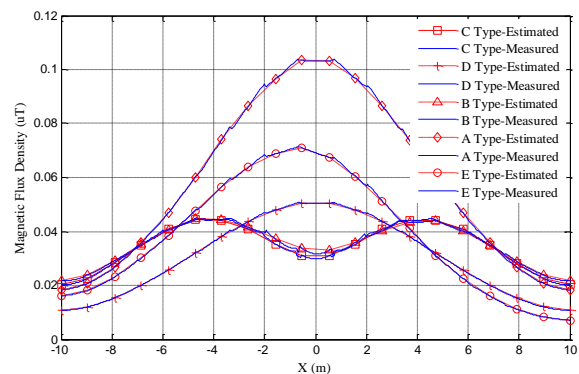
$$Error = \left| \frac{A_{measured} - A_{Estimated}}{A_{measured}} \right| \times 100 \quad (15)$$

بر اساس نتایج به دست آمده از خطای محاسبه شده، دیده شده است، در آرایش خط D در حالتی که مختصات انتخابی در زیر خط در نظر گرفته شده باشد، به دلیل اثر فازها بر یکدیگر، موج میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی هر فاز، مقادیر منتهی سه‌فاز را تحت تأثیر قرار داده که در نتیجه آن موج مقارنی حاصل می‌شود که با دقت بالایی توسط مدل پیشنهادی تخمین زده شده است. خطای ایجاد شده در این حالت همواره کمتر از شرایطی است که مختصات انتخابی در کنار خط لحاظ شود.



شکل (۱۱): مقایسه نتایج حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده از شبیه‌سازی و مقادیر تخمین زده شده برای میدان الکتریکی. (الف): تغییرات در راستای محور X و به ازای تمامی آرایش‌های خطوط در فاصله ۲ متری از سطح زمین. (ب): تغییرات در راستای محور Y و به ازای تمامی آرایش‌های خطوط در فاصله ۳ متری از هادی کناری.

قابلیت تخمین چگالی شار مغناطیسی را در تمامی آرایش‌های مختلف شبکه توزیع دارا است. نتایج حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده در شبیه‌سازی COMSOL و تخمین زده شده توسط شبکه NRBF برای میدان الکتریکی در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مختصات مقادیر به دست آمده در این شکل، مشابه شکل (۱۰) می‌باشد. مقایسه نتایج ارائه شده در شکل‌های (۱۱-الف) و (۱۱-ب) دقت بالای شبکه عصبی NRBF در مدل‌سازی شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱۰): مقایسه نتایج حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده از شبیه‌سازی و مقادیر تخمین زده شده برای چگالی شار مغناطیسی. (الف): تغییرات در راستای محور X و به ازای تمامی آرایش‌های خطوط در فاصله ۲ متری از سطح زمین. (ب): تغییرات در راستای محور Y و به ازای تمامی آرایش‌های خطوط در فاصله ۳ متری از هادی کناری.

شایان ذکر است، نتایجی همانند آنچه در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده است را می‌توان برای دیگر فواصل نیز محاسبه و به نمایش در آورد. با توجه به حجم بالای اطلاعات قابل استخراج، مقادیر چگالی شار مغناطیسی و میدان الکتریکی آرایش خط D در دو حالت اندازه‌گیری شده و تخمین زده شده برای ۲۰ نقطه با مختصات رندم در جدول (۲) نشان داده شده است. نتایج میدان الکتریکی با دقت دو رقم اعشار و چگالی شار مغناطیسی با دقت چهار رقم اعشار در جدول نشان داده شده است. به منظور مقایسه بیشتر، در این جدول از شاخص خطای نسبی بین مقادیر

جدول (۲): مقایسه نتایج حاصل از مقادیر اندازه‌گیری شده از شبیه‌سازی و مقادیر تخمین زده‌شده میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی و محاسبه خطای نسبی مدل ارائه‌شده به‌زای مختصات انتخابی در آرایش D.

X (m)	Y (m)	Electric field (V/m)			Magnetic Flux Density (μ T)		
		Measured	Estimated	Error	Measured	Estimated	Error
۸/۶	۱/۵	۱۷/۹۱	۱۸/۱۵	۱/۲۴	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱۲	۱/۸۱
۳/۴	۲	۶۳/۳۳	۶۲/۸۰	۰/۸۳	۰/۰۴	۰/۰۳۹۷	۰/۷۵
۱/۹	۲	۷۳/۸۹	۷۳/۴۲	۰/۶۴	۰/۰۴۶۹	۰/۰۴۶۶	۰/۶۴
۷/۵	۱	۲۳/۰۶	۲۳/۱۳	۰/۳	۰/۰۱۴۳	۰/۰۱۴۳	۰
۴/۹	۱/۵	۴۷/۲۳	۴۷/۱۸	۰/۱	۰/۰۲۹۱	۰/۰۲۹۴	۱/۰۳
۰/۳	۱	۷۴/۳۹	۷۳/۸۹	۰/۶۷	۰/۰۴۷۲	۰/۰۴۶۹	۰/۶۳
۹/۷	۲	۱۷/۷۱	۱۸/۰۶	۱/۹۷	۰/۰۱۰۹	۰/۰۱۱۱	۰/۰۱
۳/۱	۰/۵	۶۱/۰۳	۶۳/۹۴	۴/۷۶	۰/۰۳۷۹	۰/۰۳۷۸	۰/۲۶
۲/۸	۱/۵	۶۵/۳۸	۶۵/۲۴	۰/۲۱	۰/۰۴۰۶	۰/۰۴۱۳	۱/۷۲
۵	۰	۴۳/۲۸	۴۳/۲۸	۰	۰/۰۲۷۱	۰/۰۲۷۱	۰
۵	۱۲/۶	۱۵۱/۹۸	۱۵۲/۳۸	۰/۲۶	۰/۱۱۴۳	۰/۱۱۴۶	۰/۲۶
۲	۶/۵	۲۶۰/۱۱	۲۶۶/۲۴	۲/۳۵	۰/۱۹۶۴	۰/۲۰۱۰	۲/۳۴
۳	۱۱/۳	۵۸۷/۷۵	۵۵۹/۱۸	۴/۸۶	۰/۳۵۳۹	۰/۳۴۷۰	۱/۹۵
۶	۱۱/۲	۱۵۲/۷۵	۱۵۰/۹۳	۱/۱۹	۰/۱۱۴۵	۰/۱۱۳۳	۱/۰۵
۵	۵/۸	۱۲۱/۳۲	۱۱۹/۹۲	۱/۱۵	۰/۰۹۰۳	۰/۰۸۹۲	۱/۲۲
۲	۱۰/۳	۱۴۲۶/۸۳	۱۳۹۶/۱۲	۲/۱۰	۱/۰۳۰۵	۰/۹۸۱۶	۴/۷۴
۴	۱۳/۱	۱۶۹/۴۰	۱۷۱/۱۵	۱/۰۳	۰/۱۲۷۸	۰/۱۲۹۱	۱/۰۲
۶	۳/۹	۶۹/۲۱	۶۹/۱۷	۰/۰۶	۰/۰۵۱۱	۰/۰۵۱۱	۰
۳	۱۷	۴۳/۲۳	۴۳/۰۶	۰/۳۹	۰/۴۴۴۱	۰/۴۲۴۴	۴/۴۳
۴	۹/۲	۳۱۹/۵۵	۳۱۶/۳۳	۱/۰۱	۰/۲۴۰۵	۰/۲۳۸۱	۰/۹۹

۷. نتیجه‌گیری

با توجه به اثرات زیست‌محیطی میدان‌های الکترومغناطیسی بر بدن انسان، در نظر گرفتن این عامل در طراحی خطوط انتقال انرژی الکتریکی بسیار مهم و اساسی می‌باشد. مجاورت خطوط انتقال در شبکه توزیع به امکان مسکونی، نسبت به سایر خطوط انتقال انرژی، موجب شده است تا در این مقاله انواع آرایش خطوط شبکه توزیع از منظر توزیع میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی مورد بررسی قرار بگیرد. از آنجایی که اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی همواره امکان‌پذیر نمی‌باشد، مدل‌سازی آنها به‌عنوان راه‌کاری منطقی و با دقت بالا مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله مدل‌سازی بر اساس شبکه عصبی NRBF انجام شده است. به‌منظور آموزش شبکه عصبی، داده‌های مورد نیاز با استفاده از شبیه‌سازی پنج آرایش از خطوط شبکه توزیع در نرم‌افزار مبتنی بر اجزاء محدود COMSOL استخراج شده است. بر اساس شبیه‌سازی‌های صورت گرفته و مقایسه انجام‌شده نتایجی به شرح ذیل قابل استنباط است.

➤ شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود با دقت بالایی قابلیت مدل‌سازی میدان‌های الکتریکی و

مغناطیسی در فضای اطراف خطوط هوایی را دارد.

➤ با توجه به اینکه از پنج آرایش مختلف در استخراج داده‌های آموزش شبکه NRBF استفاده شده است، مدل به‌دست‌آمده قابلیت تخمین میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی را در اکثر ساختارهای شبکه توزیع دارا می‌باشد.

➤ اندازه‌گیری میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی در امتداد مسیرهایی به موازات زمین و عمود بر آن موجب شده است تا داده‌های آموزشی شبکه NRBF از جامعیت بالایی برخوردار باشد. چنانچه در این مقاله ۲۰۵۰ داده آموزشی برای مدل‌سازی میدان الکتریکی و ۲۰۵۰ داده آموزشی برای مدل‌سازی چگالی شار مغناطیسی استفاده شده است.

➤ مدل NRBF توسعه یافته، با کاهش چشم‌گیر زمان تجزیه و تحلیل، امکان تعیین میدان‌های الکترومغناطیسی را به‌عنوانی یک روش جایگزین آسان‌تر می‌نماید.

➤ شبکه عصبی NRBF به‌کار گرفته شده از پیچیدگی خاصی برخوردار نبوده و دارای سرعت و دقت مناسب

- [10] G. Filippopoulos, D. Tsanakas, "Analytical calculation of the magnetic field produced by electric power lines" IEEE Trans Power Deliver. Vol. 20, PP. 1474-82, 2005.
- [11] NH. Malik, "A review of the charge simulation method and its applications" IEEE Trans Electr Insul, Vol. 24, PP. 3-20, 1989.
- [12] A.Ayad, W.Krika, H.Boudjell, F.Benhamida, A.Horch," Simulation of the Electromagnetic Field in the Vicinity of the Overhead Power Transmission Line," European Journal of Electrical Engineering, Vol. 21, pp. 49-53, 2019.
- [13] I. Kosalay, "Fuzzy logic based ELF magnetic field estimation in substations" Radiat Prot Dosim, Vol.131, PP. 240-50, 2008.
- [14] L. Ekonomou, VT. Kontargyri, St. Kourtesi, TI. Maris, IA. Stathopulos, "Artificial neural networks in high voltage transmission line problems" Meas Sci Technol Vol. 18, PP. 2239-44, 2007.
- [15] K. Hornik, M. Stinchcombe, H.White, "Multilayer feedforward networks are universal approximators" Neural Network Vol. 2, PP. 359-66, 1989.
- [16] J. Park, IW. Sandberg, "Universal approximation using radial basis function networks" Neural Comp, Vol. 3, PP. 246-57, 1991.
- [17] PN. Charalambos, PP. Antonis, AR. Panos, AK. George, NS. John, "Measurements and predictions of electric and magnetic fields from power lines" Electr Pow Syst Res, Vol.81, PP. 1107-1116, 2011.
- [18] R. Vesna, R. Jasna, "Prediction of magnetic field near power lines by normalized radial basis function network" Adv Eng Softw, Vol. 42, PP. 934-938, 2011.
- [19] F. Munoz, JA. Aguado, F. Marti, JJ. Lopez, A. Rodrigue, JB. Garcia, AR. Treitero, R. Molin, "An intelligent computing technique to estimate the magnetic field generated by overhead transmission lines using a hybrid GA-Sx algorithm" Int J Elec Power, Vol. 53, PP. 43-53, 2013.
- [20] H.F. CARLAK, S. Ozen, S. Bilgin, "Low-frequency exposure analysis using electric and magnetic field measurements and predictions in the proximity of power transmission lines in urban areas", Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 25, PP. 3994 -4005, 2017.
- [21] F. Carlak, S. Ozen. "Prediction of the Electric Field Emissions around the High-voltage Power Lines using Neural Network Algorithms." Proceedings of the 2nd World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Science (EECCS'16), Budapest, Hungary – August 16 – 17, 2016.
- [22] G.A. Kulkarni, and W. Z. Gandhare. "Prediction of Electromagnetic Fields around High Voltage Transmission Lines." Acta Technica Jaurinensis, Vol. 10, PP. 50-58, 2017.
- [23] K. R. Milani, "Distribution network overhead line, Aparatuse and Design"; Applied Science University of Sanat Abo Bargh, Press: Ministry of Energy, 1381, (in Persian).
- [24] AC-DC module user's guide, www.comsol.com/patents, 2018.
- [25] C. Bishop, "Improving the generalization properties of radial basis function neural networks. Neural Computation," Neural computation Vol.3, PP.579-588, 1991.
- [26] L. Grabec, "The normalized radial basis function neural network and its relation to the perceptron." arXiv preprint hysics/0703229, 2007.

می‌باشد. همچنین مدل‌سازی با حداقل تعداد آموزش

از مهم‌ترین مزایای این نوع از شبکه عصبی است.

➤ خطای داده‌های به‌دست‌آمده از مدل NRBF و مقادیر

اندازه‌گیری شده کمتر از پنج درصد می‌باشد. مقادیر

خطای بالا محدود به مختصات است که شکل میدان

در آن نقاط دارای پیچیدگی خاصی می‌باشد.

➤ مقایسه خطاهای به‌دست‌آمده به‌ازای تغییرات

مختصات در راستای محور X و Y نشان داده است که

شکل موج میدان الکتریکی و چگالی شار مغناطیسی

منتجه ناشی از سه فاز در کاهش خطای ایجادشده

تأثیر بسزایی دارد.

➤ مقایسه نتایج حاصل از تخمین توسط شبکه عصبی و

اندازه‌گیری شده به‌وسیله نرم‌افزار مبتنی بر اجزاء

محدود در مختصات‌های مختلفی از محورهای X و Y

دقت بسیار بالای مدل ارائه‌شده را نشان می‌دهد.

۷. مراجع

- [1] G. Draper, T. Vincent, ME. Kroll, J. Swanson, "Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study"; BMJ, Vol. 330, pp. 1-5, 2005.
- [2] S. Ozen, "Low-frequency transient electric and magnetic fields coupling to child body"; Radiat Prot Dosimetry, Vol. 128, pp. 62-67, 2008.
- [3] IC. Ahlbom, E. Cardis, A. Green, M. Line, "Review of the epidemiologic literature on EMF and health. Environ Health Perspect, Vol. 109, pp. 911-933, 2001.
- [4] S. Helhel, S. Ozen, "Assessment of occupational exposure to magnetic fields in the high voltage substations(154/34.5kV)" Radiat Prot Dosimetry, Vol. 128, pp. 464-470, 2008.
- [5] D.Noble, A. McKinlay, M. Repacholi, "Effects of static magnetic Fields relevant to human health" Prog Biophys MolBio, Vol. 87, pp. 171-372, 2005.
- [6] IARC. "Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields" International Agency for Research on Cancer, Lyon, France, 2002.
- [7] Li DK, R. Odouli, S. Wi, T. Janevic, I. Golditch, T. Dan, Bracken, R. Senio, R. Ranki, R. Iriye "A population-based perspective cohort study of personal exposure to magnetic fields during pregnancy and the risk of miscarriage" Epidemiology, Vol. 13, PP. 9-20, 2002.
- [8] S. Ozen, "Evaluation and measurement of magnetic field exposure at a typical high-voltage substation and its power lines" Radiat Prot Dosim, Vol. 128, PP. 198-205, 2008.
- [9] F. Moro, R. Turri, "Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method" IEEE Trans Power Deliver, Vol. 23, PP.1042-8, 2008.

An Intelligent Computational Method to Estimate the Electric and Magnetic Field Power Frequency of Distribution Network Using Neural Network Based on Normalized Radial Basis Functions

M. Khodsouz^{1*}, S. M. Seyyedbarzegar²

University of Science and Technology of Mazandaran

(Received: 10/04/2020; Accepted: 26/05/2020)

Abstract

Population growth in urban areas and the rising demand for electricity has led to the expansion of the electricity grid, more loading of power transmission lines and line privacy reduction. Due to such conditions in residential and work environments, the probability of electric and magnetic fields exposure has increased. Since exposure to electromagnetic fields at power frequency has undesirable effects on human health, this has caused a serious challenge. To gain knowledge as to how electromagnetic fields are emitted, the artificial intelligence technique has been considered as an accurate and fast method for the required electric and magnetic fields modeling. In this paper, a neural network based on normalized radial basis functions has been used to estimate the electric fields and magnetic flux density. The required data for proposed model training and validation have been extracted based on five different layouts of 20kV distribution network lines in COMSOL software. Based on the performed simulations, values of the electric fields and the magnetic flux densities in different longitudinal and transverse coordinates of the space around the lines have been measured. Comparison of the estimated and measured results has shown that the proposed model has a very good accuracy for electric field and magnetic flux density determination at different points around the lines for different structures of the distribution network.

Keywords: Distribution network lines, Electrical and magnetic fields, Data estimation, Neural network, Finite element methods

* Corresponding author E-mail: m.khodsouz@mazust.ac.ir