

کاهش اثر بازگشتی لایه‌های تطبیق کامل جهت بهبود دقت روش تفاضل محدود حوزه زمان در سنجش از دور محیط‌های الکترومغناطیسی نامحدود دارای سطوح ناهموار تصادفی

امیراشکان درویش^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ بیژن ذاکری گتایی^۲، دانشیار؛ نفیسه رادکانی^۳، دانشجوی دکتری

۱- گروه مخابرات دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - amir.darvish@stu.nit.ac.ir

۲- گروه مخابرات دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - zakeri@nit.ac.ir

۳- گروه مخابرات دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - بابل - ایران - nafis_r68@yahoo.com

چکیده: شبیه‌سازی محیط‌هایی با ابعاد نامحدود جهت انتشار امواج الکترومغناطیسی، موجب استفاده بیش از حد از منابع محدود کامپیوتری می‌شود. لذا، استفاده از جاذب‌هایی با قدرت جذب بالا یکی از پرچالش‌ترین مباحث مطرح‌شده در شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی انجام‌شده با روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) به‌شمار می‌آید. حضور جاذب‌های ضعیف باعث بازتاب امواج به درون محیط آزمون و در نتیجه بروز نتایجی غیرواقعی می‌شود. این مقاله به‌منظور بهبود جذب امواج الکترومغناطیسی، به معرفی یک رویکرد تازه در جاذب‌ها می‌پردازد تا استفاده هم‌زمان محیط‌های جاذب را با یک معادله مرزی پیشنهادشده ممکن سازد. با این راهکار، اثر هادی کامل انتهای محیط‌های جاذب، کاهش یافته و فرایند جذب بهبود می‌یابد. برای بررسی این روش، از آزمون سطح ناهموار تصادفی نامحدود به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مسائل حوزه سنجش از دور استفاده می‌شود. این آزمون شبیه‌ساز یک محیط واقعی در شرایطی آزمایشگاهی به همراه سطح ناهموار تصادفی با توزیع گاوسی و منبع نقطه‌ای است. همچنین در کلیه مراحل آزمون، خطای نسبی روش معرفی‌شده با خطای جاذب‌های سنتی مقایسه شده، و برتری و سهولت پیاده‌سازی روش ارائه‌شده، اعتبارسنجی می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: سطوح ناصاف تصادفی، سنجش از راه دور، روش‌های عددی در الکترومغناطیس، محیط‌های نامحدود، جاذب‌های عددی.

Reduction of the Perfectly Matched Layer Reflection Effects to Improve the FDTD Accuracy in Remote Sensing of Infinite Electromagnetic Media with Random Rough Surfaces

A.A. Darvish¹, MSc Student; B. Gatabi Zakeri², Associate Professor; N. Radkani³, PhD Student

1- Department of Electrical and Computer Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran, Email: amir.darvish@stu.nit.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: zakeri@nit.ac.ir

3- Department of Electrical and Computer Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran, Email: nafis_r68@yahoo.com

Abstract: Simulation of unbounded media always necessitates inordinate usage of computer resources. So, using of absorbers with high absorption performance is one of the most important challenges in electromagnetic simulations of the finite difference time domain (FDTD) method. Weak absorbers can cause some reflected waves into the simulation medium and consequently non-realistic results. To improve the absorption of electromagnetic waves, this paper introduces a new approach in absorbers to provide a simultaneous use of the absorbing media with a proposed boundary equation. This approach reduces the perfect electric conductor effects at the end of the absorbing media and enhances its absorption performance. To analyze this method, we utilize a rough surface test procedure as one of the most useful problems in remote sensing. This test simulates a real media in laboratory conditions with Gaussian rough surface and point source. In addition, the relative error of the new method will be compared to the other conventional methods, and effectiveness of the proposed method will be validated.

Keywords: Rough surface, remote sensing, numerical methods in electromagnetics, infinite media, numerical absorbers.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۱۷

نام نویسنده مسئول: بیژن ذاکری گتایی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بابل - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - گروه مخابرات.

۱- مقدمه

روش عددی تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) یکی از ابزارهای قدرتمند در حل معادلات دیفرانسیل می‌باشد که به‌صورت گسترده در شبیه‌سازی عددی پدیده‌های الکترومغناطیسی و مسائل سنجش از دور کاربرد دارد [۱-۳]. یکی از چالش‌های بزرگ در پیاده‌سازی این روش ایجاد شرایطی برای جذب کامل امواج الکترومغناطیسی است، به‌طوری‌که بتوان محیطی محدود را طوری طراحی کرد که دارای ویژگی‌های محیط‌های نامحدود با ابعاد بی‌نهایت باشد. این کار مانع از استفاده بیش از حد منابع کامپیوتری شده و در نتیجه بررسی مسائل الکترومغناطیسی را با استفاده از سیستم‌های کامپیوتری حال حاضر، ممکن می‌سازد.

تاکنون روش‌های بسیار زیادی برای حل این چالش معرفی شده‌اند. یکی از اولین جذب‌های معرفی شده در این حوزه توسط آقای مور^۱ برای مسائل الکترومغناطیسی توسعه داده شد [۴]. این جذب عملکرد نسبتاً خوبی را در محیط FDTD از خود نشان داد، اما در جذب امواج با زاویه تابش نزدیک به ۹۰ درجه دارای مشکلات بحرانی بود. پس از مور، هیگدون^۲ به معرفی مفهومی تازه از جذب‌ها بر مبنای استفاده از اوپراتورهای نابودکننده^۳ پرداخت [۵]. جذب معرفی شده توسط هیگدون دارای قابلیت جذب زوایای تابش دلخواه می‌باشد، اما این نوع جذب نیاز به داشتن دانش قبلی از زوایای برخورد امواج به دیواره‌های جذب بوده که امری غیرممکن محسوب می‌گردد. در این راستا، راماهی^۴ نیز با بهره‌گیری از روش اوپراتورهای تکمیل‌کننده تلاش کرد تا عملکرد جذب‌های الکترومغناطیسی را بهبود بخشد [۶]. جذب ارائه شده توسط راماهی هرچند عملکرد بهتری را نسبت به جذب‌های پیشین داشته، اما دقت شبیه‌سازی‌های انجام شده نسبت به شبیه‌سازی در یک محیط با ابعاد بی‌نهایت، راضی‌کننده نبود.

در کنار مطالعات زیاد انجام شده برای ایجاد شرایط مرزی جذب، لایه‌های تطبیق کامل^۵ (PML) که توسط برنگر^۶ معرفی شده‌اند [۷] از عملکردی به مراتب بهتر در روش عددی FDTD برخوردارند. این لایه‌ها که به‌صورت فیزیکی محیط شبیه‌سازی را احاطه می‌کنند، قادر به جذب مقادیر قابل توجهی از امواج برخورد کننده بوده و زوایای برخورد امواج تأثیری در عملکرد آن‌ها ندارد. با وجود برتری قابل توجه PML معرفی شده توسط برنگر نسبت به جذب‌های پیشین، این جذب دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد که از جمله‌ی این ضعف‌ها، می‌توان به عدم جذب امواج میراث‌شونده و نیازمندی آن به دور بودن از پراکنده‌سازها اشاره کرد. لایه‌های تطبیق کامل تک‌محوره^۶ (UPML) [۸]، لایه‌های تطبیق کامل معادلات دیفرانسیل کمکی^۸ (ADE-PML) [۹]، لایه‌های تطبیق کامل شیفت فرکانسی (CFS-PML) [۱۰]، لایه‌های تطبیق کامل کانولوشنی^۹ (CPML) [۱۱] و لایه‌های تطبیق کامل مراتب بالاتر [۱۲] بخشی از دیگر انواع لایه‌های تطبیق کامل می‌باشند که تاکنون معرفی شده‌اند. در بین موارد نام برده، جذب‌های CPML دارای قدرت جذب بالاتر و سهولت بیش‌تر در پیاده‌سازی هستند.

فعالیت‌های انجام شده در حوزه‌ی بهبود عملکرد جذب‌ها و معرفی جذب‌هایی نو تنها به موارد فوق خلاصه نمی‌شود. برای مثال در [۱۳] یک رویکرد جدید از یک جذب محلی مرتبه بالا با نام NRBC معرفی و بازبینی شده است که فاقد مشتقات مراتب بالاتر در معادلات کمکی مربوط به خود می‌باشد. در [۱۴] یک مقایسه‌ی جامع بین عملکرد جذب‌های مراتب دوم و جذب‌های PML معمولی و CFS-PML انجام شده است. هرچند لایه‌های تطبیق کامل مراتب بالاتر اخیراً مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند، اما همچنان جذب‌های CPML و UPML به علت سهولت در پیاده‌سازی، از بیشترین محبوبیت در بین مهندسان و سازمان‌های تولیدکننده نرم‌افزارهای تجاری شبیه‌ساز الکترومغناطیسی برخوردارند.

این مقاله به‌منظور بهبود عملکرد جذب‌های CPML و UPML، بر فیزیک گسسته‌سازی شده آن‌ها دست گذاشته و به تحلیل پارامترهای ساختاری آن‌ها می‌پردازد. در این راستا، از یک شرط مرزی برای حذف اثرات انتهایی آن‌ها استفاده کرده که در کنار انتخاب مناسب پارامترهای CPML، می‌تواند به‌طور موثری به جذب امواج، به‌ویژه در حالت ماندگار کمک کند. بررسی اعتبار روش ارائه شده از طریق محاسبه خطای نسبی جذب در دو نقطه متفاوت از یک محیط که دارای سطح ناهموار تصادفی است انجام خواهد شد. علت تمرکز این مقاله بر سطوح ناهموار تصادفی را می‌توان در درجه اول، کثرت اینگونه سطوح در طبیعت و کاربرد بسیار زیاد آن‌ها در حوزه سنجش از راه دور و فرکانس بالا دانست. علاوه بر این، بهبود دقت میدان‌های راه نزدیک روی سطح هایگنس^{۱۰} موجب بهبود میدان‌های راه دور اندازه‌گیری شده از این سطوح می‌شود که کاربرد زیادی در مباحث راداری و سنجش از دور دارد. به همین علت این سطوح به‌طور گسترده با استفاده از روش FDTD مورد بررسی محققان قرار گرفته‌اند [۱۵-۱۸]. در درجه دوم به علت تأثیر منفی پراکنده‌سازهای تصادفی بر قدرت جذب جذب‌های عددی [۱۹]، حضور یک پراکنده‌ساز تصادفی، نیاز مبرمی به افزایش دقت میدان‌های راه نزدیک سنجش شده به وجود می‌آورد. به بیانی صریح‌تر، حضور پراکنده‌سازهای تصادفی همچون سطح ناهموار نه تنها مسئله را از حالت خاص خارج می‌کند، بلکه سبب دشوارتر شدن فرایند جذب در جذب‌ها می‌شود. به این ترتیب، روش ارائه شده در سخت‌ترین شرایط، صحت آزمایی شده و در نتیجه، این آزمون ما را از به‌کارگیری آزمون‌های ساده‌تر بی‌نیاز می‌کند. در این راستا، در طول آزمون سطح ناهموار یادشده، مقدار خطای نسبی جذب برای دو جذب CPML و UPML در حضور یک سطح ناهموار تصادفی و منبع نقطه‌ای گاوسی محاسبه شده و عملکرد جذب‌های بهبودیافته با جذب‌های سنتی مقایسه خواهد شد. نتایج حاکی از آن هستند که اعمال شرط مرزی مناسب در جذب‌ها می‌تواند موجب بهبود عملکرد جذب و افزایش دقت میدان‌های راه نزدیک محاسبه شده در محیط FDTD باشند. همچنین با محاسبه میدان‌ها روی سطح هایگنس می‌توان دریافت که بهبود جذب‌ها بر دقت میدان‌های روی این سطح تأثیر محسوس خواهد داشت.

معادلات به‌روزرسانی UPML برای شش مؤلفه میدان قابل دستیابی هستند.

۲-۲- لایه‌های تطبیق کامل کانولوشنی (CPML)

جاذب CPML با بهره‌گیری از پارامترهای CFS-PML و خاصیت کانولوشن، دارای قدرت جذبی بالا بوده و قابلیت پیاده‌سازی در تمام محیط‌ها از جمله غیرخطی، ناهمگن، غیر هم‌سویکسان و متفرق‌کننده^{۱۱} را دارا می‌باشد. با توجه به روابط مربوط به جاذب SC-PML^{۱۲} که در [۲۲] معرفی شده است، داریم:

$$j\omega\epsilon E_x + \sigma E_x = \frac{1}{s_y} \frac{\partial}{\partial y} H_z - \frac{1}{s_z} \frac{\partial}{\partial z} H_y \quad (7)$$

که در آن E_x ، H_y و H_z به ترتیب، میدان‌های الکتریکی در راستای محور x ، میدان مغناطیسی در راستای محور y و محور z می‌باشد. پارامترهای ω ، ϵ و σ به ترتیب بیانگر فرکانس زاویه‌ای، گذردهی الکتریکی و رسانایی الکتریکی محیط می‌باشد. پارامتر S_w ماتریس مختصات بسط داده‌شده می‌باشد که توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$s_u = k_u + \frac{\sigma_u}{\alpha_u + j\omega\epsilon_0}, (u = x, y, z) \quad (8)$$

که در آن σ_u رسانایی در جهت u بوده و α_u و k_u به ترتیب یک عدد مثبت و یک عدد بزرگ‌تر از ۱ می‌باشند. انتخاب صحیح این پارامترها تأثیر به‌سزایی در عملکرد جاذب خواهد داشت.

معادله (۷) در حوزه فرکانس می‌تواند بر مبنای رفتار وابسته به فرکانس S_w به‌صورت زیر نوشته شود [۲۳]:

$$\epsilon \frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x = \frac{1}{k_y} \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{1}{k_z} \frac{\partial H_y}{\partial z} + \psi_{hzy} - \psi_{hyz} \quad (9)$$

که در آن ψ_{hzy} و ψ_{hyz} به معادلات کمکی معروف بوده و به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\psi_{hzy} = \xi_y(t) * \frac{\partial H_z}{\partial y} \quad (10)$$

$$\psi_{hyz} = \xi_z(t) * \frac{\partial H_y}{\partial z} \quad (11)$$

معادلات کمکی فوق با استفاده از روابط بازگشتی قابل ساده‌سازی هستند. با گسسته‌سازی روابط فوق برای شش مؤلفه میدان، معادلات به‌روزرسانی عددی CPML محاسبه خواهند شد.

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد جاذب‌های فوق، σ_u یا همان توزیع رسانایی در عمق جاذب می‌باشد. نشان داده شده که برای ایجاد عملکرد خوب در جاذب نیاز است این پارامتر به‌صورت زیر تعریف شود [۲]:

$$\sigma_u(u) = \sigma_{\max} \left(\frac{u}{d} \right)^m \quad (12)$$

که در آن d ، σ_{\max} و m به ترتیب، عمق جاذب، ماکزیمم رسانایی در عمق جاذب و مرتبه توزیع می‌باشند. این نوع توزیع که به توزیع چندجمله‌ای معروف است، لازم می‌دارد که مقدار رسانایی در ابتدای

سازمان‌دهی مقاله مورد بحث به‌صورت زیر خواهد بود:

بخش ۲ به‌ارائه مفاهیمی از جاذب‌های CPML و UPML می‌پردازد تا مقدمات لازم برای معرفی روش پیشنهادی را فراهم سازد. در بخش ۳ مسئله مصالحه خطای بازتاب و خطای گسسته‌سازی مطرح می‌شود. بخش ۴ شامل معرفی روش شرط مرزی برای بهبود اثر بازگشتی و تحلیل پارامتری لایه‌های تطبیق کامل مورد مطالعه خواهد بود. سپس، در بخش ۵، پس از معرفی سطوح ناهموار تصادفی و نحوه تولید آن‌ها، به طراحی یک آزمون عددی با حضور سطح ناهموار تصادفی پرداخته و در انتها، در بخش ۶، به ارائه و بررسی نتایج پرداخته می‌شود.

۲- معرفی موارد مورد مطالعه

۲-۱- لایه‌های تطبیق کامل تک‌محوره (UPML)

این نوع جاذب به‌منظور تبدیل PML چندمحوره برنگر به حالتی نزدیک‌تر به محیط‌های فیزیکی معرفی شده است [۲۰]. همچنین این جاذب دارای قابلیت پیاده‌سازی روی محیط‌های غیر هم‌سویکسان می‌باشد. معادلات تک‌محوره UPML که از معادلات ماکسول استخراج شده است، در حوزه فرکانس برای یک مؤلفه از میدان به‌صورت زیر می‌باشد [۲۱]:

$$j\omega\epsilon_0 \frac{s_y s_z}{s_x} E_x = \frac{\partial}{\partial y} H_z - \frac{\partial}{\partial z} H_y \quad (1)$$

که در آن s_x ، s_y و s_z به ترتیب تنسورهای تعریف‌شده در راستای x ، y و z هستند که از رابطه زیر استخراج می‌شوند.

$$s_u = 1 + \frac{\sigma_u}{j\omega\epsilon_0}, u = x, y, z \quad (2)$$

پارامتر σ_u از جمله پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد UPML می‌باشد. برای تبدیل معادله (۱) به حوزه زمان به کانولوشن نیاز خواهد بود که برای حذف آن متغیر کمکی D_x به‌صورت زیر معرفی شده است:

$$D_x = \epsilon_0 \frac{s_z}{s_x} E_x \quad (3)$$

با متغیر کمکی فوق، معادله (۱) به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

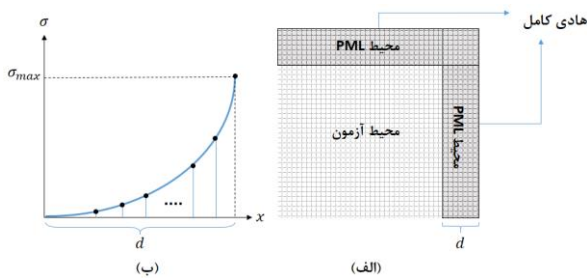
$$j\omega s_y D_x = \frac{\partial}{\partial y} H_z - \frac{\partial}{\partial z} H_y \quad (4)$$

حال با جایگذاری مقادیر مطلق s_x ، s_y و s_z و اعمال تبدیل فوریه معکوس (جایگذاری مشتقات زمانی به جای $j\omega$)، معادلات (۳) و (۴) به‌صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\epsilon_0 \frac{\partial}{\partial t} E_x + \sigma_x E_x = \frac{\partial}{\partial t} D_x + \frac{\sigma_x}{\epsilon_0} D_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} D_x + \frac{\sigma_y}{\epsilon_0} D_x = \frac{\partial}{\partial y} H_z - \frac{\partial}{\partial z} H_y \quad (6)$$

به همین ترتیب می‌توان برای پنج مؤلفه باقی‌مانده میدان، معادلات UPML را به‌صورت فوق استخراج کرد. با گسسته‌سازی روابط فوق،



شکل ۱: اجزای تشکیل دهنده و توزیع پارامتر رسانایی در لایه‌های تطبیق کامل، الف) بخشی از محیط FDTD احاطه شده توسط PML که بخش انتهایی آن به صورت هادی کامل عمل می‌کند. ب) توزیع پارامتر رسانایی با مرتبه دلخواه در عمق PML

$$\sigma_{opt} = \frac{0.8(m+1)}{\eta_0 \Delta \sqrt{\epsilon_{r,eff} \mu_{r,eff}}} \quad (13)$$

که در رابطه فوق m ، Δ و η_0 به ترتیب، مرتبه توزیع، طول مش‌های فضایی و امپدانس ذاتی فضای آزاد می‌باشند. معیار فوق در واقع تنها یک معیار تقریبی بوده که بهبود مناسبی را در خطای لایه‌های تطبیق کامل به همراه دارد و به صورت گسترده در شبیه‌سازی‌های لایه‌های تطبیق کامل مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به مسئله مطرح‌شده، بخش بعد با هدف کاهش خطای گسسته‌سازی در حضور شرط مرزی، به ارائه معیاری دیگر در انتخاب پارامتر فوق می‌پردازد.

۴- حذف اثر بازگشتی انتهایی لایه‌های تطبیق کامل

با کاهش اثر یکی از عوامل قابل مصالحه (خطای بازتاب یا خطای گسسته‌سازی)، می‌توان اثر دیگری را به راحتی تحت کنترل قرار داد. کاهش خطای گسسته‌سازی زمانی ممکن است که بتوان شیب تغییرات پارامتر رسانایی محیط PML را تغییر داد. با توجه به مطالب عنوان‌شده در بخش قبل، می‌توان دریافت که راهکار فوق با حضور اثر هادی کامل انتهایی جاذب بی‌فایده است. بنابراین با کاهش یا حذف اثر هادی کامل که تولیدکننده خطای بازتاب است، می‌توان مقدار σ_{max} را برای به حداقل رساندن خطای گسسته‌سازی تعیین کرد.

در این راستا می‌توان از یک شرط مرزی عددی در انتهایی‌ترین سلول فضای FDTD به‌گونه‌ای استفاده کرد که به جذب یا تضعیف امواج رسیده به انتهایی جاذب بپردازد. به این منظور، با فرض اینکه آخرین نقاط فضای گسسته‌سازی شده روش FDTD، نقاط میدان الکتریکی در نود Nx و اولین نودها در صفر باشند، استفاده از شرط مرزی زیر برای مؤلفه‌های مماسی میدان پیشنهاد می‌شود:

$$E_{\text{tangential}}^{t+1}(0) = E_{\text{tangential}}^t(1) \quad (14)$$

$$E_{\text{tangential}}^{t+1}(Nx) = E_{\text{tangential}}^t(Nx-1) \quad (15)$$

این شرط مرزی علاوه بر جذب امواج رسیده به انتهایی جاذب، بار کامپیوتری بسیار ناچیزی را به روش عددی FDTD تحمیل می‌کند که باعث می‌شود میزان استفاده از منابع کامپیوتری نسبت به حالت قبل تغییری نداشته باشد. در ارتباط با توجیه الکترومغناطیسی عمل جذب

جاذب نزدیک به صفر بوده و با حرکت به سمت عمق جاذب رسانایی افزایش یابد و در انتهای جاذب میزان رسانایی برابر با σ_{max} خواهد بود. به این ترتیب از نظر امیدانسی محیط آزمون با محیط جاذب دارای تطبیق کامل می‌باشد و بازتاب از سطح جاذب به حداقل می‌رسد.

۳- مسئله مصالحه بین خطای گسسته‌سازی و خطای بازتاب

شکل ۱-الف) نشانگر بخشی از یک محیط شبیه‌سازی در FDTD می‌باشد که توسط یکی از خانواده‌های PML احاطه شده است. در داخل محیط یک PML، نقاطی که در انتهای فضای FDTD واقع می‌شوند در معادلات آپدیت شرکت نکرده و دارای مقادیر همواره ثابتی می‌باشند که این پدیده در روش عددی FDTD همانند حضور یک صفحه هادی کامل در انتهای فضا ظاهر می‌شود [۲]. حضور این صفحه باعث بازتاب کامل امواج رسیده به انتهایی لایه PML شده و بخشی از موج‌های تضعیف‌شده انتهایی PML را به سمت محیط آزمون برمی‌گرداند. موج‌های بازگشتی در مسیر برگشت از محیط PML دوباره تضعیف شده و مقادیر بسیار ناچیزی از موج‌های تضعیف‌شده وارد محیط آزمون می‌شوند. در صورتی که امواج با زوایای غیر صفر وارد محیط PML شوند مسیر طولانی‌تری را پیموده و در نتیجه در مسیر رفت و برگشت بیش‌تر تضعیف می‌شوند. اما در صورتی که امواج واردشونده به محیط PML امواجی قوی و در جهت عمود بر دیواره PML باشند، در مسیر رفت و برگشت، مسافت کم‌تری را در محیط جاذب پیموده و در نتیجه کم‌تر تضعیف می‌شوند و این باعث بروز خطای بازتاب^{۱۳} در محیط می‌شود.

یکی از روش‌های کاهش خطای بازتاب ناشی از هادی کامل انتهایی جاذب PML، انتخاب مقادیر بزرگ برای σ_{max} می‌باشد. در این صورت، امواج پیش از رسیدن به هادی کامل انتهایی PML به مقدار زیادی تضعیف شده و به انتهایی آن نمی‌رسند. اما برخلاف انتظار، این کار باعث کاهش خطای بازتاب نخواهد شد. علت این امر در ساختار گسسته‌شده محیط FDTD نهفته است. گسسته‌سازی محیط باعث ایجاد پله‌های فیزیکی ناپیوسته در فضای شبیه‌سازی می‌شود. این ناپیوستگی‌ها زمانی که پارامترهای محیط تغییر کنند، بر امواج تأثیر گذاشته و باعث بازتاب‌های جزئی بسیاری در محیط (محیط آزمون و محیط جاذب) می‌شوند. این بازتاب‌ها سبب ایجاد خطایی بنام خطای گسسته‌سازی در محیط می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱-ب) نشان داده شده است، افزایش بیش‌تر پارامتر σ_{max} باعث افزایش شیب تغییرات رسانایی جاذب شده و ناپیوستگی‌های شدیدتری در محیط PML ایجاد می‌شود که باعث بروز خطای گسسته‌سازی بیش‌تری در محیط خواهد شد.

با توجه به مطالب گفته‌شده، می‌توان دریافت که انتخاب σ_{max} باید به‌گونه‌ای انجام گیرد که بین خطای بازتاب و خطای گسسته‌سازی درون جاذب مصالحه صورت گیرد. از بین فعالیت‌های انجام‌شده در این زمینه آقای برنگر معیار زیر را برای انتخاب σ_{max} معرفی کرده که تضمین می‌کند خطای گسسته‌سازی و خطای بازتاب به حداقل برسند [۷]:

در شرط مرزی، می‌توان گفت که شرط مرزی پیشنهاد شده با پذیرش مقداری تقریب، میدان روی نود انتهایی محیط را برابر با میدان نود قبلی در نظر می‌گیرد و از این طریق، باعث خنثی شدن میدان‌های رسیده به انتهای جاذب می‌شود.

بدیهی است در صورتی که آخرین نقاط، نقاط مربوط به میدان‌های مغناطیسی باشد، از میدان‌های مغناطیسی مماسی به این منظور استفاده خواهد شد. با حضور این شرط مرزی بخشی از امواج رسیده به انتهای PML جذب شده و در نتیجه می‌توان بدون نگرانی از بازتاب امواج رسیده به انتهای جاذب با کاهش مقدار σ_{\max} خطای گسسته‌سازی را کاهش داده و عملکرد جاذب‌های به کار رفته در محیط FDTD را بهبود بخشید. برای توضیح بیش‌تر این روش می‌توان اظهار داشت که کاهش مقدار σ_{\max} علاوه بر کاهش خطای گسسته‌سازی باعث رسیدن امواج بیش‌تری به انتهای جاذب شده و در نتیجه شرط مرزی به جذب امواج رسیده به انتها می‌پردازد. بدیهی است که مقدار σ_{\max} نمی‌تواند خیلی کوچک باشد؛ زیرا کوچک بودن آن باعث رسیدن امواج بسیار قوی به انتهای PML شده و شرط مرزی نمی‌تواند همه آن‌ها را جذب کند.

$$f(x) = \frac{1}{L} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} b_n e^{i \frac{2\pi n x}{L}} \quad (16)$$

در بخش بعد برای بررسی میزان تأثیر این روش در بهبود جذب امواج در حضور سطوح ناهموار تصادفی از یک آزمون هدفمند در حضور یک سطح ناهموار استفاده خواهد شد.

در این روش، برای بررسی میزان تأثیر این روش در بهبود جذب امواج در حضور سطوح ناهموار تصادفی از یک آزمون هدفمند در حضور یک سطح ناهموار استفاده خواهد شد.

$$b_0 = \sqrt{2\pi LW(0)} r_\alpha \quad (17)$$

$$b_{\frac{N}{2}} = \sqrt{2\pi LW\left(\frac{\pi N}{L}\right)} r_\beta \quad (18)$$

$$b_n = \sqrt{\pi LW\left(\frac{2\pi n}{L}\right)} \{r_\sigma + i r_\tau\}; n = -\frac{N}{2} + 1, \dots, -2, -1 \quad (19)$$

$$b_n = b_n^*; n = 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (20)$$

پس از محاسبه مقادیر b_n ، با استفاده از معادله (۱۶)، پروفایل ارتفاع سطح محاسبه خواهد شد.

ذکر این نکته ضروری است که برای مدل کردن سطح ناهموار با توزیع گاوسی از تابع همبستگی گاوسی زیر و چگالی طیفی متناظر آن استفاده می‌شود.

$$C(x) = h^2 e^{-\frac{x^2}{cl_x^2}} \quad (21)$$

$$W(k_x) = \frac{h^2 cl_x}{2\sqrt{\pi}} e^{-\frac{k_x^2 cl_x^2}{2}} \quad (22)$$

که در روابط فوق h و cl_x به ترتیب، ارتفاع مؤثر و طول خودهمبستگی سطح می‌باشند.

۲-۵- فرآیند آزمون

مطابق شکل ۲، یک سطح ناهموار تصادفی با طول خودهمبستگی ۰/۴ و ارتفاع مؤثر ۰/۳ که دارای طول ۱ متر و توزیع گاوسی می‌باشد را در نظر بگیرید. جنس این سطح از نوع خاک دارای گذردهی مطلق ۰/۵ و رسانایی ۰/۰۵ می‌باشد. سطح مذکور در محیطی با ابعاد 100×80 سانتی‌متر قرار دارد به گونه‌ای که ضخامت جاذب‌ها از هر سمت ۱۰ سلول می‌باشد. مقدار طول خودهمبستگی و ارتفاع مؤثر خاک به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که معادل با یک سطح ناهموار طبیعی در ابعاد واقعی عمل کنند. حضور توزیع گاوسی به عمومی‌تر شدن آزمون سطح ناهموار کمک می‌کند. کلیه مقادیر فوق هیچگونه وابستگی به شکل مسئله نداشته و

در شرط مرزی، می‌توان گفت که شرط مرزی پیشنهاد شده با پذیرش مقداری تقریب، میدان روی نود انتهایی محیط را برابر با میدان نود قبلی در نظر می‌گیرد و از این طریق، باعث خنثی شدن میدان‌های رسیده به انتهای جاذب می‌شود.

بدیهی است در صورتی که آخرین نقاط، نقاط مربوط به میدان‌های مغناطیسی باشد، از میدان‌های مغناطیسی مماسی به این منظور استفاده خواهد شد. با حضور این شرط مرزی بخشی از امواج رسیده به انتهای PML جذب شده و در نتیجه می‌توان بدون نگرانی از بازتاب امواج رسیده به انتهای جاذب با کاهش مقدار σ_{\max} خطای گسسته‌سازی را کاهش داده و عملکرد جاذب‌های به کار رفته در محیط FDTD را بهبود بخشید. برای توضیح بیش‌تر این روش می‌توان اظهار داشت که کاهش مقدار σ_{\max} علاوه بر کاهش خطای گسسته‌سازی باعث رسیدن امواج بیش‌تری به انتهای جاذب شده و در نتیجه شرط مرزی به جذب امواج رسیده به انتها می‌پردازد. بدیهی است که مقدار σ_{\max} نمی‌تواند خیلی کوچک باشد؛ زیرا کوچک بودن آن باعث رسیدن امواج بسیار قوی به انتهای PML شده و شرط مرزی نمی‌تواند همه آن‌ها را جذب کند.

در این روش، برای بررسی میزان تأثیر این روش در بهبود جذب امواج در حضور سطوح ناهموار تصادفی از یک آزمون هدفمند در حضور یک سطح ناهموار استفاده خواهد شد.

۵- آزمون سطح ناهموار تصادفی

همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، کاربرد فرکانس بالا در ادوات سنجش از دور سطوح و عکسبرداری‌های مایکروویوی باعث می‌شود که تقریباً همه سطوح موجود در طبیعت از نگاه الکترومغناطیسی، ناهموار تلقی شوند [۲۴]. به همین علت شبیه‌سازی عددی سطوح ناهموار تصادفی بخش قابل توجهی از فعالیت‌های اخیر محققان را به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر، از آنجایی که پیچیدگی پراکنده‌سازها می‌تواند فرایند جذب و در نتیجه دقت میدان‌های استخراج شده از این‌گونه سطوح را تحت تأثیر قرار دهد، استفاده از سطوح ناهموار تصادفی به‌عنوان پراکنده‌ساز در محیط آزمون جهت سنجش این پدیده بسیار مفید است. به این ترتیب، در کنار سنجش روش پیشنهادی، میزان بهبود حاصل شده بر میدان‌های راه نزدیک نیز به‌دست می‌آید.

در این راستا، ابتدا نحوه تولید یک سطح ناهموار تصادفی با توزیع گاوسی مطالعه خواهد شد و سپس به طراحی فرایند آزمون پرداخته می‌شود.

۱-۵- تولید عددی سطوح ناهموار تصادفی

یک سطح ناهموار تصادفی از کنار هم قرارگیری تعداد زیادی دره و قله که دارای ارتفاع مؤثر (h_{rms}) و طول خودهمبستگی (l_x) تعیین شده هستند، به دست می‌آید. مطابق توضیحات مطرح شده در [۲۵]، در یک سطح ناهموار تصادفی با تابع ارتفاع $f(x)$ ، اگر متغیرهای تصادفی

تنها با توجه به ملاحظات عملی انتخاب شده‌اند. در این آزمون از یک منبع گاوسی دیفرانسیلی جهت گرفته در راستای محور y استفاده شده که در نقطه $(35, 55)$ واقع شده است. این منبع به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J_y = \left[\frac{t-t_c}{t_d} \right] e^{-\left(\frac{t-t_c}{t_d} \right)^2} \quad (23)$$

که در آن $t_c = 4t_d$ و $t_d = 53ps$ می‌باشد.

۶- نتایج

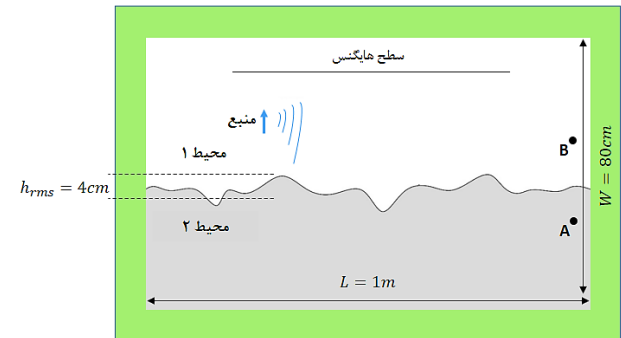
شکل ۳ بخشی از فرایند آزمون را در چهار زمان متفاوت نشان می‌دهد. در تکرارهای اولیه انتظار نمی‌رود که خطایی دیده شود؛ زیرا موجی به دیواره‌های جاذب نرسیده است. با گذر زمان، موج به اطراف پخش شده و با سطح ناهموار برخورد می‌کند. بخشی از آن به طور تصادفی در محیط پراکنده شده و بخش دیگر نیز به داخل محیط نفوذ می‌کند. مطابق شکل ۳-د) زمانی که موج تابیده شده به نقاط A و B می‌رسد، میدان‌های گذرنده از این نقاط ثبت شده و با میدان‌های محیط مرجع (که محیطی با ابعاد بسیار بزرگ می‌باشد) مقایسه می‌شوند. مطابق شکل ۳، میدان‌های پراکنده عبور بیش تری از نقطه بالای سطح ناهموار دارند. به عبارت دیگر امواج با نفوذ به سطح داخلی خاک با اتلاف، تضعیف شده و در نتیجه موج‌هایی که به نقطه زیرین سطح ناهموار می‌رسند بسیار ضعیف تر خواهند بود. این موضوع می‌تواند باعث اختلاف در سطح خطای محاسباتی در زیر و روی سطح باشد.

شکل ۴ خطای تشعشی را در نقطه A برای حالتی که از UPML استفاده شده، نشان می‌دهد. شرط مرزی باعث جذب امواج رسیده به انتهای جاذب شده و در نتیجه بهبود خطای نسبی جاذب را به همراه دارد. مطابق این شکل، مقدار ماکزیمم خطا برای حالت بدون شرط مرزی و با شرط مرزی به ترتیب برابر با $54/2$ - دسی بل و 60 - دسی بل است که نشانگر $5/8$ دسی بل بهبود در ماکزیمم خطا می‌باشد. همچنین در تمام تکرارها بهبود در سطح خطا آشکار است.

شکل ۵ خطای تشعشی UPML را در نقطه B نشان می‌دهد. میزان خطای تشعشی بیشینه برای حالت بدون شرط مرزی و دارای شرط مرزی به ترتیب برابر با $68/3$ - و $76/1$ - بوده که نشان دهنده $7/8$ دسی بل بهبود در خطای نقطه B می‌باشد.

به همین ترتیب شکل‌های ۶ و ۷ خطای نسبی میدان‌های ثبت شده در زمان را در حالتی که از CPML استفاده شده، برای دو نقطه A و B نشان می‌دهند. بدیهی است که در این حالت سطح خطا نسبت به حالتی که از UPML استفاده شده، کم تر می‌باشد. مطابق شکل ۶ و ۷ در این حالت نیز شرط مرزی اعمالی باعث بهبود جذب جاذب می‌شود. در شکل ۶، مقادیر ماکزیمم خطای تشعشی در حالت بدون شرط مرزی و دارای شرط مرزی به ترتیب، $75/1$ - و $78/2$ - بوده و این مقادیر در شکل ۷، به ترتیب برابر با $90/0$ - و $93/0$ - می‌باشند. بهبودهای به دست آمده در این حالت برای نقاط A و B به ترتیب برابر با $3/1$ و 3 دسی بل می‌باشند. توجه به این نکته ضروری است که این کاهش خطا شامل بهبود سطح خطا در تمام تکرارها نیز هست.

شکل ۲: شماتیک یک سطح ناهموار تصادفی در محیط FDTD به منظور مقایسه خطای نسبی جاذب‌ها و میدان‌های راه نزدیک سطح هایگنس



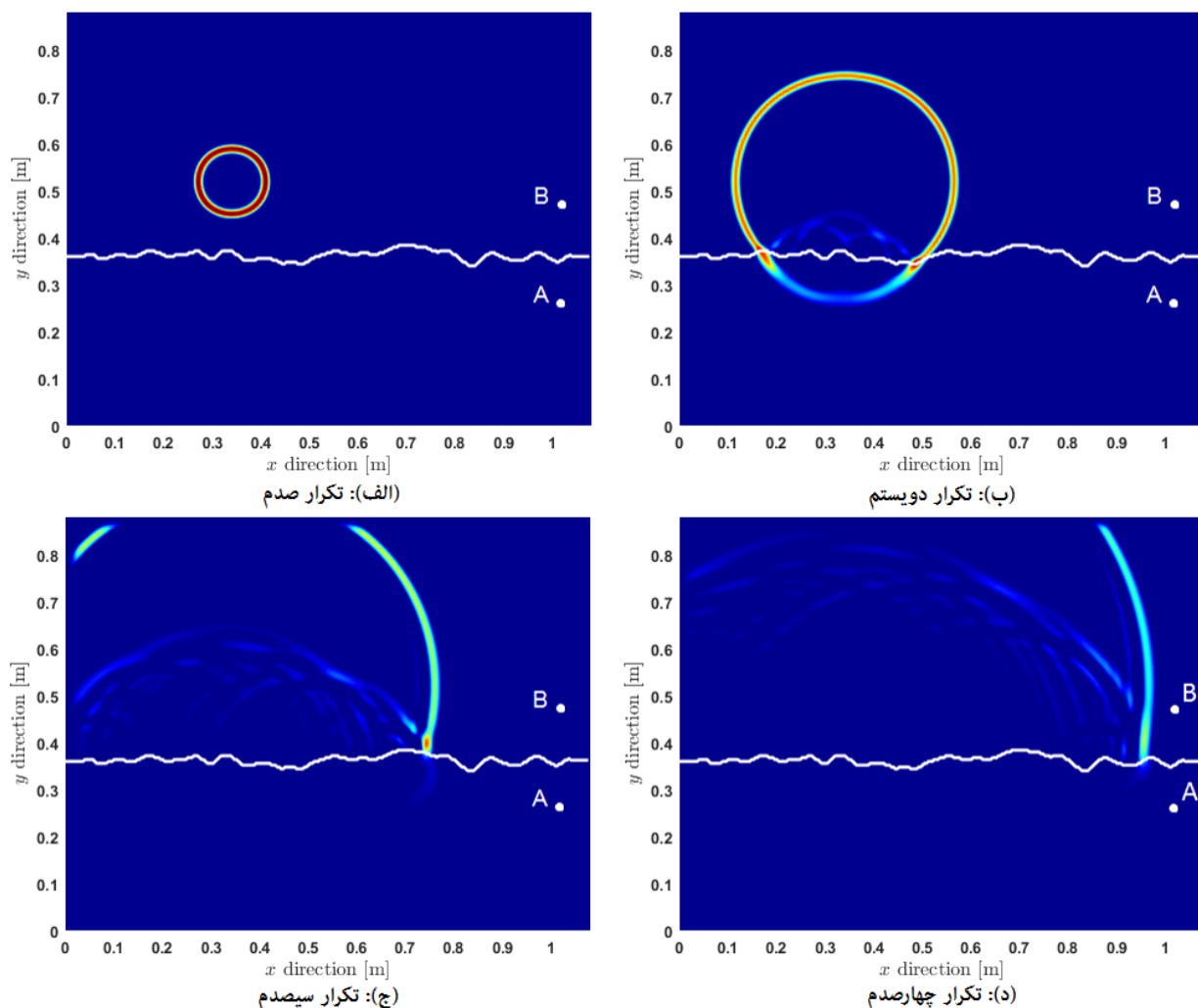
شکل ۲: شماتیک یک سطح ناهموار تصادفی در محیط FDTD به منظور مقایسه خطای نسبی جاذب‌ها و میدان‌های راه نزدیک سطح هایگنس

شکل ۲ شماتیک کلی محیط را در حضور سطح ناهموار نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده، محیط آزمون با جاذبی از نوع لایه تطبیق کامل پوشانده شده است و میدان‌ها در دو نقطه A و B ثبت می‌شوند. به این منظور، دو پروب در دو نقطه متفاوت A و B قرار گرفته که مقدار میدان را در هر پله زمانی ثبت می‌کنند. مقادیر $\Delta x = \Delta y = 4mm$ و فاکتور کورنت برابر با $0/5$ انتخاب شده‌اند. مقدار 1500 تکرار برای رسیدن به حالت ماندگار در نظر گرفته شده است. خطای نسبی در هر یک از نقاط پروب شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$ERROR = \frac{|E_y(t) - E_y^{ref}(t)|}{|E_y^{ref_{max}}|} \quad (24)$$

که در آن، $E_y^{ref}(t)$ میدان الکتریکی ثبت شده در یک محیط مرجع می‌باشد. به این منظور، باید از یک محیط با ابعاد چند برابر بزرگ تر به عنوان محیط مرجع 14 استفاده کرد. در این آزمون از محیطی با ابعاد 1020×1020 به عنوان مرجع استفاده شده است.

علت استفاده از دو نقطه، یکی بالای سطح و دیگری زیر سطح ناهموار، کاربردهای متنوع استخراج میدان‌ها در این نقاط می‌باشد. نقاط بالای سطح ناهموار معمولاً جهت بررسی پراکنده‌گی راه دور و راه نزدیک، و نقاط زیرین در رادارهای نفوذپذیر به زمین اهمیت دارند. دو جاذب CPML و UPML در این تست مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در حالت سنتی از معادله (۱۳) برای تعیین σ_{max} استفاده شده است. در حالتی که از شرایط مرزی در جاذب استفاده شده است، برای UPML، از



شکل ۳: محیط شبیه‌سازی یک سطح ناهموار تصادفی با توزیع گاوسی در چهار تکرار مشخص شده در حضور یک منبع نقطه‌ای گاوسی

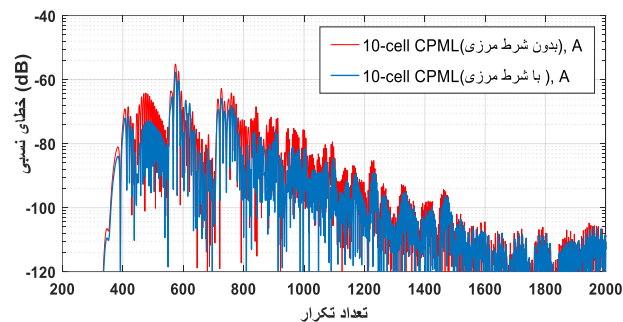
دقت پایین در شبیه‌سازی‌ها می‌شود. همان‌طور که در آزمون قبل نشان داده شد، در خصوص سطوح ناهموار تصادفی، استفاده از جاذب‌های پر قدرت باعث دقیق‌تر شدن میدان‌های راه نزدیک می‌شود. با توجه به اینکه میدان‌های راه دور نیز از طریق میدان‌های قرار گرفته روی سطوح هایگنس (اصل هایگنس) محاسبه می‌شوند، بهبود دقت میدان‌های راه نزدیک سطوح ناهموار تصادفی، به بهبود در میدان‌های راه دور منجر خواهد شد که در کاربردهای سنجش از دور امری بسیار مهم تلقی می‌شود. در نتیجه، برای بررسی بهبود میدان‌های راه نزدیک روی سطح هایگنس نیاز است که به بررسی خطای نسبی روی این سطح حساس پردازیم.

در این راستا میدان‌های روی سطح هایگنس را در حضور یک منبع تولیدکننده موج صفحه‌ای مسطح با فرکانس ۳ گیگاهرتز ثبت کرده و به محاسبه خطای میدان‌های ثبت شده می‌پردازیم. علت استفاده از موج صفحه‌ای مسطح این است که در کاربردهای سنجش از دور، برای محاسبه‌ی پراکندگی سطح ناهموار نیاز است که از یک موج صفحه‌ای استفاده شود، تا پس از محاسبه میدان‌های راه نزدیک روی سطح هایگنس، بتوان به تخمین میدان‌های راه دور پرداخت.

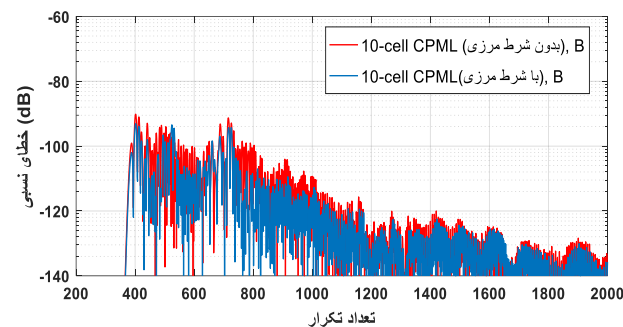
لایه پیشنهاد شده بر اساس حضور یک شرط مرزی می‌باشد که مستقل از ابعاد مش‌ها، فاکتور کورنت^{۱۵} و مشخصات لایه PML عمل می‌کند. مقدار منابع کامپیوتری استفاده شده توسط جاذب‌های مورد مطالعه با حضور شرط مرزی، هیچ تفاوتی با حالت بدون شرط مرزی نداشته و این موضوع بر جذابیت استفاده از این شرط مرزی می‌افزاید. در واقع شرط مرزی معرفی شده در روابط (۱۴) و (۱۵) نیازی به ذخیره حافظه در تکرارهای زمانی نداشته و تنها از داده‌های موجود در همان تکرار برای بهبود میدان‌های مرزی استفاده می‌کند. همچنین به علت اینکه رابطه پیشنهاد شده در بین شرایط مرزی رایج، یک شرط مرزی مرتبه صفر به شمار می‌آید، نیازی به ذخیره‌سازی و به‌روزرسانی میدان در زمان‌های گذشته در آن وجود ندارد و در نتیجه، تأثیر آن بر سرعت محاسبات به شدت نامحسوس و قابل صرف نظر کردن می‌باشد.

۷- بحث‌های بیشتر

اثر بازگشتی انتهای جاذب‌های تطبیق کامل، همواره باعث افزایش خطای جذب شده و این نوع خطا در محیط‌های دارای پراکنده‌ساز باعث بروز



شکل ۶: خطای نسبی میدان‌های ثبت‌شده در نقطه A برای CPML در دو حالت با شرایط مرزی و بدون شرایط مرزی



شکل ۷: خطای نسبی میدان‌های ثبت‌شده در نقطه B برای CPML در دو حالت با شرایط مرزی و بدون شرایط مرزی

گذشته از موارد فوق، هرچند که موضوع استفاده از شرایط مرزی تأثیر مناسبی بر دقت میدان‌های ثبت‌شده سطوح ناهموار تصادفی داشته است، اما استفاده از شرط مرزی پیشنهاد شده می‌تواند در سایر کاربردها و شبیه‌سازی‌های الکترومغناطیسی روش FDTD مورد استفاده قرار گیرد و این مقاله صرفاً به منظور سنجش اعتبار روش ارائه‌شده در یکی از شاخه‌های الکترومغناطیس، به بررسی آن در حضور سطوح ناهموار تصادفی پرداخته است.

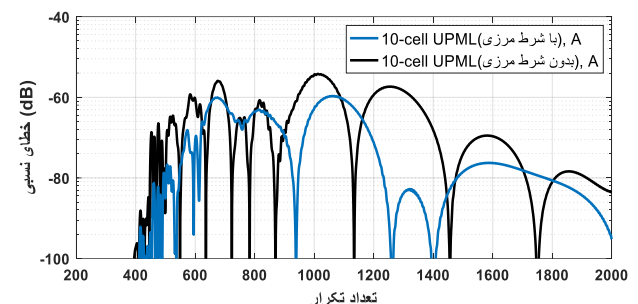
۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

این مقاله به ارائه یک شرط مرزی برای بهبود اثرات بازگشتی انتهای لایه‌های تطبیق کامل مورد استفاده در روش تفاضل عددی حوزه زمان پرداخته است. ساختار لایه‌های تطبیق کامل به گونه‌ای است که قابلیت اعمال این شرط مرزی را در انتهای‌ترین نقاط محیط، هموار می‌سازد. سپس، به منظور بهبود اثر جذب در حضور شرط مرزی، یک معیار مناسب برای انتخاب پارامترهای ساختاری لایه‌های تطبیق کامل ارائه داده است. برای بررسی روش پیشنهادی از یک آزمون در حضور سطح ناهموار تصادفی استفاده شده است. مقادیر خطا در دو نقطه (یکی در زیر سطح و دیگری در بالای سطح ناهموار)، محاسبه شده و تأثیر روش پیشنهادی بر دو جاذب UPML و CPML بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی می‌تواند بین ۳-۸ دسی‌بل به کاهش خطا کمک کند و این

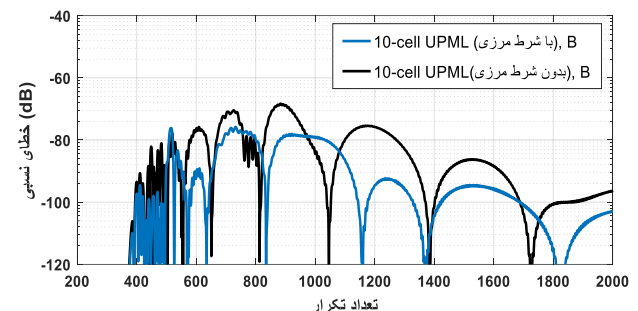
شکل ۸- (الف) خطای نسبی میدان‌ها را روی سطح هایگنس، زمانی که از UPML به عنوان جاذب استفاده شده است، نشان می‌دهد. بدون حضور شرط مرزی، بیشینه خطا $53/5$ دسی‌بل و با حضور شرط مرزی، مقدار این خطا برابر با $58/1$ دسی‌بل است. به همین ترتیب، شکل ۸ (ب) مقدار خطا را در حضور CPML نشان می‌دهد. به ترتیب، مقادیر $58/6$ دسی‌بل و 62 دسی‌بل در حالت بدون شرط مرزی و دارای شرط مرزی محاسبه شدند. نتایج فوق بیان‌کننده بهبود میدان‌های روی سطح هایگنس می‌باشند.

از آنجایی که انتخاب دقیق σ_{max} بر عملکرد شرط مرزی تأثیرگذار است، نیاز به وجود یک معیار برای انتخاب این پارامتر وجود دارد. لذا همان‌طور که در بخش ۵ بیان شد، این مقاله از مقادیری کوچکتر از σ_{opt} ($\sigma_{max} = 0.9 \times \sigma_{opt}$) استفاده کرده و این معیار را به عنوان یک معیار قابل قبول پیشنهاد می‌دهد.

با توجه به شکل‌های ۴ تا ۷، می‌توان مشاهده کرد که با افزایش تعداد تکرارها، میزان خطای دو روش به یکدیگر میل می‌کنند. در واقع با افزایش تعداد تکرار، میدان‌های حاضر در محیط رفته‌رفته توسط جاذب‌ها و سطح خاک جذب شده و دچار تضعیف زیادی می‌شوند. موج‌های ضعیف‌شده قادر به نفوذ به عمق لایه جاذب نبوده و در نتیجه موجی به انتهای جاذب که شرط مرزی در آنجا واقع شده، نمی‌رسد. این موضوع باعث کاهش اثر شرط مرزی در انتهای جاذب می‌شود و در نتیجه شاهد این خواهیم بود که با گذر زمان میزان خطای دو روش در حالت ماندگار به یکدیگر میل کنند.



شکل ۴: خطای نسبی میدان‌های ثبت‌شده در نقطه A برای UPML در دو حالت با شرایط مرزی و بدون شرایط مرزی



شکل ۵: خطای نسبی میدان‌های ثبت‌شده در نقطه B برای UPML در دو حالت با شرایط مرزی و بدون شرایط مرزی

[5] R. L. Higdon, "Absorbing boundary conditions for difference approximations to the multidimensional wave equation," *Mathematics of computation*, vol. 47, no. 176, pp. 437-459, 1986.

[6] O. M. Ramahi, "The complementary operators method in FDTD simulations," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 39, no. 6, pp. 33-45, 1997.

[7] J.-P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *Journal of computational physics*, vol. 114, no. 2, pp. 185-200, 1994.

[8] S. D. Gedney, "An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 44, no. 12, pp. 1630-1639, 1996.

[9] O. Ramadan, "Auxiliary differential equation formulation: an efficient implementation of the perfectly matched layer," *IEEE microwave and wireless components letters*, vol. 13, no. 2, pp. 69-71, 2003.

[10] M. Kuzuoglu and R. Mittra, "Frequency dependence of the constitutive parameters of causal perfectly matched anisotropic absorbers," *Microwave and Guided Wave Letters, IEEE*, vol. 6, no. 12, pp. 447-449, 1996.

[11] J. A. Roden and S. D. Gedney, "Convolutional PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media," *Microwave and optical technology letters*, vol. 27, no. 5, pp. 334-338, 2000.

[12] N. Feng, Y. Yue, C. Zhu, L. Wan, and Q. H. Liu, "Second-order PML: Optimal choice of nth-order PML for truncating FDTD domains," *Journal of Computational Physics*, vol. 285, pp. 71-83, 2015.

[13] D. Givoli, "High-order local non-reflecting boundary conditions: a review," *Wave motion*, vol. 39, no. 4, pp. 319-326, 2004.

[14] D. Correia and J. M. Jin, "Performance of regular PML, CFS-PML, and second-order PML for waveguide problems," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 48, no. 10, pp. 2121-2126, 2006.

[15] F. D. Hastings, J. B. Schneider, and S. L. Broschat, "A Monte-Carlo FDTD technique for rough surface scattering," *IEEE Transactions on antennas and propagation*, vol. 43, no. 11, pp. 1183-1191, 1995.

[16] L. Kuang and Y.-Q. Jin, "Bistatic scattering from a three-dimensional object over a randomly rough surface using the FDTD algorithm," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, no. 8, pp. 2302-2312, 2007.

[17] C. Jia, L. Guo, and P. Yang, "EM scattering from a target above a 1-D randomly rough sea surface using GPU-based parallel FDTD," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 14, pp. 217-220, 2015.

[18] Z.-H. Lai, J.-F. Kiang, and R. Mittra, "A Domain Decomposition Finite Difference Time Domain (FDTD) Method for Scattering Problem from Very Large Rough Surfaces," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 63, no. 10, pp. 4468-4476, 2015.

[19] G. Lancioni, "Numerical comparison of high-order absorbing boundary conditions and perfectly matched layers for a dispersive one-dimensional medium," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 209, pp. 74-86, 2012.

[20] Z. S. Sacks, D. M. Kingsland, R. Lee, and J.-F. Lee, "A perfectly matched anisotropic absorber for use as an absorbing boundary condition," *IEEE transactions on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 12, pp. 1460-1463, 1995.

[21] J.-P. Bérenger, "Perfectly matched layer (PML) for computational electromagnetics," *Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics*, vol. 2, no. 1, pp. 1-117, 2007.

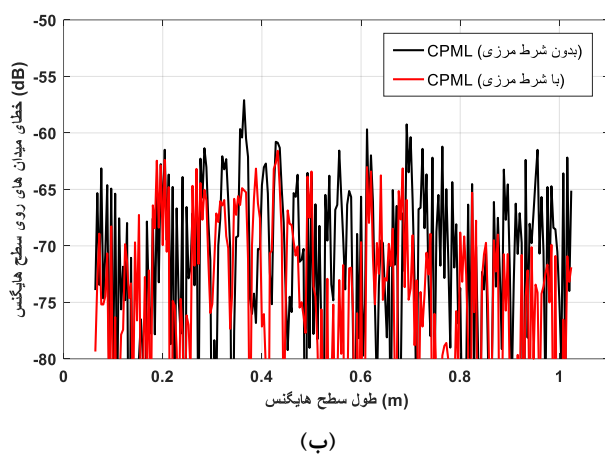
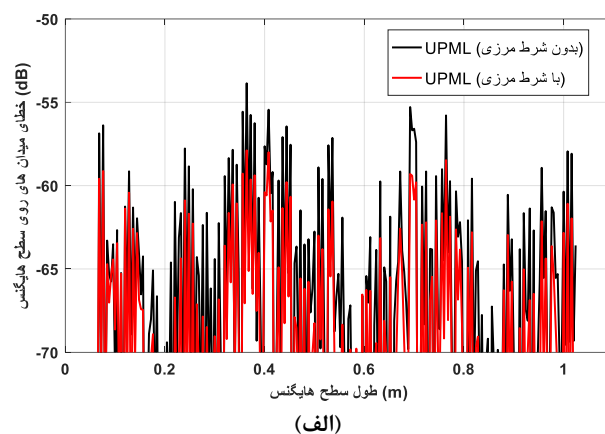
[22] W. C. Chew and W. H. Weedon, "A 3D perfectly matched medium from modified Maxwell's equations with stretched coordinates," *Microwave and optical technology letters*, vol. 7, no. 13, pp. 599-604, 1994.

[23] A. Z. Elsherbeni and V. Demir, *The Finite-difference Time-domain Method for Electromagnetics with MATLAB® Simulations*. SciTech Pub., 2009.

[24] N. Pinel and C. Boulier, *Electromagnetic Wave Scattering from Random Rough Surfaces: Asymptotic Models*. Wiley, 2013.

درحالی است که هیچ بار محاسباتی را بر روش FDTD تحمیل نمی‌کند و تنها باعث بهبود کیفیت این روش عددی می‌شود.

استفاده از شرط مرزی پیشنهادشده در این مقاله منجر به بروز بهبود در خطای جاذب و شبیه‌سازی مؤثر محیط‌های بی‌نهایت می‌شود و در نتیجه دقت میدان‌های راه نزدیک ثبت‌شده را افزایش می‌دهد. این موضوع در مورد یک سطح ناهموار تصادفی، باعث افزایش دقت میدان‌های روی سطح هایگنس شده که کاربرد زیادی در سنجش از دور و عکسبرداری‌های مایکروویوی دارد.



شکل ۸: خطای نسبی میدان‌های ثبت‌شده روی سطح هایگنس. (الف) UPML (ب) CPML

مراجع

[1] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *IEEE Trans. Antennas Propag*, vol. 14, no. 3, pp. 302-307, 1966.

[2] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-difference Time-domain Method*. Artech House, 2005.

[۳] سعید سیدطاهری و علی‌رضا عندلیب، «طراحی و اتانگنرهای مبتنی بر بلورهای فوتونی با قابلیت تواناسازی مناسب برای سامانه‌های مخابرات نوری»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، مقالات آماده انتشار، ۱۳۹۵.

[4] G. Mur, "Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 4, pp. 377-382, 1981.

- [25] L. Tsang, J. A. Kong, K.-H. Ding, and C. O. Ao, *Scattering of electromagnetic waves, numerical simulations*. John Wiley & Sons, 2004.

زیر نویس‌ها

-
- ^۱ Mur
 - ^۲ Higdon
 - ^۳ Annihilation Operators
 - ^۴ Ramahi
 - ^۵ Perfectly Matched Layer
 - ^۶ Berenger
 - ^۷ Uniaxial PML
 - ^۸ Auxiliary Differential Equation
 - ^۹ Convolutional PML
 - ^{۱۰} Huygens Surface
 - ^{۱۱} Dispersive
 - ^{۱۲} Stretched Coordinate PML
 - ^{۱۳} Reflection Error
 - ^{۱۴} Reference Media
 - ^{۱۵} Courant Factor