شبیه‌سازی انتشار امواج رادیویی از درون سازه‌های پنجره‌ای با استفاده از روش TLM

رمضانعلی صادق‌زاده، عباسعلی لطفی نیستانک، محمد جهان‌بخت و محمدناصر مقدسی

چکیده: در این مقاله، روش عددی ماتریس خط انتقال (TLM) برای شبیه‌سازی انتشار امواج رادیویی از درون ساختارهای پنجره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. در شبیه‌سازی یک پنجره با ابعاد مشخص یا مجموعه‌ای از پنجره‌ها در حالت‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و مسئله انتشار امواج رادیویی در هر حالت جداگانه بررسی خواهد شد. اثر تغییر ابعاد، جنس پنجره‌ها و همچنین زاویه تابش موج صفحه‌ای به تفصیل بیان شده است و در هر مورد، نتایج با سایر روش‌های عددی نظیر روش تفاضل محدود ، مرور اشعه و اجزاء محدود مقایسه شده است که نتایج حاکی از دقت خوب روش TLM می‌باشند. به علاوه، نتایج شبیه‌سازی در یک مورد با نتایجی که عملاً اندازه‌گیری شده، مورد قیاس قرار گرفته که از این لحاظ نیز صحت مدل‌سازی تأیید شده است.

کلید واژه: **انتشار امواج رادیویی، روش ماتریس خط انتقال، سازه‌های پنجره‌ای.**

۱- مقدمه

امروزه سیستم‌های بی‌سیم در بسیاری از کاربردها در حال جایگزینی با سیستم‌های سیمی قدیمی‌تر هستند، از طرفی سایت‌هایی که این شبکه‌های بی‌سیم در آن قرار می‌گیرند به مرور زمان در حال کوچک‌ترشدن می‌باشند. این کاهش به گونه‌ای است که در کاربردهایی نظیر تلفن‌های سیار، مودم‌های بی‌سیم، Wireless LAN و ... عملاً بزرگی سایت‌ها به اندازه بزرگی اتاق کار افراد است. به این ترتیب، بررسی رفتار موج در این مقیاس و در تقابل با مواد و ادوات ساختمانی اهمیت پیدا می‌کند و لازم است تا کانال انتشار امواج رادیویی در این شرایط به دقت توصیف شود. در یک دهه گذشته مدل‌های تئوری و تجربی [۱] تا [۳] بسیاری برای توصیف رفتار چنین کانال‌های کوچکی در محیط‌های شهری ارائه شده است. مدل‌های تجربی که به آنها مدل‌های آماری نیز می‌گویند، بر پایه تخمین پارامترهای یک معادله پیش‌فرض با نمودارهایی است که به صورت عملی محاسبه شده‌اند. اشکال این روش در وابستگی آن به مقادیر اندازه‌گیری شده است و مزیت این روش نیز در سرعت و قابلیت اعتماد بالا و حجم محاسبات عددی بسیار پایین آن است.

یکی از روش‌های تئوری که برای بررسی رفتار امواج الکترومغناطیسی در کانال‌های انتشار داخل ساختمان بکار رفته است، روش مرور اشعه[1] می‌باشد [۴]. در این روش لازم است که برای محاسبه میدان‌های الکترومغناطیسی، کلیه مسیرهای مستقیم و غیر مستقیم بین یک نقطه فرستنده و یک یا چند نقطه محدود در گیرنده در نظر گرفته شود. با یک انتخاب دقیق، علاوه بر تابش مستقیم، تابش‌های دیگری از قبیل پاشندگی[2]، پراکندگی[3] و انعکاس[4] نیز در محاسبات منظور خواهند شد. روش ردگیری اشعه در مورد مسائلی مؤثر است که محاسبه میدان در تعداد نقاط محدودی ضرورت داشته باشد و برای نقاط زیاد گیرنده، این روش کارایی کمتری خواهد داشت.

یک دسته دیگر از روش‌های تئوری در ارزیابی مسئله انتشار، روش‌های تمام موج می‌باشند که مستقیماً بر مبنای حل عددی معادلات ماکسول پایه‌ریزی شده‌اند و در این میان روش تفاضل محدود[5] (FDTD) بیش از سایر روش‌ها مورد توجه و استفاده قرار گرفته است [۵]. اگرچه این روش در محیط‌هایی با پیچیدگی فیزیکی زیاد دارای دقت بالایی است، اما اگر ابعاد محیط بیشتر از چند طول موج باشد، به دلیل محدودیت‌های سرعت و حافظه در کامپیوترهای امروزی، نتیجه‌گیری از این روش عملاً غیر ممکن می‌شود.

برای غلبه بر مشکلاتی که در روش‌های تئوری و تجربی در بالا ذکر شد، می‌توان از روش عددی ماتریس خط انتقال[6] (TLM) بهره جست. این روش در دسته روش‌های تئوری و تمام موج قرار می‌گیرد و بر پایه تقسیم فضای کاری به تعداد زیادی از المان‌های پایه‌ای به نام خطوط انتقال استوار است. از آنجایی که تمام ابعاد کاری خطوط انتقال بر ما آشکار است از اینرو این روش دید فیزیکی مناسبی از رفتار موج در مسئله تحت بررسی ارائه داده و پیاده‌سازی آن هم بسیار ساده‌تر است. از سوی دیگر به دلیل آنکه فضا هم به نوعی یک محیط با بینهایت خط انتقال است، پس ویژگی‌های اساسی این مدل با ویژگی‌های طبیعی محیط انتقال مطابقت دارد و از اینرو برای رسیدن به دقت مطلوب نیازمند تعداد کمتری از تقسیمات فضایی است. لذا می‌توان این روش را سریع‌تر از سایر روش‌های عددی مشابه قلمداد کرد که دارای دقت قابل قبولی در مسایل انتشار در محیط‌های پر پیچ و خم است.

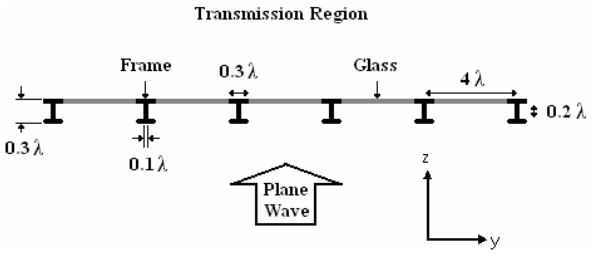
از آنچه گفته شد چنین برمی‌آید که رفتار کانال‌های انتشار در داخل و خارج ساختمان‌ها غالباً بسیار پیچیده بوده و پیش‌بینی عملکرد سیستم‌های مخابراتی در آنها بسیار دشوار است. در این میان انتشار امواج الکترومغناطیسی از درون سازه‌های به شکل پنجره نیازمند توجه بیشتری

این مقاله در تاریخ ۶ آبان ماه ۱۳۸۵ دریافت و در تاریخ ۲۷ خرداد ماه ۱۳۸۶ بازنگری شد.

رمضانعلی صادق‌زاده، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران (email: sadeghzadehsheikhan@yahoo.com).
عباسعلی لطفی نیستانک، پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی، تهران، ایران (email: alotfi@iust.ac.ir).
محمد جهان‌بخت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران (email: jahanbakht@gmail.com).
محمدناصر مقدسی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران (email: mn_moghaddasi@yahoo.com).

1. Ray Tracing
2. Diffraction
3. Scattering
4. Reflection
5. Finite Difference Time Domain
6. Transmission Line Matrix Method

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱: تابش موج صفحه‌ای به مجموعه‌ای شامل ۵ پنجره.

است و این مقاله به صورت خاص روی چنین سازه‌هایی متمرکز شده است. مسئله انتشار موج از درون این سازه‌ها پیشتر نیز در مقالات مورد توجه قرار گرفته است و با روش‌هایی از قبیل FDTD، مرور اشعه [۶] و معادلات سهموی[1] [۷] حل شده است. اما به دلیل مشکلات مختلف این روش‌ها، در این مقاله برای اولین بار از روش TLM برای حل مسئله استفاده شده است. به این ترتیب برای یک و مجموعه‌ای از پنجره‌ها مسئله انتشار و تضعیف موج الکترومغناطیسی، در حالت‌های تابش موج صفحه‌ای یکنواخت و عمود یا تابش مایل بررسی می‌گردد و گستره فراوانی از اندازه، جنس و شکل پنجره‌ها مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۲- تئوری

همان‌طور که گفته شد توصیف دقیق کانال انتشار در داخل ساختمان‌ها می‌تواند به طراح در جهت انتخاب بهینه محل آنتن‌های Base Station و انتخاب بهینه مشخصات الکتریکی آنها نظیر فرکانس، جهت‌گیری و ... یاری رساند. در یک نگاه کلی غالب مدل‌های ارائه‌شده تا کنون، به صورت جداگانه به مسئله انتشار امواج تنها در بیرون ساختمان و یا تنها در داخل آن پرداخته‌اند و تنها تعداد کمی از این مدل‌ها [۸] به مسئله بیرون و داخل[2] به طور هم‌زمان نگریسته‌اند که همین تعداد اندک هم عموماً به دلیل سادگی، روش‌های تجربی را به روش‌های تئوری ترجیح داده‌اند.

تقریباً هر سازه عمرانی شامل پنجره بوده و از این رو پنجره‌ها پرکاربردترین عناصر ساختمانی در تحقیقات هستند. اندازه‌گیری‌هایی که در مقابل پنجره‌ها انجام شده است نمایانگر آن است که موج از یک پنجره به طور متوسط ۶ dB بیش از سایر اجزای ساختمانی نفوذ می‌کند، بنابراین پنجره‌ها به عنوان عناصر پایه‌ای در این مقاله مد نظرند هر چند که به دلیل بزرگی ابعاد الکتریکی، تحلیل آنها نسبتاً دشوار است.

یک ویژگی برجسته کلیه روش‌های عددی حوزه زمان نظیر TLM آن است که این تکنیک‌ها قادرند در هر سازه‌ای و با هر میزان از پیچیدگی‌های ساختاری، کلیه میدان‌های الکترومغناطیسی را در کمترین زمان مدل کنند و اگر تحلیل در حوزه فرکانس باشد، گستردگی رنج پاسخ فرکانسی تأثیری بر زمان انجام تحلیل ندارد. تمام این تکنیک‌های حوزه زمان غالباً از نوعی مرزهای تشعشعی یا جاذب برای محدودکردن یا بستن فضای محاسبات استفاده می‌کنند. برای کاهش زمان محاسبات و نیز توسعه یک کد کامپیوتری چندمنظوره، روش ماتریس خط انتقال با یک گره پیوندی [۹] برای این مقاله در نظر گرفته شده است.

ایده حل معادلات ماکسول بر اساس روش TLM با یک گره جدید به نام پیوندی، اولین بار توسط سکاراموزا و همکاران [۹] ارائه شد. کارایی این گره نوین سپس با ارائه مدل‌های قوی‌تری که توسط کریستوپولوس [۱۰] عرضه شدند، به اثبات رسید و اکنون مورد توجه غالب افرادی است که در این زمینه مشغول فعالیت هستند. تعداد خطوط انتقال استفاده‌شده در این مدل از ۱۸ گره به ۱۵ گره کاهش یافته و فاکتور پاشندگی سیستم در کنار سرعت همگرایی هر دو به طور چشم‌گیری تقویت شده‌اند. در ادامه به برخی از قدم‌های اساسی در طراحی الگوریتم TLM اشاره می‌شود. جزئیات بیشتر در این رابطه در مراجع [۹] و [۱۰] موجود می‌باشد.

تحلیل TLM در یک نگاه کلی شامل دو قدم اساسی است. مرحله پراکندگی که شامل استخراج امواج انعکاسی (در زمان t_0+1) از روی امواج تابیده در خود گره (در زمان t_0) است و با توجه به ۱ انجام می‌شود

$$[v_n^r((m+1)\Delta t)] = [S]\cdot[v_n^i(m\Delta t)] \qquad (1)$$

در رابطه بالا $[S]$ ماتریس پراکندگی گره و n شماره گره است. مرحله اساسی دوم نیز به مرحله Connection معروف بوده و شامل استخراج امواج تابیده به گره‌های مجاور از روی امواج منعکس‌شده از هر گره و مطابق با (۲) است

$$\begin{aligned} v_n^i &= f(v_n^r, v_{n+1}^r) \\ v_{n+1}^i &= f(v_n^r, v_{n+1}^r) \end{aligned} \qquad (2)$$

مرحله Connection در مرزها کمی متفاوت از کل ساختار بوده و شامل ضرب یک ضریب انعکاس ثابت، متناسب با نوع مرز، در موج ولتاژ انعکاسی است. این ضریب انعکاس در مرزهای هادی کامل ۱- و در مرزهای تقارن فیزیکی یا به بیانی دیگر در دیواره‌های مغناطیسی ۱+ می‌باشد. مرزهای تشعشعی را نیز می‌توان به دو نوع Absorbing Boundary Condition و Perfect Match Layer تقسیم کرد که نوع PML با (۳) در این کاربرد پیشنهاد شده است [۱۰]

$$\Gamma = \frac{z_b - \frac{1}{Y_t}}{z_b + \frac{1}{Y_t}} \qquad (3)$$

$$z_b = z_0\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}$$

و در رابطه بالا Y_t ادمیتانس مشخصه خط انتقال، z_0 امپدانس مشخصه فضای آزاد (۳۷۷ Ω) و Δl اندازه بلوکی است که گره در آن قرار گرفته است. آنچه در نهایت باید به آن اشاره شود این است که به دلیل زیادبودن تعداد گره‌های پیوندی و ریزشدن تقسیمات فضایی، خطای پاشیدگی افزایش می‌یابد و این خطا در نتایج نهایی خود را به شکل یک نویز فرکانس بالا نشان می‌دهد. برای حذف این خطا می‌توان از یک فیلتر پایین‌گذر استفاده کرد که با نتایج اولیه تحلیل TLM کانوالو شود. در ۴ می‌توان پاسخ ضربه یک LPF را با فرکانس قطع f_1 مشاهده نمود

$$f[n] = 2f_1\Delta t\sin c(2\pi f_1 n\Delta t) \qquad (4)$$

Δt فاصله گام‌های زمانی در حالت پایدار می‌باشد و عمل کانولوشن‌گیری بین اطلاعات گسسته $u[n]$ و $v[n]$ نیز با ۵ به دست می‌آید

$$y_i = \sum_{k=1}^{\max(M_u,M_v)} u_k v_{i-k+1}^* \quad , \quad 1 \le i \le M_u + M_v - 1 \qquad (5)$$

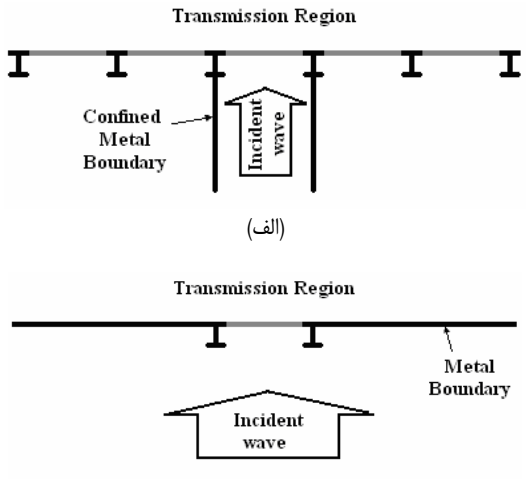
که M_u تعداد عناصر بردار u و M_v تعداد عناصر بردار v می‌باشند.

۳- نتایج شبیه‌سازی

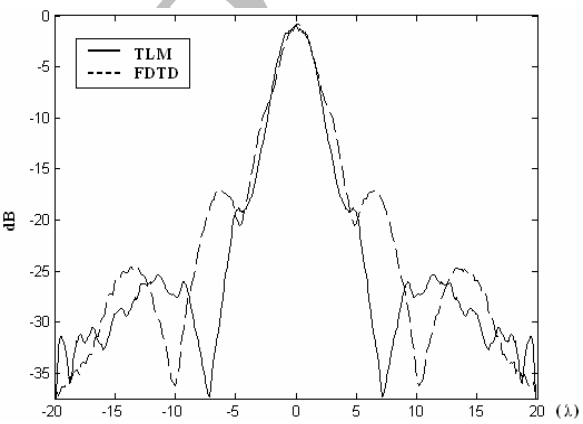
همان‌طور که قبلاً اشاره شد، تحلیل پنجره‌ها به دلیل بزرگی ابعاد الکتریکی کمی زمان‌بر است. یک نمونه از این پنجره‌ها در شکل ۱ مشاهده می‌شود.

1. Parabolic Equation
2. Indoor/Outdoor

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲: دو گزینه پیشنهادی برای تجزیه ساختارهای بزرگ به اجزای سازنده.

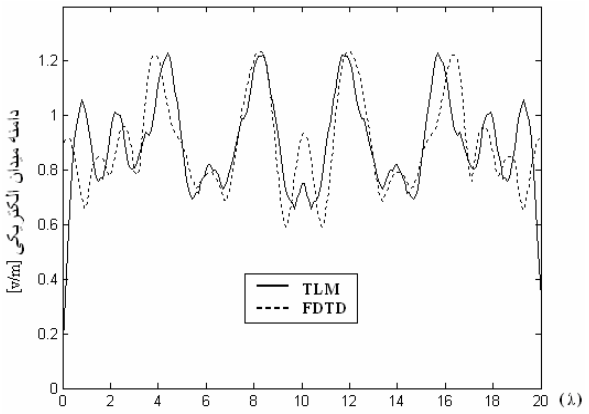


شکل ۳: مقایسه الگوی میدان تشعشعی برای پنجره شکل ۲-الف در فاصله 10λ با روش‌های FDTD و TLM.

موج صفحه‌ای تابیده‌شده به پنجره پس از عبور از آن، به طور پیچیده‌ای دچار پاشیدگی خواهد شد و در یک مجموعه شامل ۵ پنجره، زمان تحلیل بسیار بالا خواهد رفت. یک راه غلبه بر این مشکل آن است که چنین ساختار پیچیده‌ای را به اجزای سازنده‌اش یعنی تک‌پنجره‌ها تجزیه کنیم و سپس نتیجه نهایی را با استفاده از خاصیت جمع آثار به دست آوریم. در مراجع [۶] دو روش عمده برای این منظور معرفی گردیده که هر دو در شکل ۲ آورده شده‌اند. گزینه ۲-الف شامل دیوارهای فلزی است که حریم یک پنجره را از دیگر پنجره‌ها جدا کرده و گزینه ۲-ب شامل دیوارهای فلزی است که تمام پنجره‌های دیگر را پوشانده است.

شکل ۳ الگوی میدان الکتریکی تابشی را بر روی خطی که به موازات محور پنجره شکل ۲-الف و در فاصله 10λ روبروی آن در ناحیه انتشار قرار گرفته است، نشان می‌دهد. ابعاد قاب پنجره‌ها و خود پنجره به مانند شکل ۱ در نظر گرفته شده‌اند. تقسیم‌بندی در برنامه به صورت ۴۰۰ واحد در راستای y و ۱۵۰ واحد در راستای z صورت پذیرفته است. لازم به ذکر است که در صورت استفاده از یک دیواره مغناطیسی در $z=0$ می‌توان سازه را از محل محور yها به دو نیم تقسیم نموده و سرعت محاسبات را تا دو برابر افزایش داد.

از آنجایی که نتایج این تحلیل برای اعمال جمع آثار در سایر تحلیل‌ها نیز به کار خواهد رفت، پس باید نتایج را به جای بازه $[0,20\lambda]$ در بازه $[-20\lambda,20\lambda]$ رسم نمود. بدین ترتیب امکان لغزاندن این پنجره در یک دامنه به عرض 20λ وجود خواهد داشت. برای شبیه‌سازی در این حالت از ۱۰۰۰۰ تکرار و موج صفحه‌ای $Ex=1\text{v/m}$ استفاده شده است. نتیجه



شکل ۴: مقایسه الگوی میدان تشعشعی برای شکل ۱ در فاصله 10λ شامل ۵ پنجره با روش‌های FDTD و TLM.

حاصل با روش FDTD مقایسه شده است. نوسانات کوچکی که در لبه‌های شکل مشاهده می‌شوند ناشی از مرزهای تشعشعی در هر دو روش FDTD و TLM می‌باشند.

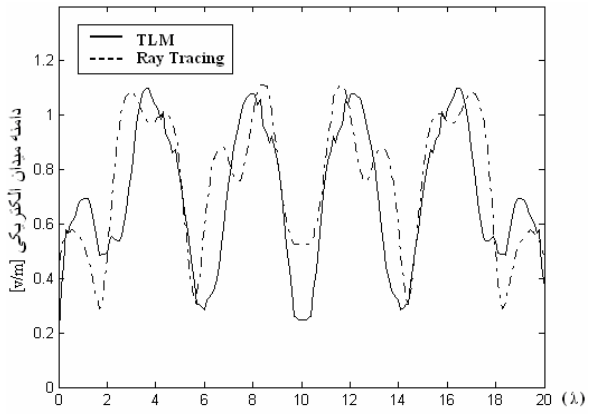
در تمام شبیه‌سازی‌ها از یک رایانه مدل پنتیوم ۴ با CPU ۲/۸ گیگاهرتز و RAM ۵۱۲ مگابایتی استفاده شده است و در این حالت زمان لازم برای اجرای برنامه در حدود ۱/۵ ساعت بوده است.

در این مرحله لازم است مشخص شود که آیا نتایج حاصل از جمع آثار از تک‌پنجره‌ها، با نتایج یک ساختار چندپنجره‌ای همخوانی دارد یا خیر. شکل ۴ برای یک ساختار ۵پنجره‌ای همانند آنچه در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، شدت تشعشع میدان الکتریکی را به دو روش محاسبه نموده است. روش اول با کمک جمع آثار بلوک‌های شکل ۲-الف در TLM و روش دوم برای کل ساختار شکل ۱ به صورت یکجا در FDTD. بدین ترتیب می‌توان صحت طرح شکل ۲-الف را برای مدل‌سازی شکل ۱ ارزیابی نمود. همان‌طور که مشاهده می‌شود دو روش همخوانی خوبی با هم دارند. به این ترتیب، در ادامه کار از روش جمع آثار استفاده شده است و چنانچه از این روش استفاده نشده باشد، روش مورد استفاده ذکر خواهد گردید.

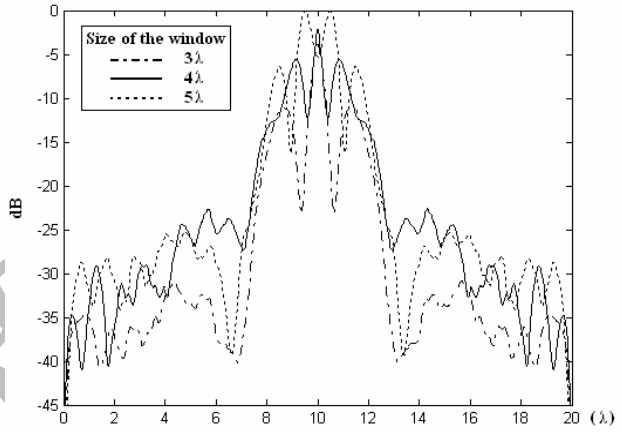
نکته دیگری که باید به آن اشاره نمود این است که روش‌های عددی TLM و FDTD بسیار به یکدیگر مشابهت دارند و اختلاف جزئی در نتایج شکل ۳ و ۴ نیز می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی باشد که برخی از آنها عبارتند از: الف) فرض‌های اولیه متفاوت: در واقع این دو روش تحت شرایط خاص کاملاً با یکدیگر برابرند که این شرایط خاص الزاماً همواره برقرار نمی‌باشند. ب) میدان نزدیک: حضور میدان غیر تشعشعی نزدیک نیز مزید بر علت است زیرا این میدان موجبات رفتارهای پیش‌بینی‌نشده‌ای را موجب می‌گردد که در بخش‌های بعدی مقاله بیشتر توضیح داده خواهد شد. ج) کدها و الگوریتم‌ها: همان‌طور که در مقدمه نیز مطرح گردید، نتایج مربوط به روش FDTD از مرجع [۶] آورده شده‌اند که الگوریتم‌ها، فرض‌ها، نوع مدل‌سازی مرزهای جذبی و ... می‌توانند بسیار از آنچه در این مقاله و برای روش TLM به کار برده شده‌اند، متفاوت باشند.

در قدم بعدی دقت روش پیشنهادی برای فاصله‌های کمی دورتر نیز بررسی شده است. شکل ۵ رسم شدت میدان الکتریکی برای ساختاری شامل ۵ پنجره با ابعاد 4λ می‌باشد که در فاصله 15λ در مقابل پنجره‌ها رسم شده است. نتایج به دست آمده از جمع آثار در TLM با نتایج حاصل از روش مرور اشعه [۶] مقایسه شده‌اند که علی‌رغم تفاوت‌های فراوان در نگرش دو روش به مسئله انتشار، نتایج دقت نسبتاً مناسبی را نشان می‌دهند. توجه به این موضوع هم مهم است که اگر

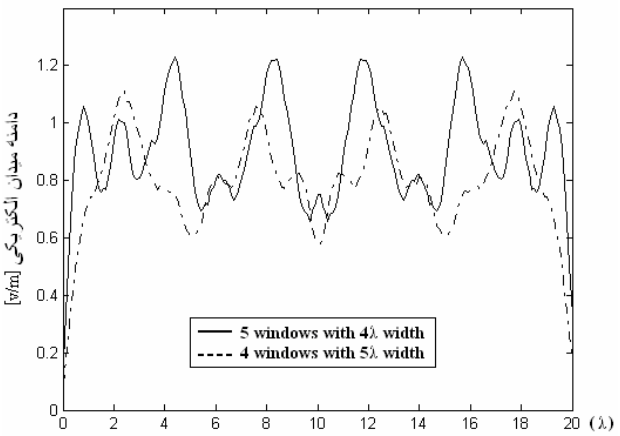
Archive of SID
www.SID.ir



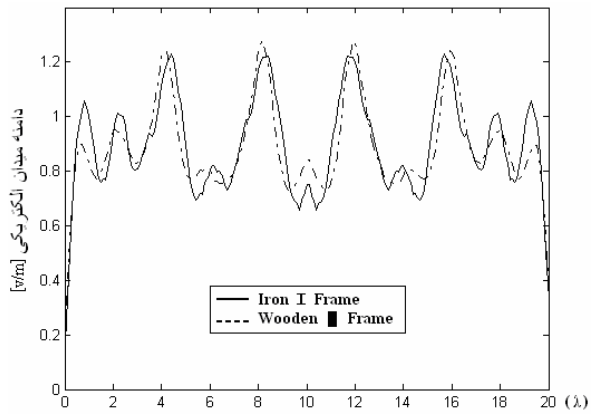
شکل ۵: مقایسه الگوی میدان تشعشعی برای شکل ۱ در فاصله 15λ شامل ۵ پنجره با روش‌های مرور اشعه و TLM.



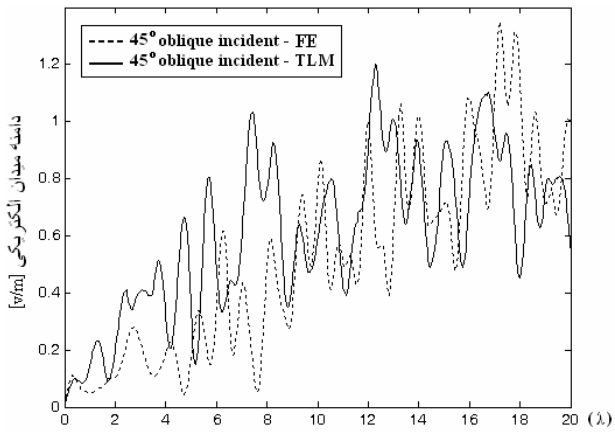
شکل ۶: مقایسه الگوی میدان تشعشعی برای شکل ۲-ب در فاصله 5λ به ازای تغییر اندازه پنجره.



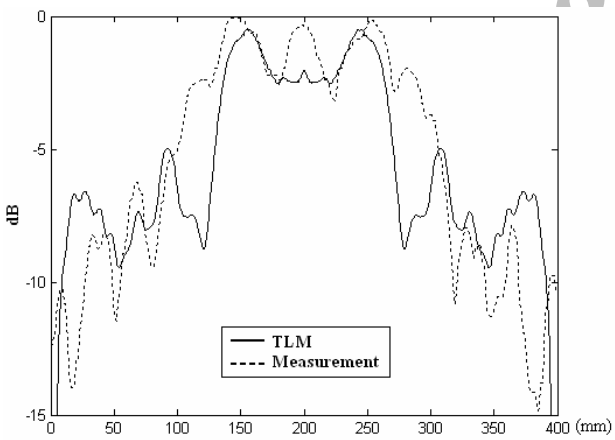
شکل ۷: مقایسه الگوی میدان تشعشعی برای دو ساختار متفاوت شامل ۴ و ۵ پنجره در فاصله 10λ.



شکل ۸: مقایسه الگوی میدان تشعشعی برای ۵ پنجره با قاب‌های متفاوت در فاصله 10λ.



شکل ۹: مقایسه الگوی میدان تشعشعی برای ۵ پنجره در حالت تابش مایل.



شکل ۱۰: مقایسه الگوی میدان تشعشعی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در فاصله 36λ.

فرکانس کاری GHz ۱ در نظر گرفته شود، آنگاه 15λ معادل با ۴/۵ متر خواهد بود که تقریباً معادل است با طول یک اتاق خواب کوچک و این فاصله نسبتاً زیادی را شامل می‌شود. (تقریباً ۴ برابر عرض خود پنجره‌ها).

پارامتر دیگری که باید در نظر گرفت، تأثیر ابعاد پنجره در شکل الگوی میدان تشعشعی است. در شکل ۶ مسئله تغییر اندازه پنجره برای حالت شکل ۲-ب مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است.

شکل ۶ نشان می‌دهد که چگونه پرتو میدان با افزایش ابعاد پنجره از 3λ به 4λ و 5λ، تغییر می‌کند. ساختار کل مسئله مشابه با شکل ۲- ب در نظر گرفته شده است و خطی که میدان روی آن محاسبه می‌شود، در فاصله 5λ در مقابل پنجره قرار می‌گیرد. واضح است که با افزایش طول پنجره انرژی بیشتری در گلبرگ اصلی متمرکز می‌شود. به علاوه که اگر طول پنجره را از حدی بیشتر کنیم، دو گلبرگ اصلی ایجاد خواهد شد مانند آنچه برای 5λ مشاهده می‌شود. اگر طول پنجره را بیش از این افزایش دهیم، انتظار می‌رود که فاصله این دو گلبرگ اصلی باز هم بیشتر شوند.

در شکل ۷ دو نوع ساختار مد نظر است. یکی شامل ۵ پنجره همانند شکل ۱ به ابعاد 4λ و دیگری شامل ۴ پنجره به ابعاد 5λ. اندازه‌گیری‌های میدان الکتریکی با کمک خاصیت جمع آثار در فاصله 10λ روبروی پنجره‌ها انجام شده است. این شکل بیشتر متأثر از تعداد و محل قرارگیری پنجره‌ها است که برای نمودار پیوسته ۶ پنجره با فواصل کمتر و برای نمودار خطچین ۵ پنجره با فواصل بیشتر حضور دارند.

www.SID.ir

نکته دیگری که در این مسئله می‌توان به آن توجه نمود، تأثیر جنس قاب پنجره‌ها بر الگوی میدان تشعشعی است. آنچه در شکل ۸ مشاهده می‌شود مقایسه‌ای است بین الگوی میدان الکتریکی در ساختار شکل ۱ با قاب آهنی I شکل با الگوی میدان الکتریکی همان ساختار اما با قاب پنجره‌های چوبی به شکل مربع توپر ■ با $\varepsilon_r = ۳$. هر دو نمودار در فاصله ۱۰λ از پنجره‌ها و با جمع آثار محاسبه شده‌اند. آنچه از این شکل برمی‌آید آن است که جنس و شکل پنجره نمی‌تواند تأثیر زیادی بر پرتو میدان داشته باشد.

تابش مایل موج صفحه‌ای بر ساختار پنجره‌ای موضوع دیگری است که باید بررسی شود. آنچه در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، ۲ نمودار از تابش مایل با زاویه ۴۵ درجه از امواج الکترومغناطیسی است که در فاصله ۵λ و با خاصیت جمع آثار به دست آمده‌اند. یکی از نمودارها به روش TLM و دیگری با کمک روش اجزاء محدود[1] و تحت نرم‌افزار HFSS ۱۰ شبیه‌سازی شده است که تطابق مناسبی را نشان می‌دهند. اختلاف‌های ناچیز موجود در این دو شبیه‌سازی را می‌توان به آثار میدان‌های نزدیک نسبت داد. از آنجایی که در فواصل نزدیک به هر ناپیوستگی، نسبت میدان ذخیره‌شده به میدان تشعشعی افزایش می‌یابد، لذا رفتار موج در این نواحی دچار آشفتگی شده و تخمین دقیق‌تر از میدان‌های الکترومغناطیسی را تنها می‌توان با ریزترنمودن مش‌بندی و بالاتربردن تقریب حل مسأله بهبود بخشید.

در شکل ۱۰ می‌توان نتایج حاصل از روش TLM در این مقاله را با مقادیر اندازه‌گیری‌شده در [۶] مقایسه نمود. ساختار این شکل مشابه با شکل ۱ است و اندازه‌گیری‌ها در فاصله ۳۶λ از پنجره‌ها انجام‌شده است. فرکانس کاری ۳۰ GHz و طول موج در فضای آزاد ۱۰ mm می‌باشد. محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰ روی محور افقی در مقابل ۵ پنجره مذکور قرار می‌گیرد و دو دیوار فلزی نیز هر یک به طول ۱۰λ در طرفین قرار گرفته‌اند. هم‌خوانی مناسبی بین نتایج عملی و مقادیر اندازه‌گیری‌شده با روش TLM مشاهده می‌شود.

٤- نتیجه‌گیری

انتشار امواج رادیویی از درون ساختارهای پنجره‌ای به طور گسترده‌ای با روش TLM ارزیابی شد. حالت‌های مختلفی از تک‌پنجره و نیز ساختارهای چندپنجره‌ای بررسی گردید و مسئله انتشار امواج رادیویی در هر حالت جداگانه مورد سنجش واقع شد. اثر تغییر ابعاد، جنس قاب پنجره‌ها و همچنین زاویه تابش موج صفحه‌ای بیان گردیده و در هر مورد، نتایج با سایر روش‌های عددی نظیر FDTD، مرور اشعه و اجزاء محدود مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج حاکی از دقت بالای روش TLM می‌باشند. به علاوه، نتایج شبیه‌سازی در یک مورد با نتایجی که عملاً اندازه‌گیری شده بود، مورد قیاس واقع شد که صحت مدل‌سازی از این جهت نیز تأیید شد.

٥- سپاس‌گزاری

نویسندگان این مقاله بدین وسیله مراتب سپاس‌گزاری خود را از حمایت‌های مرکز تحقیقات مخابرات ایران در به ثمر رساندن نتایج این تحقیق ابراز می‌دارند.

1. Finite Element

مراجع

[1] S. Ichitsubo, T. Furuno, T. Taga, and R. Kawasaki, "Multipath propagation model for line-of-sight street microcells in urban area," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 2, pp. 422-427, Mar. 2000.

[2] G. E. Athanasiadou and A. R. Nix, "Investigation into the sensitivity of the power predictions of a microcellular ray tracing," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 4, pp. 1140-1151, Jul. 2000.

[3] W. Zhang, "Fast two-dimensional diffraction modeling for site-specific propagation prediction in urban microcellular environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 49, no. 2, pp. 428-436, Mar. 2000.

[4] Z. Ji, B. H. Li, H. X. Wang, H. Y. Chen, and T. K. Sarkar, "Efficient ray-tracing methods for propagation prediction for indoor wireless communications," *IEEE Antennas and Propagat. Magazine*, vol. 43, no. 2, pp. 41-49, Apr. 2001.

[5] L. Talbi, "Indoor UHF propagation modeling using FDTD," IEEE AP-S International Symposium and USNC/URSI National Radio Science Meeting. Boston, Mass., 2001.

[6] Z. Zhang, R. K. Sorensen, Z. Yun, M. F. Iskander, and J. F. Harvey, "A ray-tracing approach for indoor/outdoor propagation through window structures," *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 50, no. 5, pp. 742-748, May 2002.

[۷] ن. نوری و ه. عریضی، "مدل‌سازی انتشار امواج رادیویی از درون ساختارهای پنجره‌ای با استفاده از روش معادله سهموی،" *پذیرفته‌شده برای نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران.*

[8] R. Hoppe, P. Wertz, G. Wolfle, and F. M. Landstorfer, "Wideband propagation modeling for indoor environments and for radio transmission into buildings," in *Proc. Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2000*, vol. 1, pp. 282-286, 2000.

[9] R. Scaramuzza and A. J. Lowery, *Hybrid Symmetrical Condensed Node for the TLM Method*, Electronic Letters, vol. 26, no. 23, Nov. 1990.

[10] C. Christopoulos, *The Transmission-Line Modeling Method*, IEEE Press, 1995.

رمضانعلی صادق‌زاده در سال ۱۳۶۳ مدرک کارشناسی مهندسی مخابرات را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی اخذ و در سال ۱۳۶۶ موفق به دریافت مدرک کارشناسی ارشد مهندسی مخابرات دیجیتال از دانشگاه یومیست منچستر در انگلستان شد. دکتر صادق‌زاده در سال ۱۳۷۶ دوره دکترای مهندسی مخابرات را در دانشگاه برادفورد به اتمام رساند و سپس وارد دوره فوق دکترا (post doc) در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی شد. وی از سال ۱۳۷۶ به عنوان عضو هیأت علمی در دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مشغول به فعالیت گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند آنتن، امواج الکترومغناطیس، روش‌های عددی، رادار، طراحی شبکه‌های رادیوی و ارتباطات سیار می‌باشد.

عباسعلی لطفی نیستانک متولد ۱۳۵۰ در تهران بوده و تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی مخابرات و کارشناسی ارشد الکترونیک به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۶ و دکتری مخابرات را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است. نام‌برده در سال‌های ۱۳۷۴ الی ۱۳۷۷ به عنوان مهندس فنی در طراحی شبکه در صدا و سیمای جمهوری اسلامی ایران مشغول به کار بوده است. ایشان در چند سال اخیر در دانشگاه‌های آزاد اسلامی، علم و صنعت و شاهد و پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی به تدریس و تحقیق اشتغال داشته است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: مدارهای فعال و غیر فعال مایکروویو، آنتن‌های مایکرواستریپ، الگوریتم‌های بهینه‌سازی، طراحی شبکه‌های رادیویی و طراحی مدارهای الکترونیکی. دکتر لطفی تاکنون بیش از ۵۵ مقاله در مجلات و همایش‌های معتبر داخلی و خارجی منتشر کرده است.

محمد جهان‌بخت متولد سال ۱۳۶۰ در همدان بوده و تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مخابرات در دانشگاه آزاد واحد شهر ری و در مقطع کارشناسی ارشد مخابرات در دانشگاه شاهد تهران به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۴ به پایان رسانده است. وی از سال ۱۳۸۴ تاکنون در مقطع دکتری مخابرات در دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات تهران مشغول به تحصیل می‌باشد. نام‌برده در دانشگاه‌های آزاد علوم تحقیقات و شهر قدس به تدریس مشغول بوده و به عنوان کارشناس ارشد با پژوهشکده برق جهاد دانشگاهی همکاری می‌نماید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، نانوالکترونیک، روش‌های عددی، و طراحی آنتن‌ها و مدارات مایکروویو. از ایشان تاکنون بیش از ۱۲ عنوان مقاله در همایش‌ها و مجلات معتبر داخلی و خارجی منتشر شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

محمدناصر مقدسی متولد سال ۱۳۳۸ در شهر ساوه ایران بوده و در سال ۱۳۶۴ موفق به دریافت مدرک کارشناسی مخابرات از دانشگاه متروپلیتن شهر لیدز انگلستان شده است. وی در سال‌های ۱۳۶۴ لغایت ۱۳۶۶ با عنوان مهندس طراح RF در شرکت گیگاتک نیوکاسل مشغول به فعالیت بوده و مدارک فوق لیسانس و دکترای خود را طی سال‌های ۱۳۶۶ تا ۱۳۷۲ از دانشگاه بردفورد اخذ نموده است. ایشان همچنین موفق به دریافت مدرک Post doc در زمینه گرمایش مواد در اجاق‌های مایکروویو در سال ۱۳۷۴ از دانشگاه ناتینگهام گردیده‌اند. وی از سال ۱۳۷۴ تاکنون در دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات با سمت‌های مدیر گروه تخصصی برق و نیز عضو کمیسیون مرکزی SLAS مشغول به فعالیت می‌باشند. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان عبارتند از آنتن‌های میکرواستریپ، مدارهای مایکروویو، روش‌های بهینه‌سازی و MEMS. از وی تاکنون بیش از ۳۱ عنوان مقاله در مجلات و همایش‌های معتبر علمی به چاپ رسیده است.

Archive of SID

www.SID.ir