

استفاده از شبکه عصبی برای فاصله یابی صاعقه از نوع ابر به زمین

روزبه معینی مازندران
دانشیار

سید علی امام قریشی
کارشناسی ارشد

سید حسین (حسام الدین) صادقی
دانشیار

دانشکده برق، قطب قدرت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

در این مقاله، هدف تعیین فاصله بین صاعقه از نوع ابر به زمین و محل اندازه گیری میدان های الکترومغناطیسی ناشی از آن با استفاده از یک روش هوشمند و مبتنی بر شبکه های عصبی می باشد. نتایج محاسبات و اندازه گیری ها نشان می دهد که شکل میدان های الکترومغناطیسی تشعشع شده توسط کانال صاعقه با فاصله تغییر می یابد، که از همین موضوع می توان جهت تعلیم شبکه عصبی مورد نظر سود جست. شایان ذکر است که برای استفاده از چنین روش هوشمندی نیاز به تعداد زیادی داده اندازه گیری در فواصل مختلف برای آموزش شبکه می باشد. اما به علت کمبود داده های اندازه گیری، می توان از مدل های مختلفی که برای کانال صاعقه ارائه شده است جهت محاسبه میدان ها در فواصل مختلف سود برد. در این مقاله نخست از یک مدل رایج به نام مدل خط انتقال، (Transmission Line (TL)) جهت محاسبه میدان های الکترومغناطیسی ناشی از کانال صاعقه در فواصل مختلف استفاده شده است. در این مدل فرض می شود که جریان پای کانال بدون هیچ گونه تلفاتی بر روی کانال منتشر می شود. سپس با استفاده از روابط موجود، میدان های الکترومغناطیسی تشعشع شده از کانال صاعقه و بر روی زمینی از نوع هادی آرمانی در فواصل مختلف از کانال بدست می آیند. از آنجایی که تغییرات شکل موج میدان ها با فاصله، وابستگی زیادی به زمان صعود و زمان پشت و همچنین بیک جریان کانال دارند، مقادیر این میدان ها با لحاظ کردن تمام تغییرات فوق محاسبه شده اند و سپس از این مقادیر برای آموزش شبکه سود برده شده است. در نهایت، برای آموزش شبکه عصبی از روش قدرتمند LM (Levenberg - Marquardt)، استفاده شده است. شبکه عصبی طراحی شده محل برخورد صاعقه را با خطای کمتر از یک کیلومتر در محدوده یک تا هشتاد کیلومتر برآورد می نماید.

کلمات کلیدی

صاعقه، کانال ضربه برگشت، شبکه عصبی، میدان های الکترومغناطیسی

Locating cloud-to-ground lightning return strokes by a neural network algorithm

A. Emamghoreishi
M.Sc. Graduate

S.H.H Sadeghi
Associate Professor

R. Moini
Associate Professor

Electrical Engineering Department,
Amirkabir University of Technology

Abstract

A neuro-based approach is proposed for locating cloud-to-ground lightning strokes. Due to insufficient experimental data, we have used the results of an electromagnetic simulator for training the developed artificial neural network. The simulator utilizes the well-known transmission line and is capable of predicting the electromagnetic field due to a return stroke channel (RSC) for various parameters associated with the shape of the channel base-current. The training process has been successfully done using the Levenberg-Marquardt technique. The simulation results demonstrate that the RSC locations can be predicted with an absolute error not greater than 1 km for RSCs located within 80 km of a lightning detection station.

Keywords

Lightning, Return stroke channel, Neural network, Electromagnetic fields.

تعداد آن توسط یک شمارنده اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از اطلاعات مربوط به صدای صاعقه دو پارامتر روزهای صاعقه ای و ساعات صاعقه ای و نهایتاً منحنی‌های ایزرکرونیک مربوط به منطقه به دست می‌آید. این نوع اندازه‌گیری‌ها معمولاً در ایستگاه‌های هواشناسی انجام می‌گیرد و از آنجاییکه حساسیت گیرنده‌های صوتی حداکثر تا ۱۵ کیلومتر است کلیه صاعقه‌های خارج از این شعاع قابل تشخیص نیست و این از عمده‌ترین معایب این سیستم می‌باشد [۲]. روش جدیدتر، استفاده از شمارنده‌های الکترومغناطیسی صاعقه می‌باشد که در آنجا به جای صدای صاعقه، دامنه بخشی از طیف فرکانسی میدان الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه به عنوان عامل تشخیص دهنده صاعقه به کار گرفته می‌شود. در این روش حداکثر تا ۴۰ درصد خطای شمارش می‌تواند وجود داشته باشد [۲]. اما دو عیب عمده این دو روش عدم امکان تعیین فاصله وقوع صاعقه تا محل اندازه‌گیری و عدم امکان تشخیص نوع صاعقه می‌باشد. علاوه بر دو روش فوق، از سیستم‌های آشکار ساز دیگری برای تشخیص صاعقه استفاده می‌شود که امروزه از دو روش (DF (Direction Finding) یا جهت یابی (TOA (Time Of Arrival) یا زمان دریافت، برای فاصله یابی صاعقه‌های از نوع ابر به زمین استفاده می‌نمایند [۳]. ایده اولیه جهت استفاده از روش DF برای فاصله یابی صاعقه به سال ۱۹۲۰ بر می‌گردد [۴]. اساس عملکرد این روش بر پایه تشخیص جهت صاعقه نسبت به یک مبدا خاص (مثل استوا) می‌باشد. در این روش با استفاده از دو حلقه آنتنی عمود بر هم میدان مغناطیسی مماسی اندازه‌گیری می‌گردد و از آنجاییکه ولتاژ القایی تولید شده ناشی از میدان مغناطیسی دو سر هر یک از حلقه‌ها برابر است با سطح حلقه ضربدر مشتق چگالی فلوی مغناطیسی عمود بر حلقه، جهت صاعقه با اندازه‌گیری ولتاژها به راحتی قابل حصول است. سپس با استفاده از چندین ایستگاه DF در نقاط مختلف می‌توان به دقت محل وقوع صاعقه را تخمین زد. در واقع هر ایستگاه DF در مکان‌های مختلف چندین خط داریم که محل تقاطع آنها محل دقیق صاعقه را نشان می‌دهد. همچنین در این روش می‌توان با اندازه‌گیری دامنه میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه، دامنه جریان تخلیه را با دقت خوبی بر آورد نمود [۵].

در روش دوم، احتیاج به حداقل ۳ ایستگاه TOA در نقاط مختلف جهت تعیین موقعیت صاعقه داریم. در این روش اساس کار بر پایه تشخیص زمان وقوع صاعقه است. هر کدام از ایستگاه‌های مورد نظر زمان آشکار سازی میدان‌ها را ثبت

بررسی صاعقه به عنوان یک منبع جدی تداخل امواج الکترومغناطیسی از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. امروزه با توجه به استفاده گسترده از قطعات الکترونیکی حساس و ظریف در قسمت‌های مختلف صنعت، بحث محافظت و نگهداری این قطعات در برابر تشعشعات ناخواسته الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه بسیار مهم می‌باشد. با توجه به تخلیه انرژی بسیار زیاد ناشی از صاعقه، که می‌تواند بین ابرهای باردار یا بین ابروزمین صورت پذیرد، کلیه ادوات و تجهیزات خطوط مخابراتی و یا قدرتی می‌توانند کما بیش دچار اختلال گردند که این اختلالات ممکن است ناشی از برخورد مستقیم یا غیر مستقیم صاعقه با شبکه مذکور باشد. به طور کلی در طبقه بندی انواع صاعقه می‌توان به دو دسته بندی اشاره کرد. یکی صاعقه‌های ابر به زمین و دیگر صاعقه‌های داخل ابر [۱]. اما آن دسته از صاعقه‌ها که باعث خرابی در دستگاه‌ها می‌گردند، صاعقه‌های ابر به زمین هستند که ۷۰ درصد صاعقه‌های موجود نیز از اینگونه می‌باشند. در بین صاعقه‌های ابر به زمین درصد وقوع منفی آن از گونه‌های دیگر بیشتر می‌باشد. در پدیده تخلیه الکتریکی ناشی از صاعقه، جریان تخلیه از نوع پالسی با زمان صعود بسیار کم و دامنه زیاد می‌باشد که این دامنه می‌تواند بین یک کیلوآمپر تا صد کیلو آمپر تغییرات داشته باشد. این تغییرات شدید دامنه و نحوه تغییرات زمانی شکل موج جریان می‌تواند برای دستگاه‌ها و تجهیزات مخابراتی در بخش‌های مختلف، نظیر سیستم‌های اندازه‌گیری حفاظتی، کنترلی و غیره بسیار خطر آفرین باشد. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده شناخت این پدیده و روش‌های مؤثر جهت حفاظت و مقابله با آن بسیار مهم می‌باشد. با توجه به پیچیدگی صاعقه، اهمیت مدل سازی و اندازه‌گیری شدت صاعقه و چگالی برخورد صاعقه با زمین (Ground Flash Density) Ng، در هر منطقه ای روشن می‌گردد. بررسی دقیق و محاسبه درست پارامتر Ng می‌تواند ما را در شناخت هر چه بهتر چگونگی فعالیت‌های صاعقه ای در یک منطقه و روش‌های حفاظتی در آن منطقه یاری کند. این مسئله خصوصاً در مناطق کوهستانی و نواحی صاعقه خیز برای خطوط انتقال نیرو و تجهیزات مخابراتی از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد. در این راستا اندازه‌گیری میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از صاعقه و همچنین ثبت تعداد دفعات وقوع صاعقه روش‌های متعددی وجود دارد. یکی از رایج ترین روش‌های اندازه‌گیری برای بررسی کمی صاعقه، استفاده از سنسورهای صوتی جهت تعیین دفعات وقوع صاعقه و در نتیجه تخمین عدد Ng است. در این روش شدت صوت صاعقه (رعد) تشخیص و

می کنند و به این ترتیب بین هر دو ایستگاه مورد نظر یک اختلاف زمانی ثابت به هنگام آشکار سازی صاعقه پدید می آید. در این صورت مکان هندسی نقاطی که تفاضل فاصله آنها یا بعبارتی تفاضل زمانی آنها از هر دو ایستگاه همان مقدار ثابت است بیان کننده یک هذلولی می باشد. محل برخورد تمامی هذلولی ها محل دقیق وقوع صاعقه را نشان می دهد [۶].

امروزه از روش ترکیبی TOA و DF جهت تخمینی دقیق تر از موقعیت صاعقه استفاده می شود [۷]. مزیت عمده این دو روش در تعیین محل دقیق وقوع صاعقه با دقت مناسب است، اما در مقابل احتیاج به داشتن تعداد زیادی ایستگاه در مناطق مختلف می باشد که با توجه به قیمت بالای هر ایستگاه، هزینه طراحی و راه اندازی چنین شبکه ای بسیار بالا خواهد بود.

نمونه ای از یک ایستگاه سنجش صاعقه در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر به پایان رسیده و در حال بهره برداری می باشد. با این ایستگاه می توان میدان های الکتریکی و مغناطیسی ناشی از صاعقه در فاصله یک تا صد کیلومتر در طیف صفر تا دو مگاهرتز را اندازه گیری و ثبت نمود [۸ و ۹]. متأسفانه همانطور که قبلاً ذکر شد این ایستگاه به تنهایی قادر به تعیین فاصله نیست.

در این مقاله هدف این است که امکان پذیری تعیین موقعیت صاعقه های از نوع ابر به زمین را با استفاده از داده های تنها یک ایستگاه سنجش صاعقه، مورد بررسی قرار دهیم. در این راستا، با استفاده از الگوریتم های شبکه عصبی، سعی به تعیین موقعیت محل وقوع صاعقه داریم. در این راستا با در نظر گرفتن تغییر شکل میدان های الکتریکی و مغناطیسی در فواصل مختلف و با استفاده از الگوریتم های شبکه عصبی فاصله محل برخورد صاعقه با ایستگاه تخمین زده می شود. الگوریتم پیشنهادی به علت کمبود داده های عملی برای آموزش شبکه عصبی از مدل خط انتقال برای تهیه داده های لازم استفاده شده است. شبکه عصبی آموزش یافته به تنهایی قادر به تخمین فاصله صاعقه با خطای کمتر از ۱ کیلومتر از فاصله ۱ کیلومتر تا ۸۰ کیلومتر می باشد.

۱- مدل سازی کانال صاعقه

در این بخش به بیان چگونگی مدل سازی کانال صاعقه و محاسبه میدان های الکترومغناطیسی ناشی از آن می پردازیم. مدل سازی کانال و ضربه بازگشتی ناشی از صاعقه به سه دلیل حائز اهمیت است. اول به عنوان یک کار تحقیقی در زمینه فیزیک صاعقه. دوم به عنوان یک مکانیزم

که توسط آن جریان ضربه بازگشتی در سطح زمین با اندازه گیری میدان های الکتریکی و مغناطیسی راه دور تعیین می شود. سوم به عنوان یک راهکار برای محاسبه میدان هایی که در محاسبات کوپلینگ استفاده می شوند. از این نمونه می توان ولتاژهای القایی بر روی خطوط مخابراتی و یا وسایل الکتریکی را نام برد [۱۰]. در این مقاله، منظور از مدل سازی، بیان فرم جریان ضربه بازگشتی، به صورت تابعی از مکان و زمان در امتداد کانال صاعقه می باشد. کانال ضربه بازگشتی در مدل مورد نظر به صورت یک آنتن عمودی است که بر روی سطح یک زمین از نوع هادی آرمانی قرار گرفته است، شکل ۱. نقطه مشاهده بر روی سطح زمین و به فاصله r از پای کانال صاعقه است. در واقع میدان های الکترومغناطیسی بر روی سطح زمین محاسبه می شوند. به علت فرض آرمانی بودن زمین، میدان الکتریکی دارای مؤلفه ای در راستای عمود بر سطح و میدان مغناطیسی دارای مؤلفه مماسی می باشد. با استفاده از معادلات ماکسول و تئوری آنتن می توان عبارات مربوط به این دو میدان را به دست آورد. در محاسبه میدان های تشعشعی ناشی از کانال صاعقه فرض می کنیم که یک آنتن مونوپل با طول محدود داریم که جریانی به فرم $i(z,t)$ بر روی آن در حال انتشار است. برای محاسبه میدان های الکترومغناطیسی پدیده های گذرا نظیر صاعقه، نخست می بایستی از معادلات ماکسول در حوزه زمان که به شکل زیر بیان می شوند استفاده نمود:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & \nabla \cdot \vec{B} &= 0 & \nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

با تعریف پتانسیل های برداری و عددی A و ϕ به صورت زیر خواهیم داشت:

$$\vec{E} = -\nabla \phi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (2)$$

سپس با ترکیب معادلات (۱) و (۲) معادله زیر در حوزه زمان بدست می آید [۱۱]:

$$\nabla \cdot \vec{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

برای ادامه کار، یک دیپل عمودی بسیار کوچک با طول dz در نقطه z از فضا را در نظر می گیریم که جریان بر روی آن $i(z,t)$ است. با توجه به قضیه تصویر، صفحه زمین برداشته

$$d\phi(R, \theta, t) = \frac{dz \cos \theta}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{1}{R^2} \int_0^t i(z, \tau - \frac{R}{c}) d\tau + \frac{i(z, t - \frac{R}{c})}{cR} \right] \quad (9)$$

و نهایتاً با توجه به رابطه (۲) و داشتن مقادیر $d\vec{A}$ و $d\vec{\phi}$ میدان $d\vec{E}$ به صورت زیر قابل بیان است:

$$dE_z(R, \theta, t) = \frac{dz}{2\pi\epsilon_0} \left[\frac{2-3\sin^2\theta}{R^3} \int_0^t i(z, t - \frac{R}{c}) d\tau + \frac{2-3\sin^2\theta}{cR^2} i(z, t - \frac{R}{c}) \cdot \frac{\sin^2\theta}{cR^2} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right] \hat{a}_z \quad (10)$$

در ادامه میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی از کانال صاعقه با انتگرال گیری از میدان‌های جزئی محاسبه شده از دیپل‌های کوچک در نقطه مشاهده با توجه به رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$B_\phi(r, t) = \int_0^H dB_\phi(R, \theta, t) dz$$

$$E_z(r, t) = \int_0^H dE_z(R, \theta, t) dz \quad (11)$$

با توجه به مطالب فوق و با انجام تبدیلات ریاضی مناسب میدان‌های الکترومغناطیسی به صورت زیر قابل بیان است: [۱۱ و ۱۲]

$$B_\phi(r, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^H \frac{r}{R^3} i(z, t - \frac{R}{c}) dz + \frac{\mu_0}{2\pi} \int_0^H \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} dz \quad (12)$$

$$E_z(r, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^H \frac{2z^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z, t - \frac{R}{c}) d\tau dz + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^H \frac{2z^2 - r^2}{cR^4} i(z, t - \frac{R}{c}) dz - \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \int_0^H \frac{r^2}{c^2 R^3} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} dz \quad (13)$$

با توجه به پیچیدگی ماهیت صاعقه و نداشتن امکانات لازم جهت اندازه‌گیری نحوه انتشار جریان بر روی کانال صاعقه، مدل‌های مختلفی جهت توصیف این پدیده ارائه شده‌اند که هر کدام از این مدل‌ها تا حدی توانسته‌اند با نتایج

می‌شود و به جای آن از دیپل کوچک که تصویر دیپل اصلی می‌باشد استفاده می‌گردد. میدان محاسبه شده در فاصله r از آنتن مجموع میدان‌های ناشی از خود دیپل و تصویر آن می‌باشد. میدان مغناطیسی $d\vec{B}$ ناشی از این دیپل کوچک با توجه به پتانسیل برداری $d\vec{A}$ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$d\vec{B} = \nabla \times d\vec{A} \quad (4)$$

با توجه به اینکه جریان منتشر شونده بر روی کانال دارای مؤلفه عمود بر سطح یعنی در راستای z می‌باشد بنابراین پتانسیل برداری $d\vec{A}$ نیز فقط دارای مؤلفه dA_z به صورت زیر می‌باشد:

$$dA_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i(z, t - \frac{R}{c})}{R} dz \quad (5)$$

با تبدیل مختصات از سیستم دکارتی به سیستم کروی خواهیم داشت:

$$d\vec{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[i(z, t - \frac{R}{c}) \frac{\cos\theta}{R} \hat{a}_R - i(z, t - \frac{R}{c}) \frac{\sin\theta}{R} \hat{a}_\theta \right] dz \quad (6)$$

همچنین با توجه به روابط ریاضی و مشتق زنجیره‌ای رابطه زیر برقرار خواهد بود:

$$\frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial R} = -\frac{1}{c} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \quad (7)$$

سپس با گرفتن کرل از رابطه (۶) و با در نظر گرفتن رابطه $d\vec{B} = \nabla \times d\vec{A}$ و استفاده از رابطه (۷) خواهیم داشت:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 dz}{4\pi} \sin\theta \left[\frac{i(z, t - \frac{R}{c})}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right] \hat{a}_\phi \quad (8)$$

در مرحله بعدی با استفاده از رابطه (۳) مقدار $d\phi$ به صورت زیر بدست می‌آید:

حاصل از اندازه گیری مطابقت داشته باشند. البته ضعف هایی هم در مدل های ارائه شده وجود دارد. نتایج اندازه گیری جریان پای کانال صاعقه نشان می دهد که طبیعت این جریان پالسی شکل و با زمان صعود بسیار کم است. به طور معمول پیک جریان پای کانال صاعقه می تواند از یک کیلوآمپر تا صد کیلوآمپر تغییرات داشته باشد. همچنین زمان صعود بین یک تا پنج میکروثانیه و زمان پشت بین ده تا سی میکروثانیه در حال تغییر است. بنابراین در نظر گرفتن چنین تغییراتی از رابطه زیر برای توصیف جریان پای کانال استفاده شده است [۱۲]:

$$i(0,t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} e^{-\frac{t}{\tau_2}} + I_{02} \left(e^{-\frac{t}{\tau_3}} - e^{-\frac{t}{\tau_4}} \right) \quad (14)$$

در رابطه فوق با تغییر بعضی از پارامترها می توان دامنه، زمان اوج و زمان پشت جریان پای کانال را تغییر داد. مقادیر پارامترهای فوق به صورت نمونه عبارتند از: $\eta = 0.845$, $\tau_4 = 6 \mu\text{sec}$, $n = 2$, $\tau_3 = 100 \mu\text{sec}$, $\tau_2 = 5 \mu\text{sec}$, $\tau_1 = 0.072 \mu\text{sec}$, $I_{02} = 7.5 \text{kA}$, $I_{01} = 9.9 \text{kA}$. مقادیر پارامترها برای ۴ حالت مختلف در جدول ۱ آورده شده است. در ضمن در همین جدول می توان مقدار دامنه جریان، زمان صعود و زمان پشت برای ۴ حالت مورد نظر را مشاهده کرد. در شکل ۲، جریان پای کانال به ازاء هر کدام از حالات درج شده در جدول ۱ رسم شده است. در این شکل اعداد نوشته شده برای هر خط معین، بیانگر حالت متناظر در جدول ۱ می باشد.

در مرحله بعدی می بایستی با در نظر گرفتن نحوه انتشار جریان برای کانال صاعقه رابطه ای بین جریان در هر نقطه و جریان پای کانال صاعقه بدست آوریم [۱۴]. در اینجا از مدل TL برای توصیف انتشار جریان صاعقه استفاده شده است. در این مدل فرض می شود که جریان پای کانال صاعقه بدون هیچگونه تلفاتی روی کانال منتشر می شود. در واقع می توان چنین فرض نمود که یک خط انتقال بدون تلف داریم که جریان بر روی آن در حال حرکت است. شکل ۳. در این شکل همانطور که گفته شد مقادیر پارامترها $\tau_3 = 12.99 \mu\text{sec}$, $\tau_1 = 3.77 \mu\text{sec}$ و بقیه پارامترها ثابت در نظر گرفته شده اند.

در روابط ۱۲ و ۱۳ عبارت جریان توسط مدل TL تعیین می شود. در این روابط $i(z, t)$ مقدار جریان در ارتفاع Z از کانال در لحظه t و C سرعت نور می باشد. H , R , z , r نیز در شکل ۱، مشخص شده اند. در معادله مربوط به میدان

الکتریکی، ترم اول که با انتگرال جریان متناسب است ترم استاتیک (Static Term) و ترم دوم که با خود جریان متناسب می باشد را ترم القایی (Inductive Term) و ترم آخر که با مشتق جریان متناسب است ترم تشعشعی (Radiative Term) می باشد. معادله مربوط به میدان مغناطیسی نیز شامل دو ترم القایی و تشعشعی می باشد. در فواصل دور ترم های استاتیک و القایی در برابر ترم تشعشعی بسیار کوچک هستند و به همین علت شکل میدان های الکتریکی و مغناطیسی کاملاً شبیه به هم هستند. در شکل های ۴ و ۵ و ۶ اثر تغییرات زمان صعود و زمان پشت بر روی شکل موج میدان های الکتریکی و مغناطیسی کاملاً مشهود است. در تمامی شکل ها خطوط با شماره های مختلف بیانگر زمان صعود و زمان پشت مشخص از جریان پای کانال صاعقه هستند که این مقادیر در جدول (۱) آمده است. با کمی دقت در اشکال فوق در می یابیم که زمان صعود میدان ها در فواصل زیاد برابر زمان صعود جریان پای کانال صاعقه است. همچنین زمان پشت میدان ها وابستگی شدیدی به زمان پشت جریان دارد، به طوری که زمان پشت کم برای جریان باعث تضعیف سریعتر میدان می گردد. در شکل شماره ۶ میدان های مغناطیسی و الکتریکی راه دور کاملاً به هم شبیه هستند. و همین امر آموزش شبکه در فواصل دور را با مشکل مواجه می کند. با توجه به تغییرات شکل میدان الکتریکی و مغناطیسی با فاصله می توان از این ویژگی جهت آموزش شبکه سود جست.

۲- الگوریتم پیشنهادی شبکه عصبی

شبکه های عصبی مصنوعی جز آن دسته از سیستم های دینامیکی قرار دارند که با پردازش روی داده های تجربی دانش یا قانون نهفته در ورای داده ها را به ساختار شبکه منتقل می کنند. با توجه به این موضوع در اینجا نیز هدف این است که رابطه منطقی که بین فاصله محل برخورد صاعقه تا محل اندازه گیری و شکل موج های میدان های الکترومغناطیسی وجود دارد به ساختار شبکه منتقل گردد و شبکه صرفنظر از تغییرات زمان صعود و زمان پشت و همچنین دامنه جریان، صرفاً با یادگیری میدان های الکتریکی و مغناطیسی قادر به تخمین فاصله باشد. با توجه به نمودارهای رسم شده برای میدان الکتریکی و مغناطیسی می توان دید که سطح زیر منحنی این نمودارها با فاصله در حال تغییر است. همچنین نسبت میدان الکتریکی به میدان مغناطیسی به عنوان یک پارامتر مهم به عنوان عناصری از بردار ورودی به شبکه استفاده می شود. بنابراین برای یادگیری ارتباطی که بین تغییرات گفته شده فوق با فاصله

وجود دارد، از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه استفاده می‌شود. برای آموزش شبکه از قانون پس انتشار خطا BP (Back - Propagation) [۱۵] که تعمیمی از الگوریتم LMS (Least Mean Square) می‌باشد استفاده می‌گردد. برای آموزش شبکه به نحو مطلوب و با سرعت بالای همگرایی، الگوریتم‌های زیادی ارائه شده است که ساده‌ترین آنها روش MBP (Momentum Back-Propagation) یا روش پس انتشار خطا با ترم ممتنم می‌باشد. در این روش از ترم ممتنم جهت افزایش سرعت همگرایی استفاده می‌گردد ولی معمولاً برای داده‌های حجیم و پیچیده از الگوریتم‌های جدیدتر و با قابلیت بیشتر سود برده می‌شود. در حال حاضر یکی از این الگوریتم‌ها، روش یادگیری LM (Levenberg- Marquardt) می‌باشد که البته در این مقاله از روش بهبود یافته آن جهت آموزش شبکه استفاده شده است [۱۶]. در روش LM بهبود یافته، سرعت همگرایی بالاتر و حجم حافظه مورد استفاده کمتر است یعنی دراصل ابتدا یک فشردگی سازی در داده‌های ورودی انجام می‌گیرد و متعاقب آن این داده‌ها برای آموزش به شبکه داده می‌شود.

شبکه مورد نظر، شبکه پرسپترون دو لایه است که در هر لایه تابع تحریک نرون زیگموئیدی می‌باشد. در واقع در یک بحث کلی تر می‌توان گفت که شبکه پرسپترون دو لایه قادر به تخمین هر نگاشتی است به شرطی که به اندازه کافی نرون در اختیار داشته باشد [۱۷]. در اینجا نگاشت مورد نظر بین شکل میدان الکتریکی و مغناطیسی و فاصله است. شمای کلی یک شبکه عصبی پرسپترون دو لایه در شکل ۷ آمده است.

در شکل ۷، Bias₁ و W₁ مقادیر وزن و بایاس برای لایه مخفی می‌باشند و Bias₂ و W₂ مقادیر وزن و بایاس برای لایه خروجی هستند. F₁ و F₂ نیز توابع تحریک نرون‌ها می‌باشند. در آموزش شبکه مقادیر وزن و بایاس به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که شبکه نهایتاً به جواب مطلوب همگرا شود. جواب مطلوب، جوابی است که در آن خطای شبکه به ازای تمامی ورودی‌ها از مقدار معینی کمتر باشد. در شبکه تحت آموزش مورد نظر، تفاوت میان خروجی شبکه و مقدار واقعی به عنوان خطا در نظر گرفته شده است. درحین آموزش، در هر مرحله بر اساس خطای موجود مقادیر وزن و بایاس به گونه‌ای تغییر می‌کنند که در مرحله بعدی خطای شبکه به همان ورودی‌ها کمتر شود. در نهایت در صورتیکه بردارهای ورودی به شبکه به نحو مطلوب انتخاب شده باشند به خطای مورد نظر می‌رسد.

۳- نتایج

۳-۱. نحوه آموزش شبکه عصبی

قبل از آنکه به ارزیابی الگوریتم پیشنهادی بپردازیم، ابتدا نحوه آموزش آن مورد بحث قرار خواهد گرفت. در آموزش شبکه از سه دسته داده استفاده شده است. دسته اول الگوهای آموزشی می‌باشند که جهت آموزش شبکه از آنها استفاده می‌شود. هر کدام از این الگوها، خصوصیات مهم میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی که با فاصله در حال تغییر است به ازای هر زمان صعود و هر زمان پشت را در بردارند. نکته قابل توجه در این الگوها این است که تغییرات دامنه جریان تخلیه حائز اهمیت نیست چرا که الگوها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که مستقل از دامنه جریان تخلیه صاعقه باشند.

دسته دوم، الگوهای اعتباری (Validation Data) می‌باشند که برای جلوگیری از یادگیری بیش از حد یا به عبارت دیگر Overfitting شبکه انتخاب شده‌اند. در حین آموزش در صورتیکه مجموع مربعات خطای این داده‌ها شروع به افزایش کند شبکه در حال از دست دادن تعمیم پذیری خود به علت زیاد بودن تعداد نرون‌های لایه مخفی می‌باشد. در این حالت بایستی عمل یادگیری شبکه متوقف گردد و عمل آموزش دوباره با مقادیر جدید وزن و بایاس انجام پذیرد. بنابراین این الگوها بسیار حائز اهمیت هستند. دسته سوم، داده‌های تست می‌باشند. برای اطمینان نهایی از آموزش صحیح شبکه از این داده‌ها استفاده می‌شود. پس از خاتمه آموزش شبکه و رسیدن به مجموع مربعات خطای مورد نظر شبکه تحت داده‌های تست قرار می‌گیرد. در صورتیکه خطای شبکه به این داده‌ها نیز از مقدار تعیین شده کمتر باشد در آن صورت عملکرد شبکه مطلوب می‌باشد.

۳-۲. ارزیابی الگوریتم در غیاب نویز

شبکه تحت آموزش که در این مقاله آورده شده است به خوبی عمل یادگیری را انجام داده است و با توجه به مطالب فوق علاوه بر جلوگیری از Overfitting، تحت الگوهای تست نیز جوابگو بوده است. در تمامی الگوهای داده شده از هر دسته خطای ناشی از تخمین فاصله حداکثر ۱ کیلومتر بوده است. همان‌طور که گفته شد از روش قدرتمند LM بهبود یافته جهت آموزش استفاده شده است. منحنی کاهش مجموع مربعات خطا در شکل ۸ رسم شده است. همان‌طور که از این شکل دیده می‌شود به علت انتخاب مناسب داده‌های آموزشی عمل یادگیری به خوبی انجام یافته است. شبکه آموزش دیده دارای این ویژگی مهم است که در بیش از ۹۰ درصد موارد خطای شبکه در تخمین فاصله از ۵۰۰ متر کمتر است. این ویژگی در شکل ۹ نمایش داده شده است. در این شکل فراوانی خطای فاصله یابی برای محدوده‌های ۵۰ متری تا یک کیلومتر رسم شده است. همان‌طور که در شکل نمایش داده

شده است در چائیکه خطای شبکه به ورودی ها بیشتر می شود فراوانی آنها کمتر می گردد و این به معنی آن است که در شبکه آموزش یافته، در اکثر موارد خطای شبکه در تخمین فاصله خیلی کم است. همچنین این موضوع برای داده های تست و اعتباری نیز صحت دارد. اشکال ۱۰ و ۱۱ این موضوع را به خوبی نشان می دهند [۱۸].

بنابراین می توان نتیجه گرفت که شبکه عصبی به خوبی از عهده نگاشت بین زوج داده های ورودی و خروجی (میدان های الکترومغناطیسی و فاصله) بر می آید. این تحلیل نشان می دهد که چنانچه بتوان به اندازه کافی داده های اندازه گیری در اختیار داشت باز می توان همانند داده های مدل عمل آموزش شبکه را به خوبی انجام داد.

۳-۳-۲. ارزیابی الگوریتم در حضور نویز

در این قسمت مساله وارد کردن نویز به سیگنال صاعقه و خطای ناشی از شبکه عصبی به سیگنال نویزی شده بررسی می گردد. همانطور که در قسمت های قبل هم گفته شد به علت کمبود داده های عملی در فواصل مختلف از مدل سازی کانال صاعقه به وسیله مدل معروف TL یا مدل خط انتقال استفاده شده است. با توجه به مدل فوق و داشتن یک رابطه ریاضی می توان میدان های الکترومغناطیسی ناشی از کانال ضربه بازگشتی به ازاء مقادیر مختلف زمان صعود و زمان پشت جریان پای کانال در نقاط مختلف را بدست آورد. میدان های حاصل، عملاً میدان های ناشی از مدل هستند و بدون نویز می باشند. برای تست شبکه آموزش یافته توسط داده های عملی و بررسی عملکرد شبکه می توان از داده های موجود که توسط مراکز تعیین فاصله صاعقه بدست آمده اند سود برد. به علت محدود بودن این داده ها و نداشتن مقادیر میدان ها می توان از داده های مدل که با درصد مشخصی نویز همراه هستند استفاده نمود. بنابراین یک راه مناسب برای بررسی مساله نویز، ایجاد سیگنال نویزی می باشد. در این راستا به میدان های الکترومغناطیسی بدست آمده از مدل TL، نویز سفید با توزیع یکنواخت و مقادیر مختلف توان، نسبت به توان سیگنال اضافه شده است. در ادامه کار سیگنال نویز که توان آن نسبت به توان سیگنال صاعقه درصد به خصوصی است به میدان های مدل اضافه می کنیم. در اشکال ۱۲ و ۱۳ میدان های الکترومغناطیسی نویزی شده به ازاء ۵ درصد توان نویز در فواصل ۱ و ۵۰ کیلومتری از کانال صاعقه رسم شده است. همانطور که گفته شد نویز اضافه شده نویز سفید با توزیع یکنواخت می باشد.

در شکل های ۱۲ و ۱۳ مقدار زمان صعود جریان پای کانال برابر $1 \mu\text{sec}$ و زمان پشت برابر $30 \mu\text{sec}$ در نظر گرفته

شده است. با توجه به جریان پای کانال با زمان صعود و زمان پشت معینی، میدان های الکترومغناطیسی در فواصل مختلف به دست می آیند. سپس این میدان ها با توان های مختلف نویز سفید که به آنها اضافه می شود به ورودی شبکه عصبی داده می شوند. در شکل شماره ۱۴ خطای ناشی از شبکه آموزش یافته به ورودی شبکه که میدان الکترومغناطیسی در فاصله ۱ کیلومتری از کانال صاعقه به ازاء مقادیر مختلف توان نویز می باشد نشان داده شده است. در این حالت زمان صعود برابر $1 \mu\text{sec}$ و زمان پشت جریان پای کانال $10 \mu\text{sec}$ اختیار شده است. همانطور که از شکل ۱۴ مشاهده می گردد با افزایش توان نویز خطای شبکه به ورودی شده بیشتر می گردد. اما نکته قابل توجه این است که با این افزایش توان، خطای شبکه همچنان کمتر از ۱ کیلومتر است. علت این امر نیز تمایز کافی بین خصوصیات میدان های الکترومغناطیسی در فواصل نزدیک می باشد. در فواصل نزدیک همانطور که اشکال ۴ و ۵ و ۶ نشان می دهند تغییرات شدید تر است حال آنکه تغییرات شکل میدان ها در فواصل دور (بالا تر از ۵۰ کیلومتر) بسیار کم می باشد و میدان ها بسیار بهم شبیه می باشند. با توجه به شکل ۱۵ این موضوع خود را بهتر نشان می دهد. در این شکل خطای شبکه به ازاء توان های مختلف نویز تا ماکزیمم ۱ درصد نشان داده شده است. در اینجا نیز خطای شبکه به طور نسبی با افزایش توان نویز افزایش می یابد. همانطور که مشاهده می شود با وجود اینکه توان نویز در این حالت نسبت به شکل ۱۴ کمتر است ولی خطای شبکه از ۱ کیلومتر بیشتر شده است. با افزایش فاصله این افزایش خطا خود را بیشتر نشان می دهد و حتی به ازاء توان نویز بسیار کم در فواصل بالاتر از ۵۰ کیلومتر خطا زیاد است.

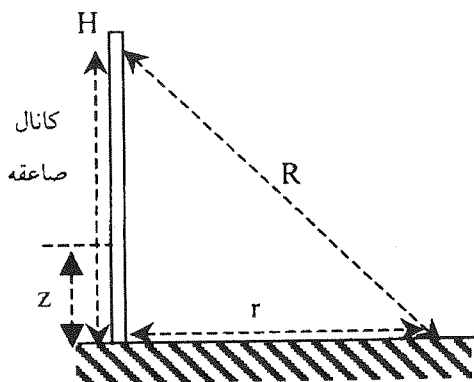
با توجه به اینکه در کاربردهای عملی، فیلتر به عنوان یک قسمت از مدار الکترونیکی نقش مهمی را در حذف سیگنال نویز دارا است، در آخرین قسمت عملکرد شبکه را برای سیگنال فیلتر شده مورد بررسی قرار می دهیم. برای این منظور سیگنال نویزی شده را که به نویز سفید با توزیع یکنواخت آغشته است را توسط یک فیلتر باترورث با فرکانس قطع ۱ مگاهرتز، فیلتر می کنیم. این عمل باعث می شود که اثر نویز فرکانس بالا کمتر شود. در شکل های ۱۶ و ۱۷، میدان های الکترومغناطیسی حاصل، پس از عبور فیلتر نشان داده شده است.

در شکل ۱۸ خطای شبکه عصبی به میدان الکترومغناطیسی نویزی در فاصله ۱ کیلومتری و به ازاء توان های مختلف نویز نشان داده شده است. در این شکل همانند حالت قبل خطای شبکه همچنان کمتر از ۱ کیلومتر است. در شکل ۱۹ خطای شبکه عصبی به میدان در فاصله

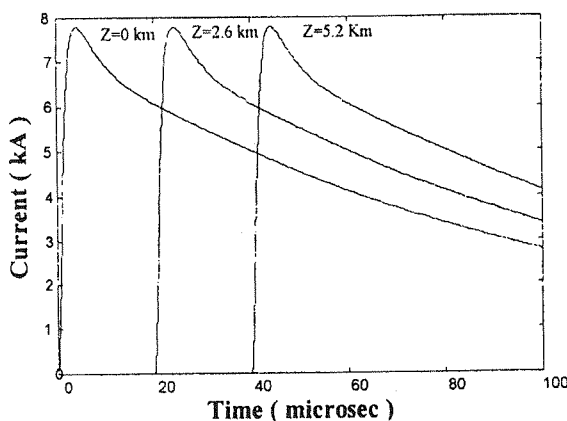
لازم برای آموزش شبکه عصبی، از مدل خط انتقال جهت تهیه داده‌های لازم استفاده نمودیم. نتایج محاسبات نشان می‌دهد که در صورتیکه داده‌های لازم به طور مناسب به شبکه عصبی داده شوند، یادگیری به صورت مطلوب انجام می‌پذیرد. شبکه آموزش دیده برای این مدل به خوبی فاصله یابی صاعقه را انجام می‌دهد و خطای شبکه در بدترین حالت از ۱ کیلومتر تجاوز نمی‌کند.

جدول (۱) مقادیر مختلف پارامترهای کانال.

حالت	پارامتر متغیر τ_1, τ_3 (μSEC)	مقدار زمان صعود و زمان پشت (μSEC)	دامنه جریان KA
۱	۲۵/۳ و ۲۴۵/۳	۱ - ۱۰	۹/۹۰۹
۲	۲۲۳/۱ و ۸۱/۱	۱ - ۳۰	۱۰/۱۹
۳	۳/۷۷ و ۱۲/۹۹	۵ - ۱۰	۴/۵۹۲
۴	۲/۶ و ۴۵	۵ - ۳۰	۶/۴۴۸



شکل (۱) مدل آنتن مونوپل برای کانال صاعقه.



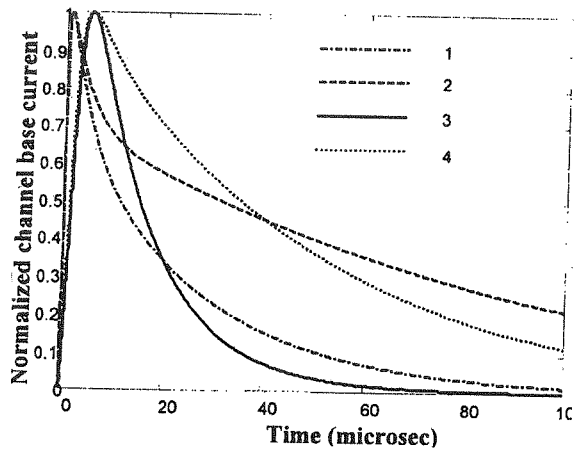
شکل (۲) اثر تغییر پارامترها بر روی شکل موج جریان پای کانال.

۱۰ کیلومتری نشان داده شده است. در هر دو شکل یک افزایش نسبی در خطای شبکه به ازاء افزایش توان نویز نیز مشاهده می‌شود. در این حالت با توجه به رفتار آرامتر نویز خطای شبکه در فاصله ۵۰ کیلومتری نیز رسم شده است. همانطور که از شکل ۲۰ نیز مشاهده می‌شود در این حالت علیرغم اینکه توان نویز بسیار کم می‌باشد ولی باز هم خطای شبکه به سیگنال نویزی بیشتر از ۱ کیلومتر شده است، حال آنکه سیگنال بدون نویز تا فاصله ۸۰ کیلومتری دارای خطای کمتر از ۱ کیلومتر است.

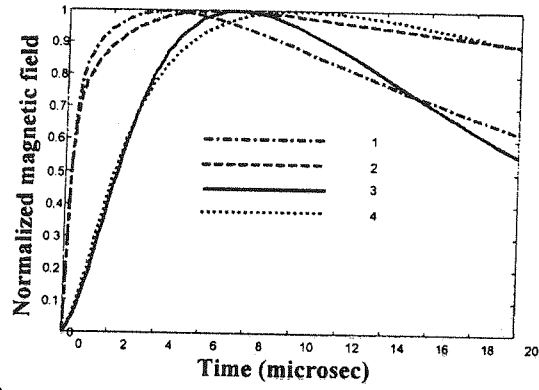
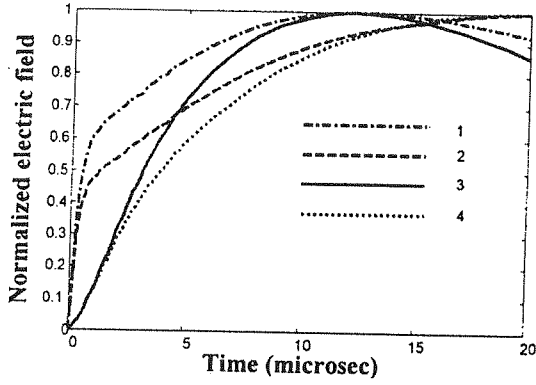
شبکه آموزش یافته نسبت به نویز در فواصل مختلف حساسیت‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهد. در واقع این شبکه در فواصل پایین از حساسیت کمی نسبت به نویز برخوردار است و مقدار نویز اضافه شده در این فواصل اثر بسیار کمی در خطای حاصل از شبکه دارد. علت این امر نیز به خاطر تمایز کافی بین بردارهای ورودی در این فاصله‌ها می‌باشد. اما در فواصل دور که خصوصیات میدان‌های الکترومغناطیسی بسیار به هم نزدیک می‌شوند و تمایز کمی بین آنها وجود دارد حساسیت شبکه به نویز بسیار بالا است و حتی مقدار توان نویز بسیار کم، خطای حاصل از شبکه زیاد است. در اصل همین نزدیک بودن بردارهای ورودی در فاصله‌های بالا باعث سختی یادگیری شبکه می‌باشد و عمل یادگیری عملاً در فواصل بالاتر از ۸۰ کیلومتر امکان پذیر نیست. این امر در شکل ۲۱ نشان داده شده است. در اینجا به ازاء ۰/۱ درصد توان نویز، خطای شبکه به ورودی‌های مختلف از فاصله ۱ تا ۸ کیلومتر محاسبه شده است. از شکل نشان داده شده مشخص است که با افزایش فاصله خطای شبکه نیز افزایش می‌یابد و این یک امر طبیعی است.

۴- نتیجه گیری

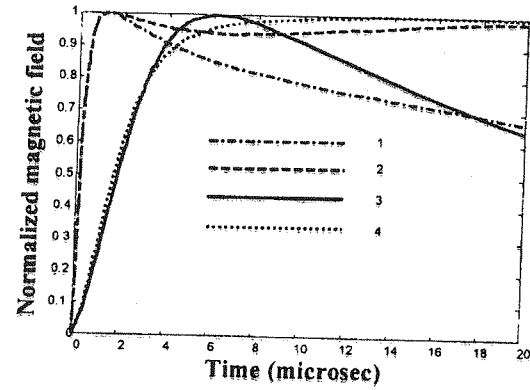
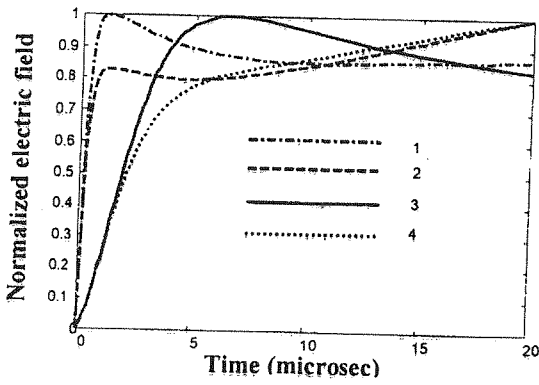
یکی از مسائل مهم در زمینه تحقیقات صاعقه، پیدا کردن دقیق وقوع صاعقه می‌باشد. امروزه در بسیاری از مناطق دنیا از روش‌های متعددی برای فاصله یابی سود برده می‌شود و در تمامی این روش‌ها از چندین ایستگاه در نقاط مختلف برای تعیین موقعیت فاصله استفاده می‌گردد. اما مشکل عمده در تمامی این روش‌ها، هزینه بسیار زیاد برای طراحی و نصب ایستگاه‌ها و متعاقب آن همزمانی تمامی ایستگاه‌های سنجش صاعقه می‌باشد. بنابراین مطالب فوق، در این مقاله هدف امکان پذیری فاصله یابی صاعقه با استفاده از تنها یک ایستگاه می‌باشد. در این راستا با توجه به اینکه، شکل میدان‌های الکترومغناطیسی با فاصله در حال تغییر است، از ایده شبکه‌های هوشمند جهت تخمین فاصله سود برده شده است. اما با توجه به کمبود داده‌های عملی



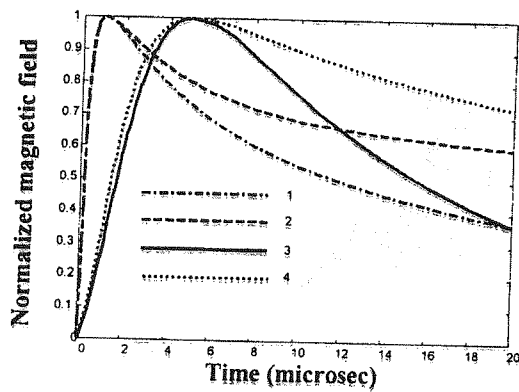
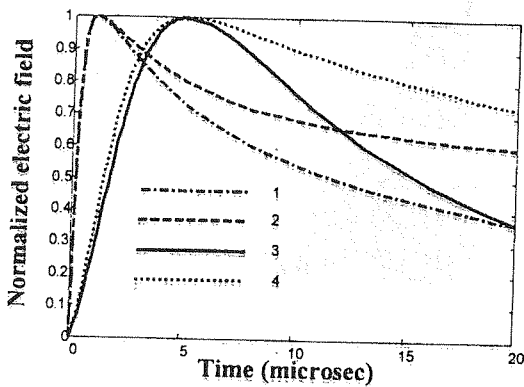
شکل (۳) توزیع زمانی - مکانی جریان کانال صاعقه برای مدل TL.



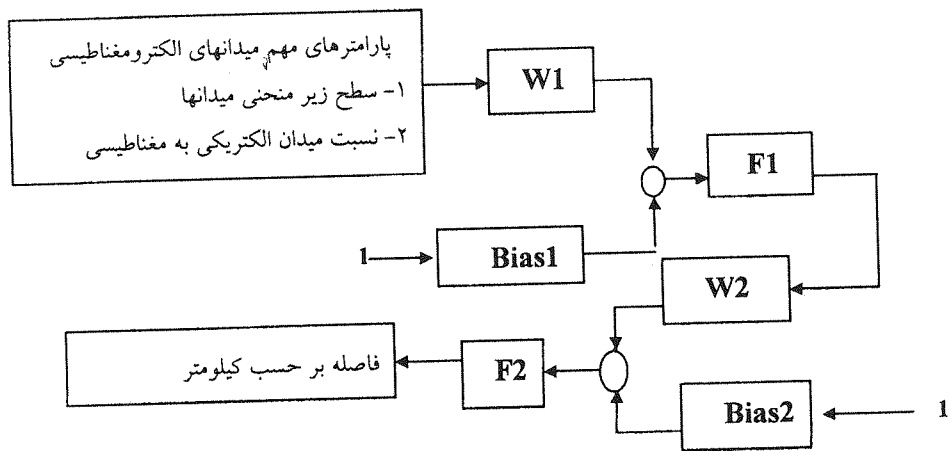
شکل (۴) میدان های الکترومغناطیسی در فاصله ۱ کیلومتری از کانال صاعقه برای مدل TL.



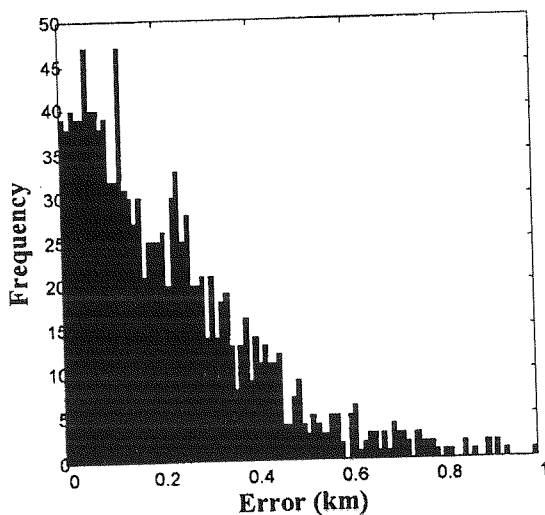
شکل (۵) میدان های الکترومغناطیسی در فاصله ۵ کیلومتری از کانال صاعقه برای مدل TL.



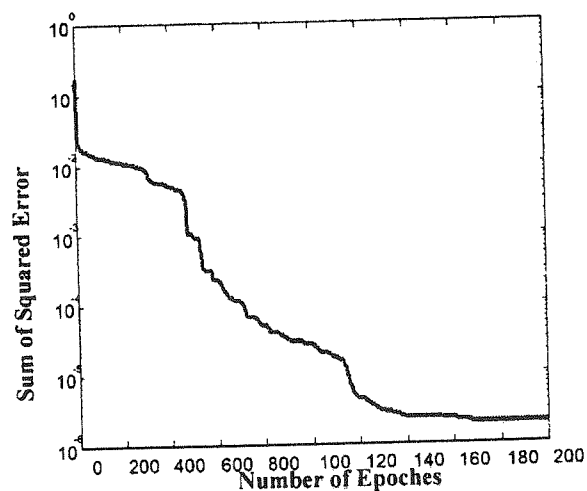
شکل (۶) میدان های الکترومغناطیسی در فاصله ۱۰۰ کیلومتری از کانال صاعقه برای مدل TL.



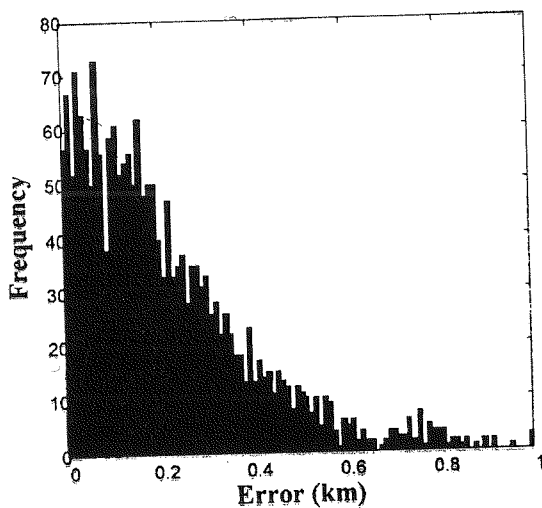
شکل (۷) شمای کلی شبکه عصبی پرسپترون چند لایه.



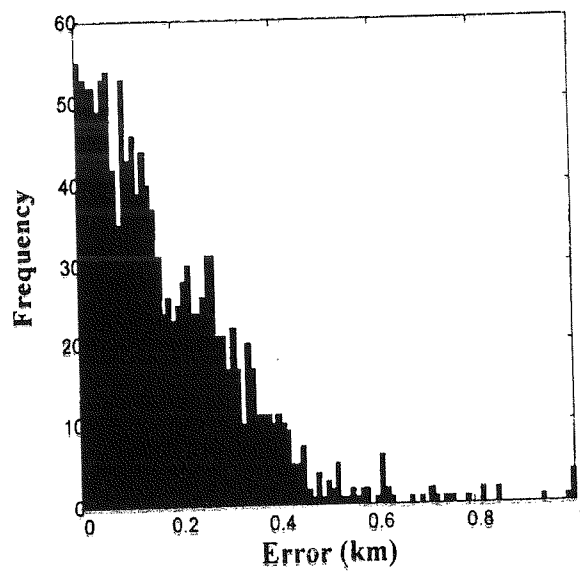
شکل (۱۰) هیستوگرام داده‌های اعتباری برای مدل TL.



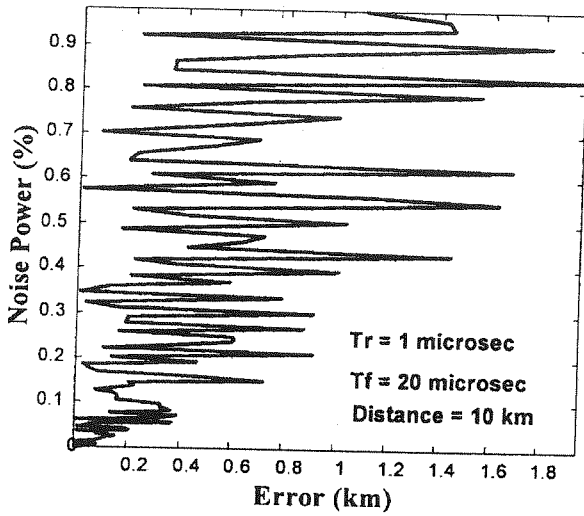
شکل (۸) منحنی تغییرات مجموع مربعات خطا برای داده‌های آموزشی.



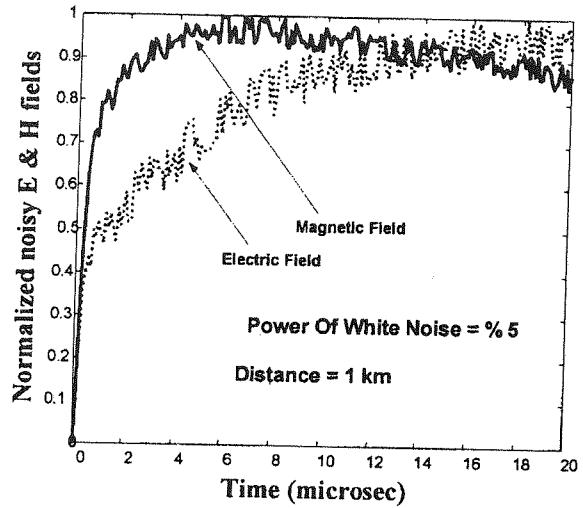
شکل (۱۱) هیستوگرام داده‌های تست برای مدل TL.



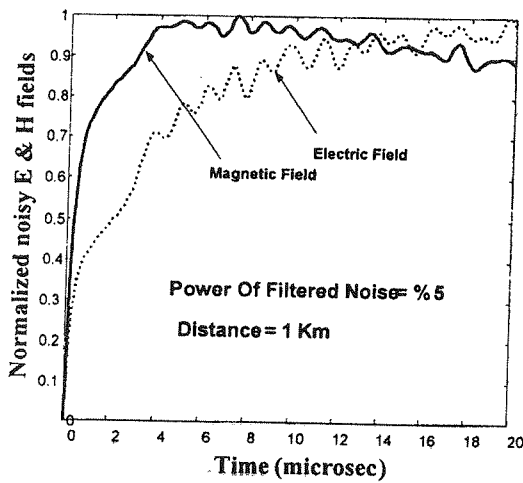
شکل (۹) هیستوگرام داده‌های آموزشی برای مدل TL.



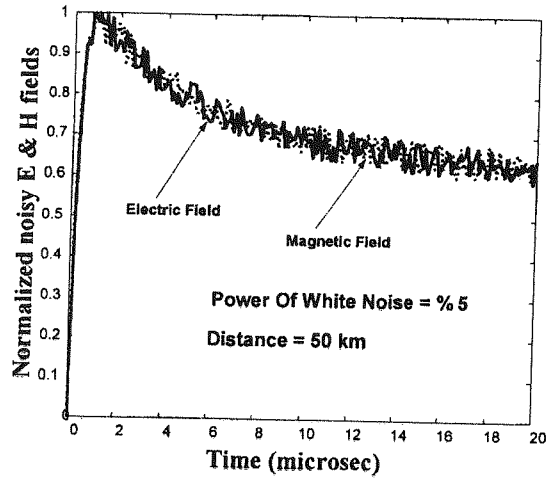
شکل (۱۵) خطای شبکه عصبی به سیگنال نویزی شده در فاصله ۱۰ کیلومتری از کانال ساعتی.



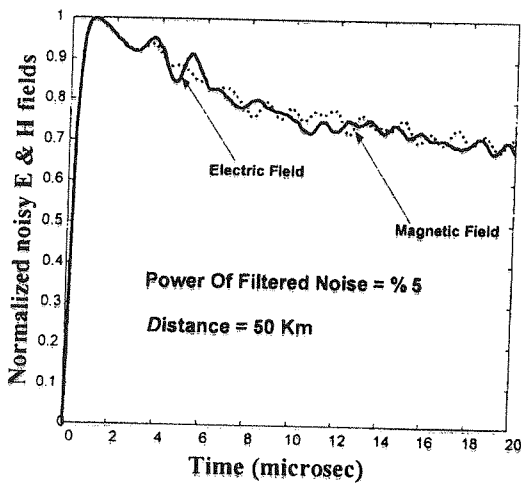
شکل (۱۲) میدان های الکترومغناطیسی نویزی شده در فاصله ۱ کیلومتری.



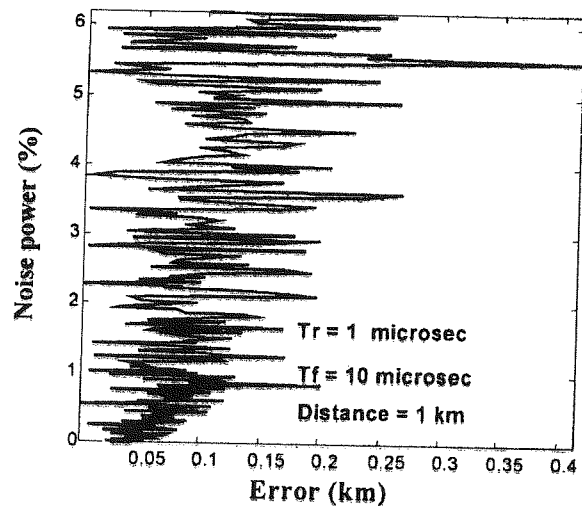
شکل (۱۶) میدان های الکترومغناطیسی نویزی شده پس از عبور از فیلتر در فاصله ۱ کیلومتری.



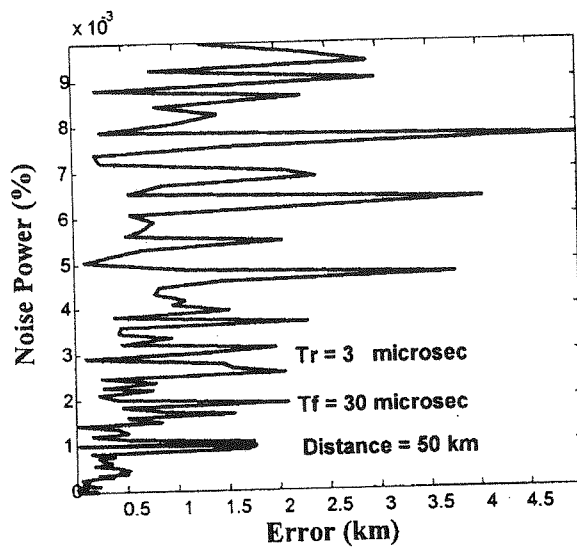
شکل (۱۳) میدان های الکترومغناطیسی نویزی شده در فاصله ۵۰ کیلومتری.



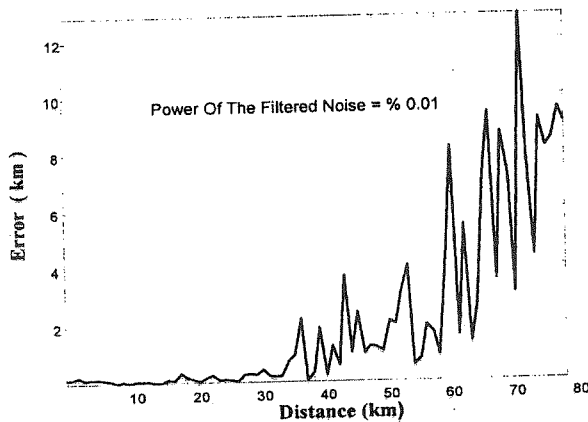
شکل (۱۷) میدان های الکترومغناطیسی نویزی شده پس از عبور از فیلتر در فاصله ۵۰ کیلومتری.



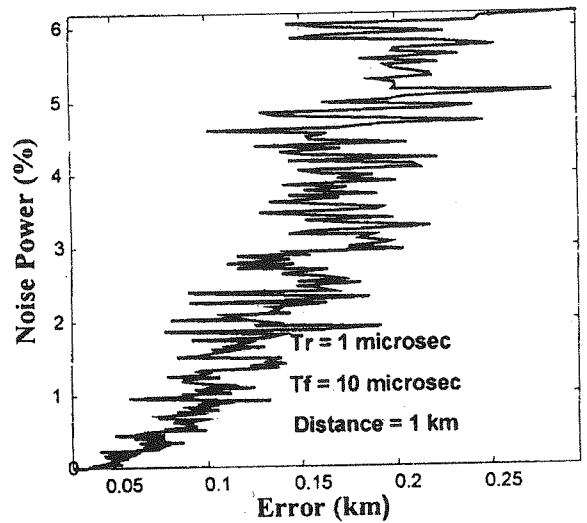
شکل (۱۴) خطای شبکه عصبی به سیگنال نویزی شده در فاصله ۱ کیلومتری از کانال ساعتی.



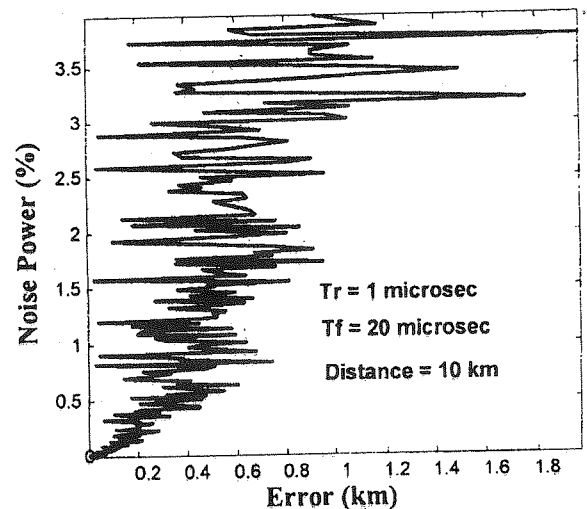
شکل (۲۰) خطای شبکه عصبی به سیگنال نویزی فیلتر شده در فاصله ۵۰ کیلومتری از کانال ساعت.



شکل (۲۱) بررسی حساسیت شبکه به بردارهای نویزی ورودی.



شکل (۱۸) خطای شبکه عصبی به سیگنال نویزی فیلتر شده در فاصله ۱ کیلومتری از کانال ساعت.



شکل (۱۹) خطای شبکه عصبی به سیگنال نویزی فیلتر شده در فاصله ۱۰ کیلومتری از کانال ساعت.

مراجع

- [1] M. A. Uman, Lightning discharge Academic Press, New York 1987.
- [2] R. H. Golde, A Lightning Flash Counter, Electron. Eng., 38, 1966.
- [3] Kenneth L. Cummins, E. Philip Krider, and Mark D. malone, The National Lightning Detection And Applications Of Cloud-to-Ground Lightning Data By Electric Power Utilities, IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. Vol. 40, No. 4, November 1998.
- [4] E.P. Krider, R. C. Noggle, and M. A. Uman, A gated Wideband Magnetic Direction-Finder For Lightning Return Strokes, J. Appl. Meteor., Vol. 15, pp. 301-306, 1976.
- [5] P.W. Casper and B. Bent, Results From The LPATS U.S.A. National Lightning Detection and Tracking System For The 1991 Lightning Season, Peresented at 21 th ICLP International Conference on Lightning Protection, Berlin, Germany, 1992.
- [6] E. A. Lewis, R. B. Harvey, and J. E. Rasmussen, Hyperbolic Direction Finding With Sferics Of Transatlantic Origin, J. Geophys. Res., Vol. 65, pp. 1879-1905, 1960.
- [7] Kenneth L. Cummins, edward A. Bardo, William L. Hiscox, Richard B. Pyle, Albur E. Pifer, E. P. Krider, A Combined ToA/MDF Technology Upgrade Of The U.S. National Lightning Detection Network, (ICLP) International

- Conference on Lightning Protection, pp. 19-24, 1996.
- [۸] روزبه معینی و سید حسین صادقی، اندازه گیری مستقیم صاعقه با استفاده از میدان های الکترومغناطیسی ناشی از آن، مجموعه مقالات سیزدهمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۷۷.
- [۹] روزبه معینی مازنداران، سید حسین صادقی، علیرضا مهانفر، سیامک بنیادی رام، اندازه گیری و محاسبه میدان الکتریکی تولید شده ناشی از برخورد صاعقه با زمین، مجموعه مقالات چهاردهمین کنفرانس بین المللی برق، ۱۳۷۸.
- [10] M. Master, and M. A. Uman, Lightning Induced Voltages On Power Lines, IEEE Trans. Power Appar. Syst., 1984.
- [۱۱] بهزاد کردی، پایان نامه دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۷۹.
- [12] R. Moini, B. Kordi, V. A. Rakov, and G. Z. Rafi, A New Lightning Return Stroke Model Based On Antenna Theory, Journal of Geophysical Research, N. 105, pp24, 693-25, 702, 2000.
- [13] F. Heidler, Lightning Electromagnetic Impulse, Thesis dissertation, Fakultat der Electrotechnik, Universitat der Bundeswehr, Munchen, 1987.
- [14] V. A. Rakov and M. A. Uman, Review And Evaluation Of Lightning Return Stroke Models Including Aspects Of Application, IEEE Trans. EMC, Vol.40, No.4, pp. 403-426, 1998.
- [۱۵] دکتر محمد باقر منهج، هوش محاسباتی (مبانی شبکه های عصبی)، شهریور ۱۳۷۷.
- [16] Martin T. Hagan, and Mohammad B. Menhaj. Training Feedforward Networks With Marquardt Algorithm. IEEE Transaction on neural net, Vol 5. No. 6. Nov 1994, pp. 989-993.
- [17] K. Hornik, M. Stinchombe and H. White, Multilayer Feedforward Networks Are Universal Approximations, Neural Networks, Vol. 2, 1989.
- [18] S. A. Emamghoreishi, R. Moini, S. H. H. Sadeghi, M. B. Menhaj, A Novel Neuro-Based Approach For Predicting The Location Of Cloud-to-Ground Lightning Return Strokes, in proc. International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Zurich, Switzerland, February 2001.