كاربرد روش معادله سهموي در تحليل مسائل انتشار امواج داخل ساختمان

همايون عريضي*[۱] و نرگس نوري[۲]
[۱]استاد دانشكده مهندسي برق - دانشگاه علم و صنعت ايران
[۲]عضو هئيت علمي مركز تحقيقات مخابرات ايران

(تاريخ دريافت ۸۴/۱۲/۱۳ , تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۶/۵/۱۵ , تاريخ تصويب ۸۶/۱۲/۲۰)

چكيده

در اين مقاله معادله موج سهموي به شكل كلي براي انتشار در محيط هاي عايقي با تلفات استنتاج مي‌گردد و سپس اين معادله جهت بررسي مسائل انتشار امواج داخل ساختمان مورد استفاده قرار مي‌گيرد. شكل سهموي معادله موج، با استفاده از روش گام برداري حل مي‌شود كه در مقايسه با شكل اصلي اين معادله به حجم حافظه كمتري جهت محاسبه پاسخ نيازمند است. با استفاده از اين روش معين، برخي از مسائل انتشار امواج داخل ساختمان مانند انتشار از داخل پنجره‌ها، ديوارهايي با ميله‌هاي فلزي و در داخل راهروها مورد بررسي قرار مي‌گيرند. تطابق خوب نتايج شبيه‌سازي عددي با آنچه در ادبيات گزارش گرديده است، روش پيشنهادي را تأييد مي‌نمايد.

واژه هاي كليدي: معادله موج سهموي - انتشار امواج راديويي در داخل ساختمان - روش هاي معين

مقدمه

با توسعه روزافزون كاربرد سيستم هاي مخابراتي بدون سيم در داخل ساختمان ها، نياز به مدل سازي دقيق انتشار امواج راديويي در محيط هاي ساختماني افزايش چشمگيري يافته است. در دهه‌هاي گذشته، روش هاي معين[۱] فراواني جهت مدل سازي كانال هاي راديويي داخل ساختمان پيشنهاد شده‌اند. در اين راستا روش ردگيري اشعه[۲] يكي از متداول ترين شيوه‌هايي است كه به صورت وسيعي جهت طراحي مؤثر و بهينه شبكه‌هاي بدون سيم به كار رفته است [۱-۴]. اين روش به عنوان يک روش فركانس بالا هنگامي مؤثر است كه محاسبه ميدان در تعداد كمي از نقاط گيرنده مورد نياز باشد. در صورتي كه تغييرات سطح سيگنال دريافتي در كل محيط انتشار مد نظر باشد، روش ردگيري اشعه كارايي خوبي نخواهد داشت. از سوي ديگر در اين روش، ديوارها به صورت تيغه‌هاي عايقي با ضرايب انعكاس و انتقال فرنل مشخصي مدل مي‌شوند، كه الگوي مناسبي براي ديوارهاي همگن است. در ساختمان هاي امروزي، استفاده از ديوارهايي كه در آنها ميله‌هاي فلزي نصب شده است، بسيار مرسوم مي‌باشد. روش ردگيري اشعه نمي‌تواند به صورت دقيق انتشار امواج را از داخل اين ديوارها مدل سازي نمايد.

شيوه‌هاي ديگر مدل سازي انتشار امواج داخل ساختمان مبتني بر حل عددي معادلات ماكسول مي‌باشد كه در ميان آن ها روش تفاضل محدود حوزه زمان[۳] (FDTD) مورد توجه قرار گرفته است. اين روش پاسخ كاملي را از حل معادله در كل ناحيه انتشار به دست مي‌دهد، اما از آن جا كه مبتني بر حل معادله موج بيضوي مي‌باشد، جهت يافتن پاسخ عددي به زمان و حجم حافظه بالايي نيازمند است. به همين دليل بندرت از اين روش جهت مدل سازي كل ناحيه انتشار در داخل ساختمان استفاده مي شود [۵].

روش معادلات سهموي[۴] (PEM) تكنيک تمام موج سريعي است كه مدل سازي محيط انتشار و ويژگي هاي الكتريكي آن را امكان پذير مي‌سازد. از آن جاكه اين روش براي مدل سازي انتشار در جهت محوري[۵] مناسب است مي‌توان از تركيب آن با روش هاي مدل سازي انتشار ديگري مانند روش ردگيري اشعه، قابليت آن را در حل مسائلي كه در آنها انتشار در ساير جهت‌ها نيز رخ مي‌دهد، استفاده نمود [۶]. معادله موج سهموي با استفاده از تكنيک هاي گام‌برداري[۶] حل مي‌شود كه در مقايسه با روش هاي حل معادله موج بيضوي به حجم محاسبات كمتري نياز دارد. اين روش به صورت گسترده‌اي به عنوان يک روش مؤثر جهت مدل سازي انتشار امواج در خارج از محيط هاي ساختماني مورد استفاده قرار گرفته است [۶-۹]. بنابراين، به كارگيري اين روش در مسائل انتشار امواج در داخل ساختمان كه در اين مقاله پيشنهاد

* نويسنده مسئول : تلفن : ۷۷۲۴۰۴۹۲ , فاكس : ۷۷۲۴۰۴۹۰ , Email: h_oraizi@iust.ac.ir

مي‌گردد ايده جديدي مي باشد. با توجه به سرعت و دقت مورد نياز مي‌توان از شكل هاي مختلف دو يا سه بعدي PEM براي اين مسائل استفاده نمود. اشكال سه بعدي اين روش به دليل پيچيدگي زياد اعمال شرايط مرزي، تنها براي مدل سازي انتشار امواج در زواياي كوچكي نسبت به جهت محوري مشخص قابل اعمال است. تقريب دو بعدي انشعاب پله‌اي پاده[۷] از معادله سهموي كه توسط "كالينز" معرفي گرديده است [۱۰]، مي‌تواند مسائلي را با زواياي انتشار بسيار بزرگ تر مدل سازي نمايد.

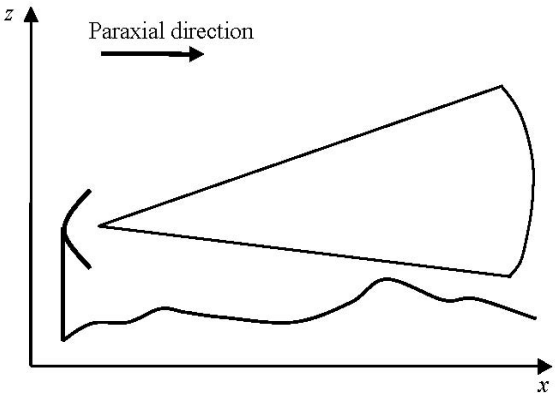
در اين مقاله بدون اين كه خدشه‌اي بر كليت مسئله وارد گردد، بر مسائل دو بعدي متمركز شده و براي شبيه سازي سريع و دقيق انتشار امواج در محيط- هاي ساختماني از تقريب انشعاب پله‌اي پاده استفاده مي‌شود. معادله موج سهموي فوق‌الذكر قبلاً براي محيط هاي بدون تلفاتي كه در آنها ضريب شكست محيط بسيار نزديک به واحد مي‌باشد، استنتاج گرديده است [۱۱]. در اين مقاله، ابتدا معادله موج سهموي در حالت كلي آن براي محيط هاي عايقي داراي تلفات استنتاج مي‌گردد كه مي‌تواند براي مدل سازي انتشار امواج از داخل ديوارها استفاده شود. شكل خاص اين معادله را مي‌توان به راحتي براي حالتي كه محيط انتشار فضاي آزاد است، از روي شكل كلي آن استنتاج نمود. سپس روش انشعاب پله‌اي پاده جهت حل شكل كلي معادله موج سهموي به كار مي‌رود. در واقع هدف اين است كه پس از استخراج شكل كلي معادله سهموي نشان دهيم اين روش را مي‌توان با وجود محدوديتي كه در مدل سازي انتشار زواياي خيلي بزرگ نسبت به جهت محوري دارد، در حل مسائل مختلفي كه انتشار در جهت غيرمحوري آنها كمتر صورت مي‌پذيرد, استفاده نمود. در واقع اين مقاله به كاربردي از روش معادله موج سهموي كه تا كنون مورد توجه قرار نگرفته است اشاره دارد. ممكن است برخي مسائل كه در اين مقاله حل گرديده با روش هاي ديگري هم حل شده باشد، كه در مقاله براي مقايسه از نتايج اين روش ها استفاده گرديده است. اما نشان خواهيم داد با توجه به خصوصيتي كه در روش معادله موج سهموي وجود دارد و به آن اشاره شد، تمام موج بودن و در عين حال نياز به حافظه كمتر براي محاسبه ميدان در ناحيه مورد نظر و سادگي پياده سازي نسبت به ساير روش هاي تمام موج، مسائل متنوع اشاره شده را مي‌توان با اين روش نيز حل كرد و به پاسخ قابل قبول رسيد. البته مي‌توان در مقاله- هاي جداگانه بر هر يك از مسائل مطرح شده در اينجا متمركز گرديد و براي حالتهاي مختلفي چون فركانس و پلاريزاسيون، مسئله را به شكل كلي‌تري بررسي نمود.

از آن جا كه پنجره‌ها يكي از مهم ترين اجزاي ساختمان ها مي‌باشند، پديده انتشار امواج صفحه‌اي از درون آن ها بايد مورد بررسي قرار گيرد. در حالت تابش امواج الكترومغناطيسي صفحه‌اي به يک رديف از پنجره‌ها، موج انتقالي ديگر موجي صفحه‌اي صرف نيست و نمي‌توان اين پديده را تنها با يک ضريب انتقال ساده مدل سازي كرد [۱۲]. در اين مقاله از PEM براي مدل سازي انتشار امواج از درون پنجره‌ها استفاده مي‌گردد. نتايج شبيه‌سازي هاي عددي به دست آمده براي دو حالت تابش عمودي و مايل موج، ارائه گرديده و با برخي از نتايج گزارش شده در مرجع [۱۲] مقايسه مي‌گردد.

ويژگي هاي انعكاس و انتقال ديوارهاي ناهمگن نيز از جمله مسائلي است كه با روش هاي عددي و تحليلي متعددي مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۳-۱۵]. در مرجع [۱۳] روش "مودي[۸]" براي مدل سازي انتشار امواج از درون ديوارهايي كه در آنها ميله‌هاي فلزي نصب شده به كار رفته است. روش هاي پيچيده‌اي مبتني بر الگوريتم- هاي المان محدود[۹] (FE) و FDTD نيز براي تحليل اين مسئله به‌ترتيب در مراجع [۱۴] و [۱۵] استفاده شده است. در اين مقاله، از روش PEM، كه پياده‌سازي آن براي اين مسئله بسيار ساده‌تر از ساير روش هاي تمام موج مي باشد، براي محاسبه ضرايب انعكاس و انتقال ديوارهاي سيماني كه در آنها ميله‌هاي فلزي نصب شده است، استفاده مي‌شود. چگونگي تأثير برخي از مشخصات ديوار مانند ضخامت آن، قطر ميله‌ها و فاصله بين آنها بر ضريب انتقال ديوارها نيز مورد بررسي قرار مي‌گيرد.

مسئله انتشار امواج در راهروها كه از مهم ترين اجزاي يک ساختمان به شمار مي‌روند نيز از جمله مسائلي است كه توجه محققين انتشار امواج را به سوي خود جلب نموده است. در يک راهرو، وجود ديوارها و موانع بر ويژگي هاي انتشاري امواج الكترومغناطيسي تأثير مي‌گذارد. اندازه‌گيري هاي مختلفي از ويژگي هاي انتشار امواج راديويي در داخل راهروها گزارش شده است [۱۶] و [۱۷]. روش هاي مبتني بر ردگيري اشعه نيز در مراجع [۱۸] و [۱۹] جهت شبيه‌سازي انتشار امواج در راهروها

به کار رفته‌اند. روش معادلات موج سهموي نيز مي‌تواند به عنوان روشي مؤثر براي مدل سازي پديده انتشار امواج در اين محيط ها استفاده شود. اثر موانعي مانند قفسه‌ها و كمدها را مي‌توان با كاهش محلي سطح مقطع راهرو با استفاده از PEM مدل سازي كرد. تغيير جهت راهروها نيز پديده مرسومي است كه در ساختمان ها ديده مي‌شود. براي مدل سازي انتشار امواج در چنين راهروهايي از تكنيک تجزيه ناحيه[۱۰] انتشار كه در مرجع [۲۰] ارائه شده، استفاده گرديده است. در اين تكنيك، ميدان محاسبه شده در يک زير ناحيه[۱۱] به‌عنوان ميدان اوليه براي محاسبه ميدان در زير ناحيه مجاور به كار مي‌رود.



شكل ۱: انتشار موج در جهت محوري.

در مقاله حاضر چندين مسئله اساسي و متعارف براي انتشار از طريق پنجره‌ها، ديوارها و درون راهروها بررسي خواهد شد. نتايج عددي حاصل ارائه و با نتايج موجود در ادبيات مقايسه مي‌گردد. از آن جا كه زمان شبيه‌سازي عددي در مراجع ذكر نشده است، در اينجا نمي‌توان مقايسه‌اي را در اين زمينه با مراجع موجود انجام داد.

استنتاج و حل معادله موج سهموي در محيط هاي عايقي داراي تلفات

همان طور كه در مقدمه اشاره گرديد، روش معادله موج سهموي براي آن دسته از مسائل انتشار امواج توسعه يافته است كه داراي جهت انتشار محوري مشخصي مانند محور x باشند (شكل ۱) [۲۰]. در واقع اين روش براي تحليل مسائلي با زواياي بزرگ نسبت به جهت محوري دچار محدوديت مي‌گردد. در روش معادله موج سهموي با مشخص بودن ميدان اوليه، توزيع ميدان به صورت گام به گام محاسبه مي شود. به اين ترتيب مقادير ميدان در هر گام، با استفاده از مقادير آن در گام قبلي محاسبه مي گردد. در يک محيط عايقي بدون منبع، معادله موج مستقل از y را مي‌توان براي مؤلفه ميدان ψ (براي پلاريزاسيون هاي افقي و قائم $\psi(x,z)$ به‌ترتيب بيان گر $E_y(x,z)$ و $H_y(x,z)$ است به شكل زير نوشت:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}-\gamma^2\psi=0 \qquad (۱)$$

كه در آن $\gamma=\alpha+j\beta$ ثابت انتشار مختلط محيط مي باشد. با فرض اين كه تابعيت زماني ميدان ها به شكل $\exp(-j\omega t)$ باشد، ميدان منتشر شونده عددي[۱۲] $\psi(x,z)$ در جهت $+x$ با جمله‌اي نمايي از x كه علامت نماي آن مثبت است متناسب خواهد بود. بنابراين مي‌توان $\psi(x,z)$ را به دو مؤلفه دامنه و فاز كه به‌ترتيب داراي تغييراتي كند و تند نسبت به x هستند تجزيه نمود [۲۱]:

$$\psi(x,z)=u(x,z)e^{j\beta x}. \qquad (۲)$$

با قراردادن رابطه (۲) در رابطه (۱)، معادله موج بر حسب u به شكل زير به دست مي‌آيد:

$$\frac{\partial^2u}{\partial x^2}+2j\beta\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial^2u}{\partial z^2}-\left(\gamma^2+\beta^2\right)u=0. \qquad (۳)$$

با فاكتورگيري نسبت به $\frac{\partial}{\partial x}$، معادله (۲) به شكل زير قابل بازنويسي است:

$$\left\{\frac{\partial u}{\partial x}+j\beta(1-Q)u\right\}\times\left\{\frac{\partial u}{\partial x}+j\beta(1+Q)u\right\}=0 \qquad (۴)$$

كه مقدار Q در آن به صورت زير تعريف مي‌گردد:

$$Q=\frac{\gamma}{j\beta}\sqrt{1-\frac{1}{\gamma^2}\frac{\partial^2}{\partial z^2}}. \qquad (۵)$$

در معادله (۴) جملات اول و دوم به‌ترتيب بيانگر امواج منتشر شونده در جهات $+x$ و $-x$ مي‌باشند. رابطه (۵)، Q را براي محيط هاي عايقي داراي تلفات نشان مي‌دهد. در صورتي كه محيط انتشار فضاي آزاد باشد, به راحتي مي‌توان با $\gamma=j\beta=jk_0$، رابطه معمول Q [۲۰] را كه براي انتشار در فضاي آزاد تعريف مي‌گردد استخراج نمود:

$$Q=\sqrt{1+\frac{1}{k_0^2}\frac{\partial^2}{\partial z^2}}. \qquad (۶)$$

معادله (۴) را مي‌توان با استفاده از تكنيک هاي گام‌برداري حل كرد. اگر Z به شكل زير تعريف شود:

$$Z=-\frac{1}{\gamma^2}\frac{\partial^2}{\partial z^2} \qquad (۷)$$

آنگاه پاسخ معادله (۴) را مي‌توان براي موج منتشر شونده

در جهت $+x$ به صورت زير نوشت:

$$u(x+\Delta x,z)=e^{-j\beta\Delta x\left(1-\frac{\gamma}{j\beta}\sqrt{1+Z}\right)}u(x,z). \qquad (۸)$$

که در آن انتخاب مقدار Δx به ابعاد مسئله نسبت به طول موج بستگي دارد.

در واقع، همان طور که در ساير روش هاي تمام موج ديگر نيز معمول است، نحوه تقسيم‌بندي مسئله بايد به صورتي باشد که تمامي جزئيات هندسي ساختار محيط ديده شود. با در نظر گرفتن اين نکته، بايد Δx را براي مسئله مورد نظر به صورت کسري از طول موج انتخاب کرد. براي پياده‌سازي عددي معادله (۸)، بايد تقريب مناسبي را براي جمله نمايي آن استفاده نمود. دقت و پايداري جواب به تقريبهاي عوامل نمايي و ريشه دوم بستگي دارد. شيوه‌اي بسيار موفق در مدل سازي انتشار با زواياي بزرگ نسبت به جهت محوري، به کارگيري تقريب SSP است. اين روش عامل نمايي ظاهر شده در پاسخ گام‌برداري حاصل از معادله (۸) را تقريب مي‌زند. با به کارگيري تقريب پاده براي عبارت نمايي داريم:

$$e^{-j\beta\Delta x\left(1-\frac{\gamma}{j\beta}\sqrt{1+Z}\right)}\approx 1+\sum_{l=1}^{N}\frac{a_l Z}{1+b_l Z} \qquad (۹)$$

که N ۲ ضريب مختلط معادله (۹) با استفاده از روش ارائه شده در [۲۲] محاسبه مي‌گردند. با قرار دادن معادله (۹) در معادله (۸) پاسخ SSP به شکل زير به دست مي‌آيد:

$$u(x+\Delta x,z)\approx u(x,z)+\sum_{l=1}^{N}\frac{a_l Z}{1+b_l Z}u(x,z). \qquad (۱۰)$$

عبارت جمع موجود در سمت راست معادله (۱۰) را مي‌توان به سادگي براي هر يک از جملات به صورت جداگانه محاسبه نمود. با فرض:

$$v_l(x+\Delta x,z)=\frac{a_l Z}{1+b_l Z}u(x,z) \qquad (۱۱)$$

مي‌توان نوشت:

$$u(x+\Delta x,z)\approx u(x,z)+\sum_{l=1}^{N}v_l(x+\Delta x,z). \qquad (۱۲)$$

که براي هريک از v_l ها به صورت مستقل قابل حل است. با گسسته‌سازي معادله (۱۱) نسبت به z، معادله ديفرانسيل مربوط به هر يک از v_l ها به شکل زير خواهد بود:

$$v_l^{m+1}-\left(2-\frac{\gamma^2\Delta z^2}{b_l}\right)v_l^m+v_l^{m-1}=\frac{a_l}{b_l}\left(u^{m+1}-2u^m+u^{m-1}\right)$$
$$m=0,1,\ldots,M \qquad (۱۳)$$

که

$$M=\frac{z_{\max}}{\Delta z}\ \text{و}\ v_l^m=v_l(x+\Delta x,m\Delta z) \qquad (۱۴)$$

شرايط مرزي در مرزهاي بالا و پايين ناحيه انتشار نيز بايد در نظر گرفته شوند تا بتوان توابع v_l^{-1} و v_l^{M+1} را از روي اين شرايط مرزي محاسبه نمود. در حل مسائل پراکندگي الکترومغناطيسي در فضاي آزاد با استفاده از روش SSP، شرايط مرزي غير محلي[۱۳] (NLBCs) براي تقريب زواياي بزرگ نسبت به جهت محوري مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳]. اين شرط را مي‌توان براي مرز بالا به صورت زير نوشت:

$$\frac{\partial v_l(x,z_{\max})}{\partial z}=j\int_0^x\frac{\partial v_l(\xi,z_{\max})}{\partial\xi}w(x-\xi)d\xi + j\frac{\partial v_l(x,z_{\max})}{\partial x}+G_l^0(x,z_{\max}) \qquad (۱۵)$$

که $w(x)=J_0(-k_0x)-jJ_1(-k_0x)$ مي‌باشد (J_0 و J_1 توابع بسل نوع اول مرتبه صفر و يک هستند) و

$$G_l^0(x,z_{\max})=-j\int_0^x\frac{\partial v_l^0(\xi,z_{\max})}{\partial\xi}w(x-\xi)d\xi + \frac{\partial v_l^0(x,z_{\max})}{\partial z}-j\frac{\partial v_l^0(x,z_{\max})}{\partial x} \qquad (۱۶)$$

که v_l^0 پاسخ معادله موج است مشروط بر اين که

$$v_l^0(0,z_{\max})=v_l(0,z_{\max}) \qquad (۱۷)$$

باشد. مشابه اين شرط براي مرز پايين نيز نوشته مي‌شود.

اگر ناحيه انتشار توسط مرزهاي امپدانسي محدود شده باشد، بايد از شرايط مرزي امپدانسي محلي[۱۴] در مرزهاي بالا و پايين استفاده نمود [۲۴]:

$$\frac{\partial v_l(x,z_{\min})}{\partial z}+\alpha_1 v_l(x,z_{\min})=0 \qquad \text{مرز پايين} \qquad (۱۸)$$

$$\frac{\partial v_l(x,z_{\max})}{\partial z}-\alpha_2 v_l(x,z_{\max})=0 \qquad \text{مرز بالا}$$

که α_1 و α_2 به ترتيب امپدانس هاي سطحي نرماليزه شده سطوح پاييني و بالايي مي‌باشند.

در صورتي که انتشار امواج راديويي از درون ساختارهاي متناوب مد نظر باشد، روش PEM به يکي از سلول هاي ساختار اعمال مي‌شود و شرايط مرزي متقارن[۱۵] در مرزهاي بالا و پايين به کار مي‌رود [۲۱]:

$$v_l^{-1}=v_l^1,\qquad v_l^{M-1}=v_l^{M+1}. \qquad (۱۹)$$

معادله (۱۳) همراه با يکي از شرايط مرزي متناسب با مسئله، شرايط مرزي را تعريف مي‌نمايند. با

الگوریتم فوق، میدان در گام $x+\Delta x$ به صورت تابعي از میدان در گام x و به شکل یک سیستم معادلات خطي تعریف مي‌گردد. روابط فوق را مي‌توان به شکل ماتریسي زیر خلاصه نمود:

$$\mathbf{A}_l \mathbf{V}_l(x+\Delta x) = \mathbf{U}_l(x) \qquad (۲۰)$$

که $\mathbf{A}_l$ یک ماتریس سه قطري مي‌باشد. با محاسبه هر یک از ماتریسهاي $\mathbf{V}_l$ در $x+\Delta x$، میدان از معادله زیر محاسبه مي‌گردد:

$$\mathbf{U}(x+\Delta x) = \sum_{l=1}^{N} \mathbf{V}_l(x+\Delta x) \qquad (۲۱)$$

و الگوریتم در گام بعدي به همین شکل ادامه مي‌یابد.

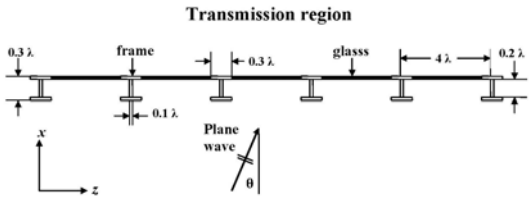
نتایج شبیه سازي عددي

براي حل یك مسئله با روش توضیح داده شده در بخش قبل، در ابتدا باید با معلوم بودن فرکانس کار و ابعاد و ساختار هندسي محیط انتشار طول تقسیم ها در جهت z، Δz و طول گام ها در جهت انتشار Δx را معلوم نمود. محاسبات باید با معلوم بودن میدان اولیه در گام نخست آغاز گردد. در صورتي که موج صفحه‌اي به ساختار مسئله بتابد شروع محاسبات از یك صفحه مرجع که آن را صفحه $x=0$ مي‌گیریم, مي‌باشد که بر روي این صفحه مقدار موج صفحه‌اي در محل تقسیم هاي انجام شده بر روي محور z معلوم است. در صورتي که آنتن فرستنده در داخل محیط قرار گرفته باشد، با توجه به این که معمولاً در مسائل انتشار امواج، منبع توسط میدان دور آن تعریف مي‌شود، لازم است با استفاده از تبدیل میدان دور-میدان نزدیک [۲۰]، میدان را در محل منبع (صفحه $x=0$) محاسبه کرد. میدان به دست آمده بر صفحه $x=0$، به‌عنوان میدان اولیه جهت محاسبات گام به گام در روش معادلات سهموي به کار مي‌رود. با معلوم بودن Δz، γ، محاسبه a_l و b_l از تقریب پاده عبارت نمایي و اعمال شرایط مرزي غیر محلي در مرزهاي بالا و پایین مسئله، ماتریس $\mathbf{A}_l$ محاسبه مي‌گردد. با در دست بودن بردار میدان اولیه $\mathbf{U}_l(x=0)$ و استفاده از روابط (۱۸) و (۱۹) میدان در محل گام اول، $x=\Delta x$، محاسبه مي‌شود و الگوریتم براي گام هاي بعدي به همین ترتیب ادامه مي‌یابد.

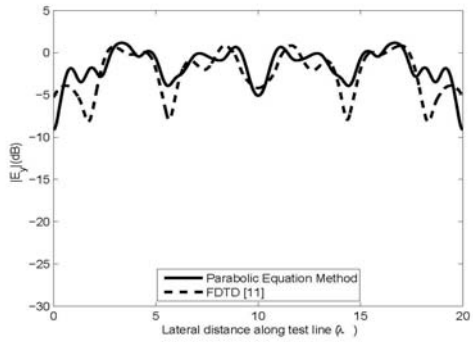
در ادامه، روش معادله موج سهموي و الگوریتم پیاده‌سازي آن براي تحلیل برخي از مسائل انتشار امـــواج رادیویي در داخل ساختمان مورد استفاده قرار مي‌گیرد.

انتشار موج از درون ساختارهاي پنجره‌اي

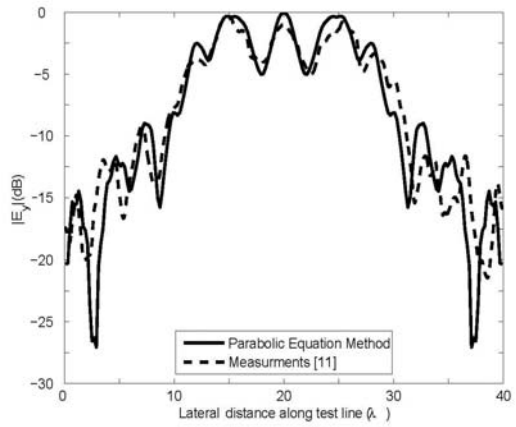
ساختار پنجره‌اي نشان داده شده در شکل(۲) مي‌تواند به عنوان مثالي براي تأیید PEM در حل مسائل انتشار داخل ساختمان استفاده شود. یک موج صفحه‌اي با پلاریزاسیون افقي به ردیفي متشکل از پنج پنجره با چهارچوب فلزي (هادي کامل) مي‌تابد. شیشه پنجره‌ها با $\varepsilon_r = 5$ مدل گردیده است. جهت عمود بر پنجره‌ها به عنوان جهت محوري انتخاب شده و براي محدودسازي ناحیه محاسبات از شرایط مرزي غیر محلي براي تقریب زواياي بزرگ استفاده شده است. طول گام ها، Δx، به دلیل ابعاد کوچك چهارچوب پنجره‌ها برابر با λ ۰/۰۵ انتخاب گردیده است. فرض کنید که موج صفحه‌اي یک نواختي به صورت عمودي به ساختار فوق الذکر بتابد. با معلوم بودن میدان تابشي، محاسبات دقیقاً از محل قرار گرفتن پنجره‌ها آغاز مي‌گردد. شکل (۳) میدان پراش حاصل را در فاصله λ ۱۵ از پنجره‌ها نشان مي‌دهد. مقادیر میدان محاسبه شده توسط PEM با مقادیر به دست آمده از روش FDTD در [۱۱] هم خواني خوبي را نشان مي‌دهد. در شکل (۴) نیز میدان محاسبه شده توسط PEM در فاصله λ۳۶ از پنجره‌ها با مقادیر حاصل از اندازه‌گیري در مرجع [۱۱] تطابق دارد که خود تأییدي بر روش ارائه شده در این مقاله مي باشد.



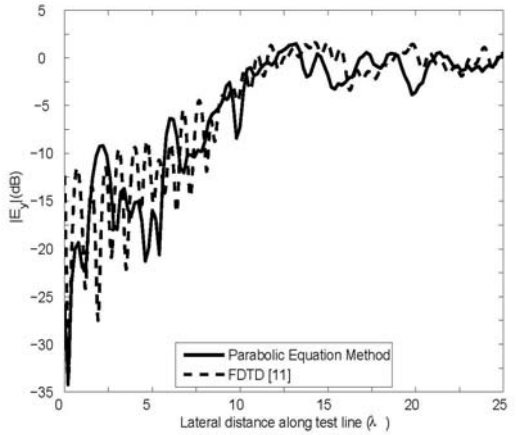
شکل ۲: تابش موج به یک ساختار پنجره‌اي.



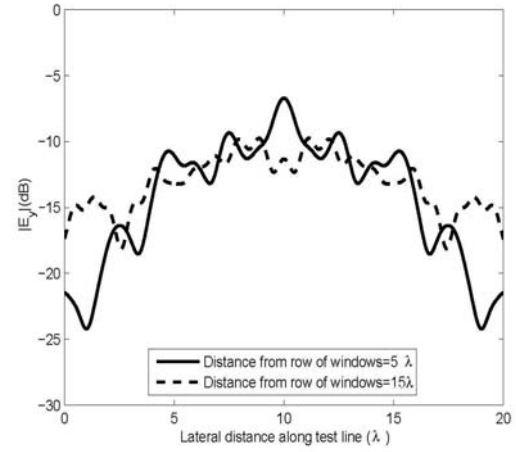
شکل ۳: مقایسه بین نتایج به دست آمده از **PEM** و **FDTD** در فاصله λ ۱۵از پنجره‌ها براي تابش عمودي موج صفحه‌اي یک نواخت به ساختار شکل ۲.



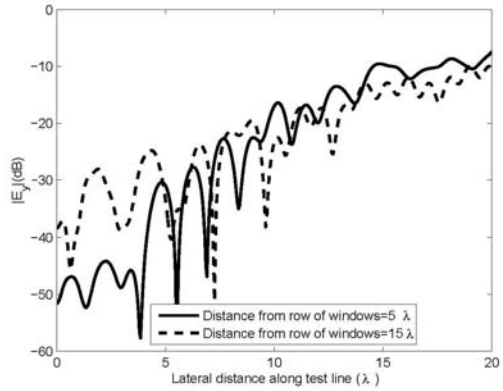
شكل ۴: مقايسه بين نتايج به دست آمده از **PEM** و اندازه‌گيري در فاصله λ ۳۶ از پنجره‌ها براي تابش عمودي موج صفحه‌اي يكنواخت به ساختار شكل ۲.



شكل ۵: مقايسه بين نتايج به دست آمده از **PEM** و **FDTD** در فاصله λ**15** از پنجره‌ها براي تابش مايل موج صفحه‌اي يكنواخت با زاويه ۴۰°.



شكل ۶: پرتو پراش حاصل از پنجره‌ها در فواصل λ ۵ و λ ۲۵براي تابش عمودي يک منبع گوسي به ساختار شكل۲.



شكل ۷: پرتو پراش حاصل از پنجره‌ها در فواصل λ ۵ و λ ۲۵ براي تابش مايل يک منبع گوسي با زاويه ۲۰° به ساختار شكل۲.

براي بررسي دقت روش پيشنهادي براي تابش مايل موج صفحه‌اي، ميدان پراش حاصل در فاصله λ ۱۵ در حالت تابش مايل موج صفحه‌اي يكنواخت با زاويه تابش ۴۰° به رديف پنجره‌ها، رسم شده و با مقادير به دست آمده توسط روش FDTD در مرجع [۱۱] مقايسه گرديده است. در اين شكل نيز هم خواني خوب نتايج حاصل از دو روش مشاهده مي‌گردد.

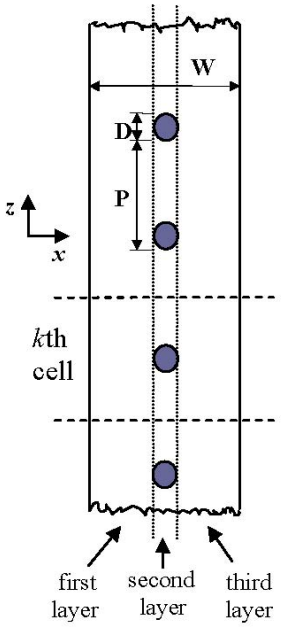
براي حالت تابش موج صفحه‌اي غير يكنواخت، منبعي گوسي با پهناي تابه[۱۶] ۱۰° را كه در فاصله λ ۲۰ از پنجره‌ها بر روي خط تقارن ساختار قرار گرفته است فرض نماييد. در اين حالت با معلوم بودن ميدان روزنه منبع گوسي، محاسبات PEM دقيقاً از محل آنتن فرستنده آغاز مي‌گردد. شكل هاي (۶) و (۷) ميدان پراش حاصل را براي تابش عمودي و تابش مايل تابه گوسي تحت زاويه ۲۰° به رديف پنجره‌ها نشان مي‌دهد. همان طور كه انتظار مي‌رود، در فواصل دورتر پرتو پراش حاصل پهن تر مي‌شود و از طرفي افت ناشي از انتشار نيز افزايش مي‌يابد.

انتشار موج از درون ديوارهايي با ميله‌هاي فلزي

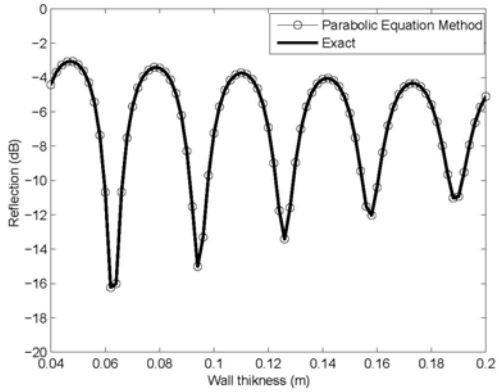
از PEM مي‌توان براي تحليل انتشار امواج الكترومغناطيسي از درون ديوارهايي با ميله‌هاي فلزي نيز استفاده نمود. در شكل (۸) ساختار ديواري كه در آن ميله‌هاي فلزي نصب شده است مشاهده مي‌شود. اين ديوار را مي‌توان با يک ساختار سه لايه‌اي متناوب مدل كرد به شكلي كه ميله‌اي با سطح مقطع دايره‌اي به قطر D با ميله‌اي با سطح مقطع مربعي شكل به ضلع D تقريب زده مي‌شود [۲۵]. اين مسئله را مي‌توان با اعمال PEM به

یک تک سلول و استفاده از شرایط مرزي متقارن در مرزهاي این سلول تحلیل نمود. موجي صفحه‌اي که به صورت عمودي در امتداد جهت $+x$ به دیوار مي‌تابد، یک میدان انتقالي و یک میدان انعکاسي در سمت چپ دیوار ایجاد مي‌کند. میدان انعکاسي ذخیره شده و میدان انتقالي به عنوان میدان اولیه PEM مورد استفاده قرار مي‌گیرد. آنگاه میدان با استفاده از روش گام برداري در امتداد $+x$ تا جایي محاسبه مي‌گردد که خط محاسبات به سمت چپ میله برخورد نماید. در این جا در اثر برخورد موج با میله، موج انعکاسي ایجاد مي‌گردد. موج انعکاسي ذخیره شده و الگوریتم با اعمال شرایط مرزي هادي کامل بر سطح میله و شرایط مرزي متقارن در مرزهاي سلول تا سمت راست میله ادامه مي‌یابد. سپس الگوریتم در ناحیه سوم تا مرز سمت راست دیوار پیش مي‌رود، جایي که میدان هاي انعکاسي و انتقالي جدیدي ایجاد مي‌گردند. در این مرحله، میدان انتقالي ذخیره شده و میدان انعکاسي به‌عنوان میدان اولیه منظور مي شود.

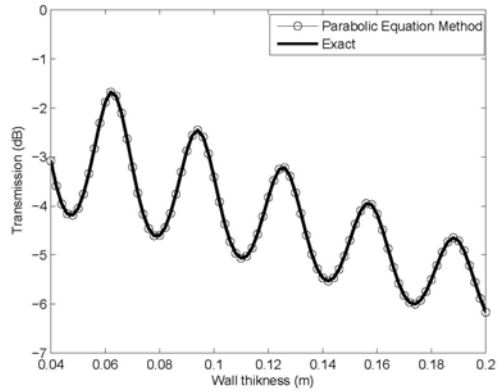
در مرحله بعد جهت $-x$ به‌عنوان جهت محوري انتشار انتخاب شده و الگوریتم در جهت عکس تا سمت چپ میله ادامه مي‌یابد. در این جا، میدان انعکاسي از مرحله قبل به میدان این مرحله اضافه گردیده و الگوریتم تا سمت چپ دیوار که در آنجا میدانها انعکاسي و انتقالي دیگري ایجاد مي‌گردند، پیش مي‌رود. در این جا میدان انتقالي ذخیره شده و میدان انعکاسي به‌عنوان میدان اولیه براي مرحله بعدي محاسبات در جهت $+x$ در نظر گرفته مي‌شود. این الگوریتم تا جایي ادامه مي‌یابد که دامنه میدان محاسبه شده در آن مرحله از یک مقدار آستانه کمتر گردد. آنگاه، میدان هاي انتقالي و انعکاسي کلي به ترتیب از مجموع تمامي میدان هاي انعکاسي و انتقالي ذخیره شده در سمت راست و چپ دیوار محاسبه مي گردند. براي تأیید PEM و شرایط مرزي متقارن، این روش براي دیوار همگني با ثابت عایقي مختلط $\varepsilon_r = 7 - j0.3$ در فرکانس 1800 MHz اعمال شده است. طول گام ها، $\Delta x = 0.05\lambda$، انتخاب گردیده است. در شکل هاي (۹) و (۱۰) مشاهده مي‌شود که نتایج به دست آمده از PEM براي ضرایب انعکاس و انتقال با مقادیر دقیق تئوري (ضرایب انعکاس و انتقال فرنل) یکسان است. در این جا مي‌توان نتیجه گرفت که PEM همراه با شرایط مرزي متقارن قادر است ضرایب انعکاس و انتقال را بـــراي دیوارهاي همگن به‌صورت دقیق محاسبه نماید.



شکل ۸: ساختار کلي دیواري که در آن میله‌هاي فلزي نصب شده است.

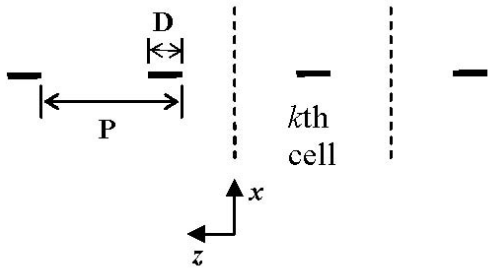


شکل ۹: ضریب انعکاس براي دیواري با $\varepsilon_r = 7 - j0.3$ در فرکانس MHz ۱۸۰۰.

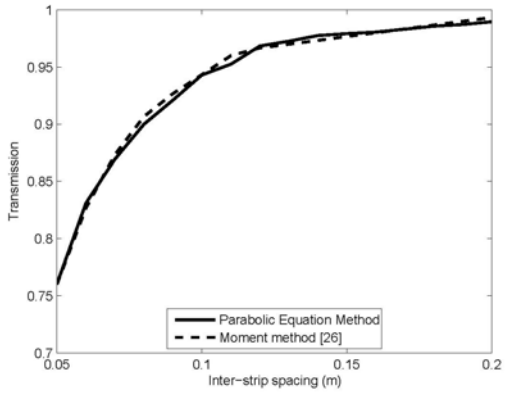


شکل ۱۰: ضریب انتقال براي دیواري با $\varepsilon_r = 7 - j0.3$ در فرکانس MHz ۱۸۰۰.

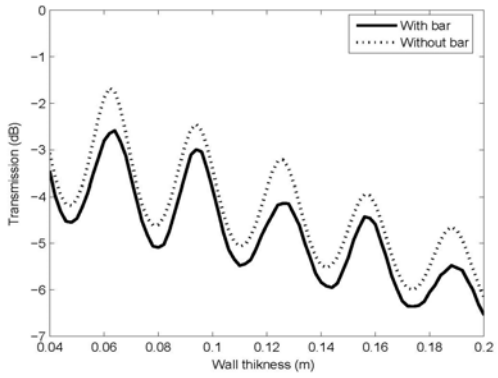
در مرحله بعد، روش پيشنهادي به يک ساختار متناوب اعمال گرديده است. مسئله پراکندگي الکترومغناطيسي را از يک آرايه بي نهايت دو بعدي متشکل از نوارهاي موازي هادي کامل که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، در نظر بگيريد. نتايج به دست آمده از PEM براي ضريب انعکاس در حالت $D=1$ mm و فرکانس 1 GHz به ازاي فواصل مختلف بين نوارها در شکل (۱۲) رسم شده است و با نتايج حاصل از روش ممان در [۲۶] مقايسه گرديده و مشاهده مي‌شود که روش پيشنهادي مي‌تواند به‌عنوان روش مؤثري براي حل مسائل تابش موج به ساختارهاي متناوب به کار رود.



شکل ۱۱: آرايه‌اي متشکل از نوارهاي هادي کامل موازي.

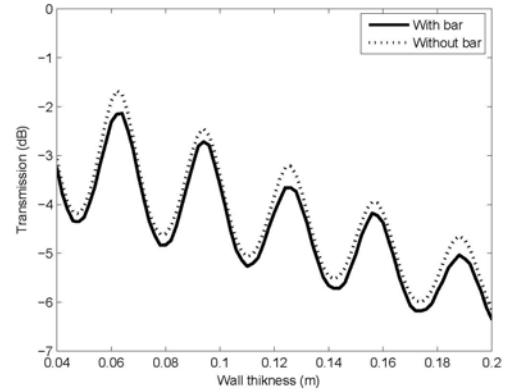


شکل ۱۲: ضريب انتقال آرايه شکل ۱۱ در فرکانس **1GHz** براي **D=2mm**.

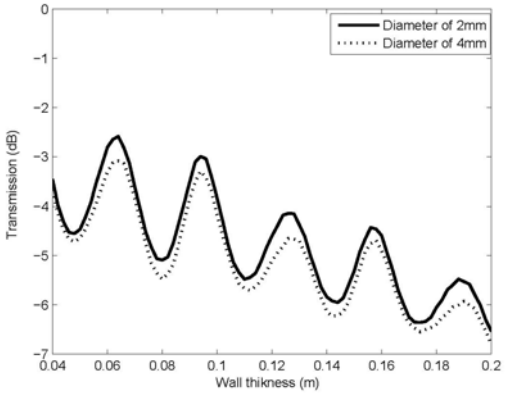


شکل ۱۳: ضريب انعکاس ديوار در فرکانس **1800MHz** براي **P=.1m**، **D=2mm**.

براي بررسي اثر يک شبکه از ميله‌هاي مستقر در داخل ديوار، PEM به ساختار ديوار نشان داده شده در شکل (۸) با $\varepsilon_r = 7 - j0.3$ اعمال گرديده است. فرکانس ۱۸۰۰ MHzو قطر ميله‌هاي فلزي ۲mm مي‌باشد. در شکل هاي (۱۳) و (۱۴) به ترتيب ضرايب انتقال براي فواصل ميله‌هايي برابر با ۰/۱ m و ۰/۲ m، نشان داده شده است. مقايسه اين دو شکل نشان مي‌دهد که با افزايش فاصله ميله‌ها، اثر آنها بر ضريب انتقال کاسته مي‌شود. در شکل (۱۵) ضرايب انتقال براي دو قطر متفاوت ميله ۲ mm و ۴ mm رسم شده است. اين شکل نشان مي‌دهد که تأثير تغييرات قطر ميله در اين فرکانس بر ضريب انتقال قابل چشم پوشي نمي باشد.



شکل ۱۴: ضريب انعکاس ديوار در فرکانس **1800MHz** براي **P=.2m**، **D=2mm**.

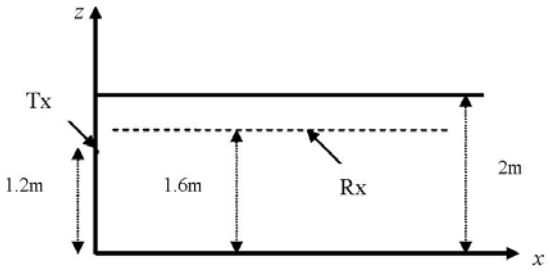


شکل ۱۵: ضريب انعکاس ديوار در فرکانس **1800MHz** براي **P=.1m**، **D=2mm** و **D=4mm**.

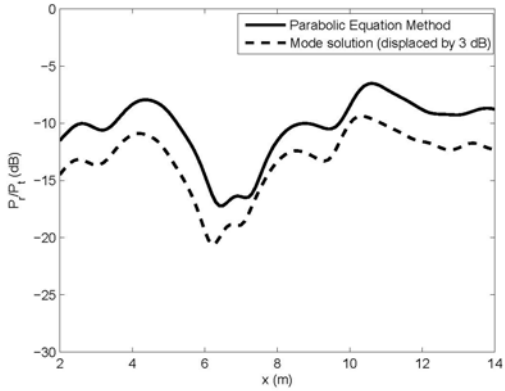
انتشار موج در داخل راهروها

انتشار امواج راديويي در درون راهروها از جمله مسائلي است که قابل تحليل با روش معادله موج سهموي است. فرض کنيد که منبعي گوسي با پهناي تابه ۱۵° بين دو صفحه هادي کامل موازي قرار گرفته باشد. همان طور

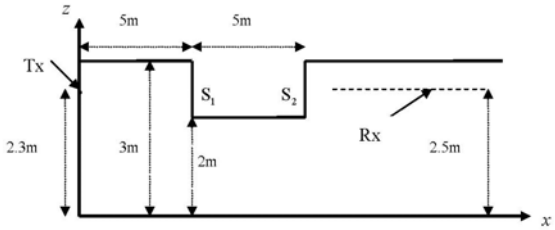
که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود فاصله بین صفحات ۲m است. آنتن فرستنده با فرکانس کار ۳ GHz در $(0,1.2)\,\mathrm{m}$ نصب شده در حالي که گیرنده در امتداد $(x,1.6)\,\mathrm{m}$ حرکت می‌کند. از آنجا که مسئله انتشار در راهروي شکل (۱۶) همانند تحریك و انتشار موج در یك موج بر می‌باشد می‌توان آن را با روش تئوري مودها نیز تحلیل کرد.



شکل ۱۶: ساختار دو بعدي یک راهرو.

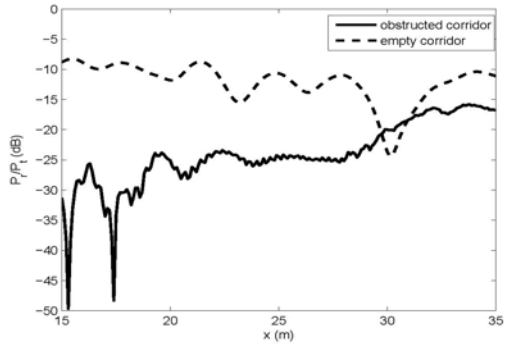


شکل ۱۷: توان دریافتي در راهروي شکل ۱۶ محاسبه شده با **PEM** و تئوري مودها مرجع **[۲۹]**.



شکل ۱۸: ساختار دو بعدي یک راهرو با مانع.

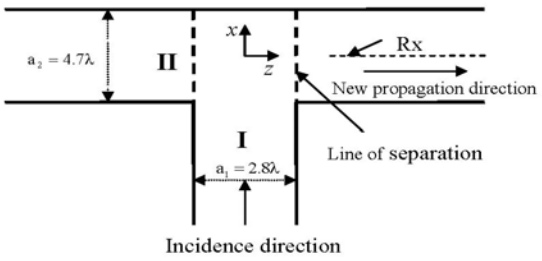
در روش تئوري مودها با توجه به نوع تحریکي که در موج بر وجود دارد، می‌توان مودهایي را که در محیط انتشار تحریك و منتشر می‌شوند با استفاده از روش توضیح داده شده در مرجع [۲۹] پیدا کرده سپس براي هر نقطه گیرنده، میدان دریافتي را که مجموع میدان هاي مودهاي مختلف در آن نقطه است محاسبه نمود. براي محاسبه پوشش رادیویي در کل ناحیه انتشار باید این کار به ازاي هر نقطه در ناحیه انجام شود. اما در روش معادله موج سهموي الگوریتم به‌صورتي است که میدان در تمامي نقاطي که داراي x یکساني هستند به صورت همزمان محاسبه می‌گردد. در شکل (۱۷) توان دریافتي محاسبه شده توسط PEM با تواني که از تئوري مودها به دست آمده، مقایسه گردیده است. از آن جا که آنتن فرستنده یك منبع گوسي با پهناي پرتو باریك است، دامنه موج الکترومغناطیسي منتشر شونده در راستاي محوري (جهت x) بسیار بیشتر از مقدار آن در راستاي غیر محوري مي باشد. از سوي دیگر ساختار محیط راهرو به شکلي است که مانع از انحراف جهت میدان منتشر شونده از راستاي محوري می‌گردد. بنابراین، همان طور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود، توان محاسبه شده با روش PEM تطابق بسیار خوبي را با مقدار محاسبه شده توسط تئوري مودها نشان می‌دهد.



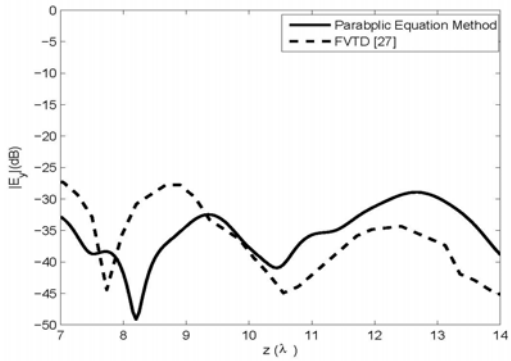
شکل ۱۹: مقایسه توان دریافتي در راهروي بي مانع با توان دریافتي در راهروي با مانع.

در مثال بعد، اثر وجود موانع در داخل راهرو را بررسي می‌کنیم. شکل (۱۸) ساختار مورد نظر براي این منظور را نشان می‌دهد. براي شبیه‌سازي عددي از منبعي گوسي مشابه منبع مثال قبل در راهروپي با عرض ۳ m استفاده شده است. ثابت عایقي مختلط دیوارها برابر $\varepsilon_r = 4 - j0.12$ می‌باشد. فرستنده در $(0,2.3)\,\mathrm{m}$ نصب شده در حالیکه گیرنده در امتداد $(0,2.5)$ m حرکت می‌کند. در فاصله ۵ m از فرستنده عرض راهرو به ۲m کاهش می‌یابد اما، در فاصله ۱۰ m از فرستنده عرض راهرو به مقدار اولیه‌اش باز می‌گردد. محاسبات دقیقاً از محل فرستنده با روش گام برداري با $\Delta x = 1\lambda$ و اعمال شرایط مرزي امپدانسي بر دیواره‌ها آغاز می‌گردد. هنگامي که ناحیه محاسبات به سطح S_1 برسد، اندازه میدان روي این سطح برابر صفر قرار داده می‌شود و الگوریتم تا سطح

S_2 ادامه مي‌يابد. در اين مرحله، مقدار ميدان روي سطح S_2 برابر صفر قرار داده شده و گام‌برداري در ناحيه بدون مانع پس از سطح S_2 ادامه مي‌يابد. در شكل (۱۹) توان دريافتي براي دو حالت راهروي بدون مانع و راهروي با مانع رسم شده است. همان طور كه انتظار مي‌رود در راهروي با مانع، پس از محل مانع، توان دريافتي بسيار كمتر از راهروي بي مانع است، اما هرچه گيرنده از مانع دورتر مي‌شود، توان دريافتي‌اش افزايش مي‌يابد.



شكل ۲۰: نمايي دو بعدي از تغيير جهت در يک راهرو.



شكل ۲۱: توزيع ميدان الكتريكي در امتداد خط تقارن راهروي **II** محاسبه شده توسط **PEM** و روش **FVTD**.

در بسياري از ساختمان هاي اداري، تغيير جهت راهروها پديده مرسومي است. ساختار هندسي نمونه‌اي از اين راهروها در شكل (۲۰) نشان داده شده است. در اين مسئله فرستنده در راهروي I قرار گرفته است در حالي كه گيرنده در امتداد مسيري در راهروي Π كه عمود بر جهت محوري راهروي I است، حركت مي‌كند. براي حل اين مسئله توسط PEM، از تكنيک تجزيه ناحيه استفاده مي‌شود. در اين تكنيک راهروي Π به عنوان زير ناحيه‌اي از كل ناحيه انتشار فرض مي‌گردد و ميدان در اين راهرو با استفاده از حل معادله موج سهموي در كل ناحيه انتشار به دست مي‌آيد. آنگاه ميدان در نقاط قرار گرفته بر روي مرزهاي راهروهاي I و Π محاسبه مي‌شود و سپس ميدان اين نقاط به عنوان ميدان اوليه براي مرحله بعدي محاسبه ميدان در راهروي Π (كه جهت محوري‌اش در امتداد محور z است) به كار مي‌رود. براي تأييد اين روش ميدان در امتداد خط تقارن راهروي Π با استفاده از PEM محاسبه شده و با نتايج حاصل از روش "حجم محدود حوزه زمان[۱۷]" (FVTD) ارائه شده در مرجع [۲۷] مقايسه گرديده است. فرض كنيد كه راهروي I با مود غالب TE موجبر صفحات موازي تحريک شده باشد. فركانس كار ۹/۳۵ GHz و ثابت عايقي مختلط ديوارها برابر $\varepsilon_r = 7 - j1$ است. پهناي راهروهاي I و Π به‌ترتيب $a_1 = 2.8\lambda$ و $a_2 = 4.7\lambda$ مي‌باشد. توزيع ميدان الكتريكي به دست آمده از PEM در امتداد خط تقارن راهروي Π، در شكل (۲۱) رسم شده است. به دليل تقارن مسئله توزيع ميدان فقط براي سمت راست راهروي Π ارائه گرديده است. همان طور كه در شكل (۲۱) ملاحظه مي‌شود، نتايج به دست آمده از PEM و FVTD هم خواني خوبي دارند.

نتيجه‌گيري

در اين مقاله، معادله موج سهموي براي محيط‌هاي عايقي داراي تلفات بر اساس تقريب SSP به منظور مطالعه مسائل انتشار امواج داخل ساختمان استخراج گرديد. پرتو پراش حاصل از رديفي از پنجره‌ها با استفاده از PEM به دست آمد و با نتايج حاصل از روش FDTD و اندازه‌گيري براي تابش عمودي و مايل موج صفحه‌اي يكنواخت مقايسه گرديد. سپس از PEM براي بررسي تابش امواج صفحه‌اي غير يک نواخت به پنجره‌ها استفاده شد. هم چنين PEM در تحليل مسئله تابش موج صفحه‌اي بر ديوارهايي با ميله‌هاي فلزي مورد استفاده قرار گرفت. نشان داده شد كه تأثير ميله‌ها بر خواص انتشاري ديوار قابل ملاحظه مي باشد. در نهايت روش پيشنهادي براي بررسي مسائل انتشار امواج داخل راهروهاي بدون مانع، راهروهاي داراي مانع و راهروهايي با جهت‌هاي متغير بكار رفت. مقايسه نتايج حاصل از PEM پيشنهادي و نتايج گزارش شده حاكي از اين است كه مي‌توان از روش پيشنهادي براي مدل سازي انتشار محوري امواج راديويي در محيط هاي ساختماني استفاده نمود. با تركيب اين روش با روش هاي ديگر كه عمده‌ترين آن روش ردگيري اشعه مي‌باشد نيز مي‌توان مدل سازي انتشار امواج در جهت‌هايي غير از امتداد محوري را انجام داد.

مراجع

1 - Seidel, S. Y. and Rappaport, T. S. (1994). "Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design." *IEEE Trans. Veh. Technol.,* Vol. 43, PP. 879-891.

2 - Yang, C., Wu, B. and Ko, C. (1998). "A ray-tracing method for modeling indoor wave propagation and penetration." *IEEE Trans. Antennas Propagat.,* Vol. 46, PP. 907-919.

3 - Torres, R. P., Valle, L., Domingo, M. and Loredo, S. (2001). "On the suitability of GO/UTD modeling of microwave propagation in indoor environments." *Int. J. Numer. Model.,* PP. 257-281.

4 - Ji, B., Li, H., Wang, H. X., Chen, H. Y. and Sarkar, T. K. (2001). "Efficient ray-tracing methods for propagation prediction for indoor wireless communications." *IEEE Antennas and Propagat. Magazine,* Vol. 43, PP. 41-49.

5 - Lee, J. W. H. and Lai, A. K. Y. (1998). "FDTD analysis of indoor radio propagation." *IEEE Antennas and Propag. Soc. Int. Symp,* Vol. 3, PP. 1664-1667.

6 - Levy, M. F. (1995). "Horizontal parabolic equation solution of radiowave propagation problems on large domains." *IEEE Trans. Antennas Propagat,* Vol. 43, PP. 137-144.

7 - Zaporozhets, A. A. (1999). "Application of vector parabolic equation method to urban radiowave propagation problems." *Proc. Inst. Elect. Eng. Microwaves, Antennas Propagation,* Vol. 146, PP. 53-256.

8 - Zelley, C. A. and Constantinous, C. C. (1999). "A three-dimensional parabolic equation applied to VHF/UHF propagation over irregular terrain." *IEEE Trans. Antennas Propagat.,* Vol. 47, PP. 1586-1596.

9 - Janaswamy, R. (2003). "Path Loss Predictions in the Presence of Buildings on Flat Terrain: A 3-D Vector Parabolic Equation Approach." *IEEE Trans. Antennas Propagat.,* Vol. 51, PP. 1716-1728.

10 - Collins, M. D. (1993). "A split-step Padé solution for the parabolic equation method." *J. Acoust. Soc. Amer.,* Vol. 93, PP. 1736-1742.

11 - Levy, M. F. (2000). *Parabolic Equation Method for Electromagnetic Wave Propagation.* IEE Press, London.

12 - Zhang, Z., Sorensen, R. K., Yun, Z., Iskander, M. F. and Harvey, J. F. (2002). "A ray-tracing approach for indoor/outdoor propagation through window structures." *IEEE Trans. Antennas Propagat.,* Vol. 50, PP. 742-748.

13 - Honcharenko, W. and Bertoni, H. L. (1994) "Transmission and reflection characteristics at concrete block walls in the UHF bands proposed for future PCS." *IEEE Trans. Antennas Propagat.,*Vol. 42, PP. 232-239.

14 - Richarlot, E., Bonilla, M., Wong, W., Fouad-Hanna, V., Baudrad, H. and Wiart, J. (2000) Electromagnetic propagation into reinforced concrete walls." *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.,* Vol. 48, PP. 357-366.

15 - Dalke, R. A., Holloway, C. L., McKenna, P., Johansson, M. and Ali, A. S. (2000). "Effects of reinforced concrete structures on RF communications." *IEEE Trans. Electromagn. Comp.,* Vol. 42, PP. 486-496.

16 - Arnold, H. W., Murray, R. R. and Cox, D. C. (1989). "815 MHz radio attenuation measured within two commercial buildings." *IEEE Trans. Antennas Propagat.,* Vol. 37, PP. 1335-1339.

17 - Kivinen, J. and Vainikainen, P. (1998). "Wideband propagation measurements in corridors at 5.3 GHz." *Proc. IEEE Int. Symp. on Spread Spectrum Techniques and Applications,* Vol. 2, PP. 512-516.

18 - Trueman, C. W., Davis, D. and Segal, B. (2000). "Ray optical simulation of indoor corridor propagation at 850 and 1900 MHz." *Proc. IEEE-APS. Conf.,* PP. 81-86.

19 - Martin, G. T., Faulkner, M. and Beach, M. A. (1995). "Wide band propagation measurements and ray tracing simulations at 1890 MHz." *Proc. IEEE Int. Conf. on Universal Personal Communications,* PP. 188-191.

20 - Mattiello, C. (1995). "Electromagnetic field studies in urban environment with a higher-order parabolic equation." *Proc. IEE Antennas and Propagation Conference,* PP. 355-358.

21 - Noori, N. and Oraizi, H. (2005). "Analysis of electromagnetic wave propagation into reinforced concrete walls using the parabolic equation method." *Proc. Int. Symp. on Antennas and Propagation,* PP. 737-740.

22 - Collins, M. D. and Evans, R. B. (1992). "A two-way parabolic equation for acoustic back scattering in the ocean." *J. Acoust. Soc. Amer.,* Vol. 91, 1357.

23 - Hyaric, A. Z. (2001). "Wide-angle nonlocal boundary conditions for the parabolic wave equation." *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 49, PP. 916-922.

24 - Senior, T. B. A. and Volakis, J. L. (1995). *Approximate Boundary Conditions in Electromagnetics.* IEE Press, London.

25 - Savov, S. V. and Herben, M. H. A. J. (2003). "Modal transmission-line modeling of propagation of plane radio waves through multilayer periodic building structures." *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 51, PP. 2244-2251.

26 - Heidary, K. (2002). "Transmission and reflection characteristics of a conducting wall with periodic openings (TM case)." *Proc. IEEE Antennas and Propagation Society Int. Symp.,* Vol. 4, PP. 82-85.

27 - Han, K. K., Yasumoto, K. and Uchida, K. (1998). "FVTD analysis of propagation of radio waves through a modified T-junction in two-dimensional tunnels." *Proc. Int. Conf. on Microwave and Millimeter Wave Technology,* PP. 1032-1035.

28 - Noori, N. (2006). *Application of Parabolic Wave Equation Method in Combination with Ray Tracing Algorithm for Indoor Radiowave Propagation Modeling.* Ph. D. Dissertation, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran (in Persian).

29 - Kong, J. A. (1986). *Electromagnetic Wave Theory*. Wiley-Interscience publication.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Site-Specific
2 - Ray Tracing
3 - Finite-Difference Time-Domain
4 - Parabolic Equation Method
5 - Paraxial
6 - Marching
7 - Split-Step Padé
8 - Modal
9 - Finite-Element
10 - Domain Decomposition
11 - Sub-Domain
12 - Scalar
13 - Non-Local Boundary Conditions
14 - Local Impedance Boundary Conditions
15 - Symmetric Boundary Conditions
16 - Beam Width
17 - Finite-Volume Time-Domain