

مدل‌سازی انتشار امواج رادیویی از درون ساختارهای پنجره‌ای با استفاده از روش معادله سهموی

نرگس نوری و همایون عریضی

بر اندازه‌گیری پرهزینه می‌باشند، می‌توان استفاده از روشهای الکترومغناطیسی یا معین را در مدل‌سازی فرآیند انتشار امواج رادیویی در محیط‌های خاص، مورد توجه قرار داد. این روشها بسیار دقیق می‌باشند اما نسبت به روشهای آماری به زمان و حجم محاسباتی بیشتری نیازمندند. یکی از روشهای معینی که برای بررسی چگونگی انتشار امواج در کانال‌های داخل ساختمان مورد توجه قرار گرفته است، روش ردگیری اشعه می‌باشد [۲] تا [۴]. در این روش برای محاسبه میدان، علاوه بر مسیر مستقیم بین فرستنده و گیرنده، مسیریابی با چندین انعکاس و پراش نیز منظور می‌شوند. اگر محاسبه میدان در تعداد نقاط زیادی از محیط داخل ساختمان مورد نیاز باشد، این روش کارایی مناسبی ندارد به این دلیل که در این گونه مسائل لازم است برای هر نقطه گیرنده، تمامی اشعه‌های دریافتی از مسیرهای مختلف ردگیری شوند و لذا اعمال این روش به زمان محاسباتی بالایی نیازمند است.

مسائل مربوط به انتشار امواج رادیویی در داخل ساختمان را می‌توان با استفاده از حل عددی معادلات ماکسول نیز تحلیل کرد. روشی که بیشتر برای حل عددی این معادلات مورد استفاده قرار گرفته است، روش تفاضل محدود در حوزه زمان^۱ (FDTD) می‌باشد [۵] و [۶]. در این روش با حل مستقیم معادلات ماکسول در حوزه زمان، روابط ساختاری محیط نیز خود به خود در محاسبه پاسخ منظور می‌شوند. بدین ترتیب روش FDTD برای حل مسائلی با محیط انتشار پیچیده مناسب است. از مزایای FDTD دقت بالایی آن و محاسبه همزمان پاسخ در تمامی نقاط مورد نظر می‌باشد، اما از آنجا که محاسبه میدان با استفاده از این روش به حجم حافظه بالایی نیاز دارد، بکارگیری آن برای مدل‌سازی انتشار امواج رادیویی در محیط‌هایی با ابعاد الکتریکی بزرگ غیر عملی به نظر می‌رسد.

برای غلبه بر مشکل روشهای ذکر شده می‌توان از تقریب سهموی معادله موج استفاده کرد. کاربرد اصلی تکنیک‌های مبتنی بر معادلات سهموی^۲ که اولین بار توسط لئونووویچ و فاک ارائه شدند [۷] و [۸]، در حل مسائل انتشار امواج در محیط‌های شهری می‌باشد [۹] تا [۱۲]. امروزه با توسعه کامپیوترهای دیجیتال می‌توان روشهای عددی را برای حل این معادلات ارائه نمود که باعث افزایش رویکرد محققین انتشار امواج به سوی بکارگیری معادلات سهموی در حل مسائل شده است. علت محبوبیت روشهای مبتنی بر معادلات سهموی در این است که یک معادله سهموی به راحتی با استفاده از روش گام‌برداری^۳ به صورت عددی حل می‌شود و لذا حل چنین معادله‌ای نسبت به حل معادله بیضوی به حافظه و حجم محاسبات کمتری نیازمند است.

با توجه به اهمیت مدل‌سازی انتشار امواج از خارج به داخل ساختمان،

چکیده: در این مقاله، روش معادله سهموی برای حل مسأله انتشار امواج از درون ساختارهای پنجره‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از این روش مسأله انتشار امواج از داخل یک مجموعه پنجره برای حالت‌های مختلف حل می‌شود و چگونگی تأثیر ابعاد پنجره‌ها بر پرتو پراش حاصل بررسی می‌گردد. نتایج حاصل از اعمال روش معادله سهموی برای مسأله ذکر شده در حالت‌های تابش عمودی و مایل امواج صفحه‌ای یکنواخت و نایکنواخت ارائه شده و با نتایج حاصل از روش FDTD موجود در مراجع در حالت تابش موج صفحه‌ای یکنواخت مقایسه می‌شود. با توجه به تشابه زیاد نتایج حاصل از این دو روش، از آنجا که روش معادلات سهموی نسبت به روش FDTD به زمان محاسبات و حافظه کامپیوتر کمتری نیاز دارد، می‌تواند شیوه مناسبی برای حل چنین مسائلی باشد.

کلید واژه: انتشار امواج رادیویی در محیط‌های داخل ساختمان، روش معادلات سهموی.

۱- مقدمه

سیستم‌های مخابراتی رادیویی مانند تلفن‌های سلولی، مخابرات شخصی و شبکه‌های بی‌سیم محلی در سالهای اخیر توسعه چشم‌گیری یافته‌اند. طراحی و نصب چنین شبکه‌هایی در داخل محیط ساختمان نیازمند توصیف دقیق کانال انتشار امواج رادیویی است. رفتار انتشار امواج در محیط‌های داخل ساختمان پدیده پیچیده‌ای است که تخمین عملکرد سیستم‌های مخابراتی بی‌سیم را در این محیط‌ها دشوار می‌سازد. از سوی دیگر بهینه‌سازی محل ایستگاه‌های پایه نیز برای اطمینان از عملکرد صحیح سیستم ضروری به نظر می‌رسد. به همین دلیل است که تخمین انتشار امواج رادیویی در محیط‌های داخل ساختمان و بهینه‌سازی محل ایستگاه‌های پایه، به موضوع پژوهشی مهمی تبدیل شده است. حاصل این پژوهش‌ها منجر به ارائه روشهای مختلفی برای مطالعه کانال انتشار رادیویی در داخل ساختمان گردیده است. روشهای پیش‌بینی انتشار امواج رادیویی در داخل ساختمان به مدل‌های تجربی و الکترومغناطیسی تقسیم می‌گردند. مدل‌های تجربی که مدل‌های آماری نیز نامیده میشوند، از برآزش برخی از معادلات پارامتری به داده‌های اندازه‌گیری شده حاصل شده‌اند [۱]. مزیت اصلی این مدل‌ها سرعت زیاد، قابلیت پیاده‌سازی مؤثر و عدم نیاز به حجم محاسباتی بالا در شبیه‌سازی‌ها است. اشکال این مدل‌ها در وابستگی به داده‌های اندازه‌گیری است که باید برای تحلیل باندهای فرکانسی یا محیط‌های مختلف تجدید گردند. از آنجا که روشهای مبتنی

این مقاله در تاریخ ۱۶ آبان ماه ۱۳۸۴ دریافت و در تاریخ ۲۰ خرداد ماه ۱۳۸۵ بازنگری شد.

نرگس نوری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران (email: nnoori@iust.ac.ir)

همایون عریضی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، نارمک، تهران (email: h_oraizi@iust.ac.ir)

1. Finite Difference Time Domain
2. Parabolic Equation
3. Marching

مناسبتی دارد. با استفاده از (۲) می‌توان معادله موج را بر حسب تابع $u(x, z)$ به صورت زیر نوشت

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \tau ik \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + k^2 (n^2 - 1)u = 0 \quad (3)$$

با تعریف عملگر Q به صورت زیر

$$Q = \sqrt{\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2} \quad (4)$$

رابطه (۳) را می‌توان به این شکل تجزیه کرد

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} + ik(1-Q) \right\} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} + ik(1+Q) \right\} u = 0 \quad (5)$$

جملات اول و دوم (۵) معادلات شبه‌دیفرانسیل مرتبه اول نسبت به x بوده و به ترتیب به امواج منتشرشونده پیشرو^۳ و پسرو^۴ مربوط می‌شوند. اگر در محیط انتشار تنها موج پیشرو وجود داشته باشد، می‌توان پاسخ زیر را برای (۵) نوشت [۱۴]

$$u(x + \Delta x, z) = e^{ik\Delta x(-1 + \sqrt{1+Z})} u(x, z) \quad (6)$$

که در آن عملگر Z به صورت زیر تعریف می‌شود

$$Z = \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2 - 1 \quad (7)$$

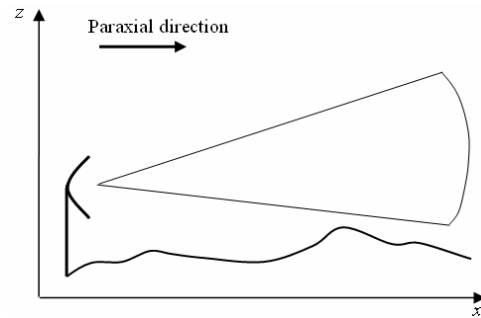
طبق (۶) اندازه میدان منتشرشونده پیشرو در هر گام از اندازه میدان در گام قبلی محاسبه می‌شوند. بهره محاسباتی این روش در مقایسه با حل معادله موج بیضوی که از درجه ۲ نسبت به x و z بوده و باید به صورت همزمان در تمامی نقاط ناحیه مورد نظر حل شود، بسیار بالاتر است و نیاز به حجم حافظه و زمان محاسباتی کمتری دارد. این نکته را می‌توان با توجه به شکل ۲ ملاحظه کرد.

از آنجا که (۶) شامل عملگر Z است باید به صورت مناسبی تقریب زده شود. روشهای مختلفی برای تقریب این عملگر وجود دارند که در محدوده خاصی از زوایای انتشار صدق می‌کنند [۱۵] و [۱۶]. ساده‌ترین روش استفاده از بسط تیلور توابع رادیکالی و نمایی موجود در (۶) است. این روش انتشار امواج را در زوایای کوچکی نسبت به جهت پاراکسیال مدل می‌کند. روش بسیار مناسبی که برای مدل کردن انتشار امواج با زوایای انتشار بزرگ استفاده می‌شود، روش معادله سهموی انشعاب پله‌ای پاده^۵ (SSP) است که توسط کالینز ارائه شد [۱۷]. با استفاده از این روش، شبه عملگر نمایی در (۶) را می‌توان به شکل زیر تقریب زد

$$e^{ik\Delta x(-1 + \sqrt{1+Z})} \approx -\sum_{l=1}^N \frac{a_l}{1 + b_l Z} \quad (8)$$

در [۱۸] نحوه محاسبه ضرایب مجهول (a_l, b_l) به صورت کامل آمده است. هر چه تعداد جملات بیشتری در تقریب فوق به کار رود، مدل سازی انتشار امواج در زوایای بزرگتری نسبت به محور پاراکسیال x امکان پذیر است. با جایگذاری (۸) در (۶)، رابطه زیر نتیجه می‌شود

$$u(x + \Delta x, z) \approx -\sum_{l=1}^N \frac{a_l}{1 + b_l Z} u(x, z) \quad (9)$$



شکل ۱: انتشار پاراکسیال موج.

در این مقاله موضوع انتشار موج از درون ساختار پنجره‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. در انتشار امواج از درون چنین ساختاری، شدت میدان الکترومغناطیسی به صورت پیچیده‌ای تضعیف می‌شود و لذا برای توصیف پدیده انتشار، به مدلی غیر از ضریب انتقال ساده نیاز است. مسأله انتشار موج صفحه‌ای از درون ساختار پنجره‌ای با استفاده از روشهای ردگیری پرتو و FDTD حل شده است [۱۳]، اما با توجه به مشکلاتی که برای این روشها ذکر شد، در این مقاله روش معادله سهموی برای حل این مسأله پیشنهاد می‌شود. روش معادله سهموی تاکنون در حل چنین مسائلی به کار نرفته است و از این رو به کارگیری این روش در حل مسائل انتشار امواج رادیویی در داخل ساختمان در مراجع سابقه‌ای ندارد. در شبیه‌سازی‌های کامپیوتری انجام شده با این روش، تأثیر تعداد پنجره‌ها بر پرتو پراش نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از روش معادلات سهموی برای حالت‌های تابش عمودی و مایل موج صفحه‌ای به ساختار مورد نظر، با نتایج ارائه شده در [۱۳] مقایسه می‌گردد. در انتها نیز پرتو پراش ناشی از تابش موج صفحه‌ای نایکنواخت با تابه گوسی شکل به ساختار پنجره‌ای بررسی می‌گردد.

۲- روش معادله موج سهموی

روش معادله سهموی تقریبی از معادله موج است که انتشار انرژی را مانند آنچه در شکل ۱ نشان داده شده است، در درون مخروطی با جهت محوری مشخص که به آن جهت پاراکسیال^۱ گفته می‌شود، مدل می‌نماید. برای به دست آوردن معادله موج سهموی، دستگاه مختصاتی دکارتی (x, y, z) را انتخاب کرده و فرض می‌کنیم که مسأله الکترومغناطیسی دوبعدی بوده و میدان‌ها مستقل از جهت عرضی y باشند. در محیط انتشار همگن و بدون منبع، مؤلفه میدان ψ معادله دوبعدی زیر را اکتان می‌کند

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + k^2 n^2 \psi = 0 \quad (1)$$

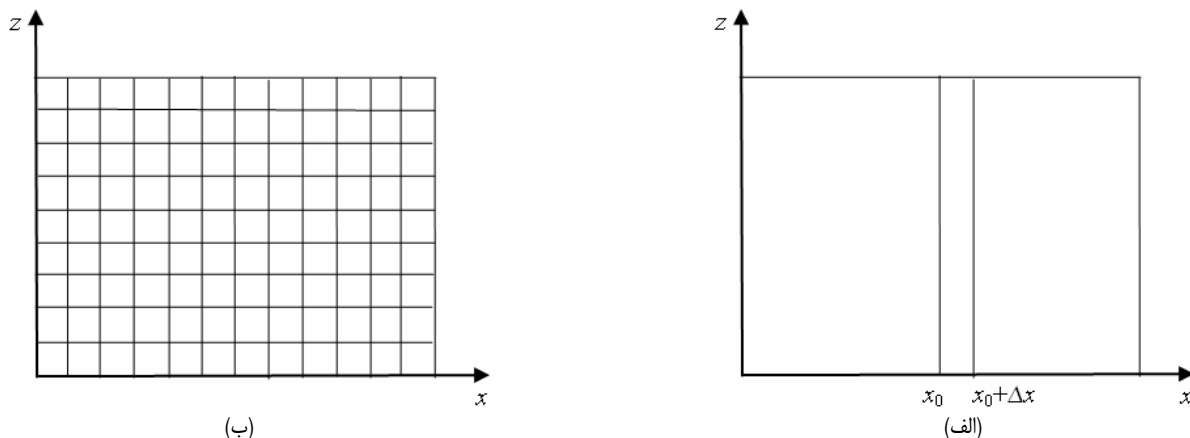
که در این معادله k عدد موج در فضای آزاد و n ضریب شکست محیط انتشار است. مؤلفه میدان $\psi(x, z)$ در حالت پلاریزاسیون‌های افقی و قائم به ترتیب برابر $E_y(x, z)$ و $H_y(x, z)$ می‌باشد. فرض می‌کنیم که تابع زمانی ψ به صورت $\exp(-i\omega t)$ باشد. با انتخاب جهت x به عنوان جهت پاراکسیال، تابع $u(x, z)$ به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴]

$$u(x, z) = e^{-ik_x x} \psi(x, z) \quad (2)$$

برای امواج منتشرشونده در جهت پاراکسیال، طبق (۲) تغییرات تابع $u(x, z)$ نسبت به x کند است و در نتیجه این تابع ویژگی‌های عددی

2. Operator
3. Forward
4. Backward
5. Split-Step Padé

1. Paraxial



شکل ۲: نحوه محاسبه پاسخ معادلات با مشتقات جزئی، (الف) معادله سهموی و (ب) معادله بیضوی.

مرزی غیر محلی زویه بزرگ^۳ استفاده می‌گردد. برای مرز بالای ناحیه انتشار این شرایط مرزی را می‌توان به شکل زیر نوشت [۲۱]

$$\frac{\partial u(x, z_{\max})}{\partial z} = j \int_0^x \frac{\partial v(\xi, z_{\max})}{\partial \xi} w(x - \xi) d\xi + j \frac{\partial u(x, z_{\max})}{\partial x} + I(x) \quad (16)$$

که $w(x) = -k \cdot e^{-jk \cdot x} [J_1(-k \cdot x) - jJ_0(-k \cdot x)]$ می‌باشد J_0 و J_1 توابع بسل نوع اول مرتبه صفر و یک هستند و

$$I(x) = -j \int_0^x \frac{\partial v(\xi, z_{\max})}{\partial \xi} w(x - \xi) d\xi + \frac{\partial v(x, z_{\max})}{\partial z} - j \frac{\partial v(x, z_{\max})}{\partial x} \quad (17)$$

که v پاسخ معادله سهموی با مقدار اولیه مشابه u در بالاتر از z_{\max} است. در تقریب انشعاب پله‌ای پاده، مسأله به دست آوردن شرایط مرزی برای v_1 ها است به نحوی که شرط مرزی غیر محلی (۱۶) برای u برقرار باشد. اگر شرط مرزی غیر محلی به صورت زیر بر هر یک از v_1 ها اعمال گردد [۲۱]

$$\frac{\partial v_1(x, z_{\max})}{\partial z} = j \int_0^x \frac{\partial v_1(\xi, z_{\max})}{\partial \xi} w(x - \xi) d\xi + j \frac{\partial v_1(x, z_{\max})}{\partial x} + I_1(x) \quad (18)$$

آنگاه با توجه به خطی بودن (۱۱)، u در شرط مرزی غیر محلی (۱۶) صدق می‌کند. شرایط مرزی محلی زوایای انتشار بزرگ برای محدودسازی ناحیه محاسبات در مرز پایین ناحیه انتشار نیز به همین ترتیب با مختصری تغییر نسبت به شرایط مربوط به مرز بالا به دست می‌آید.

۳- نتایج شبیه‌سازی

ساختار نشان داده شده در شکل ۳ (که ابعاد آن بر حسب طول موج بیان شده) برای تحلیل در نظر گرفته می‌شود. پرتو تشعشی این ساختار برای حالت تابش موج صفحه‌ای یکنواخت در [۱۳] مورد بررسی قرار گرفته و در آن روشهای FDTD، اندازه‌گیری و ردگیری اشعه اجرا و مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، یک ردیف شامل چند پنجره تحت تابش موجی صفحه‌ای با پلاریزاسیون افقی قرار

عبارت سمت راست رابطه فوق را می‌توان به صورت مجزا برای هر جمله محاسبه کرد. با فرض اینکه توابع v_1 به صورت زیر تعریف شوند

$$v_l(x + \Delta x, z) = \frac{a_l}{1 + b_l Z} u(x, z) \quad (10)$$

رابطه (۹) به شکل زیر قابل بازنویسی است

$$u(x + \Delta x, z) \approx - \sum_{l=1}^N v_l(x + \Delta x, z) \quad (11)$$

رابطه (۱۱) برای هر v_l به صورت مستقل قابل حل است. در این حالت پاسخ منشعب‌شده پله‌ای حاصل می‌شود. با حل (۱۰) برای هر یک از v_l ها داریم

$$(1 + b_l Z) v_l(x + \Delta x, z) = a_l u(x, z) \quad (12)$$

اگر عملگر Z را از (۷) در (۱۲) جایگذاری کنیم، معادله دیفرانسیل زیر برای هر یک از v_l ها به دست می‌آید

$$[1 + b_l (\frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + n^2 - 1)] v_l(x + \Delta x, z) = a_l u(x, z) \quad (13)$$

در نهایت با گسسته‌سازی (۱۳)، معادله تفاضل محدود v_l ها به صورت زیر به دست می‌آید

$$v_l^{j+1} + [\frac{k^2 \Delta z^2}{b_l} - 2 + k^2 \Delta z^2 (n^2 - 1)] v_l^j + v_l^{j-1} = \frac{a_l}{b_l} k^2 \Delta z^2 u^j \quad (14)$$

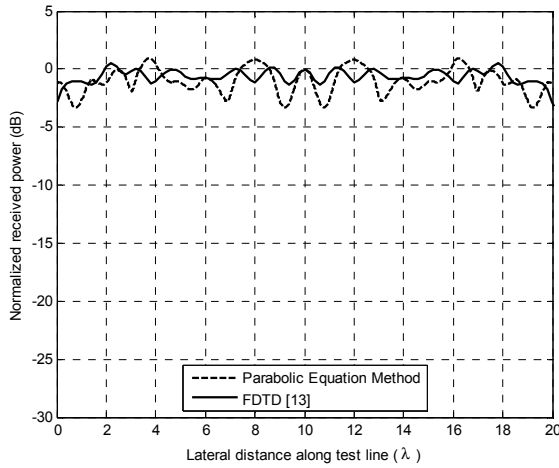
که در آن

$$v_l^j = v_l(x + \Delta x, j \Delta z) \quad (15)$$

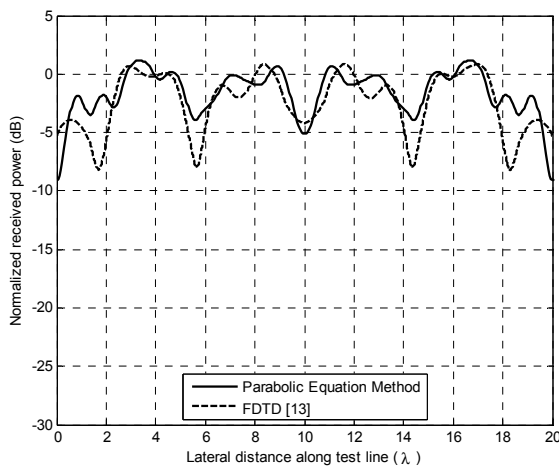
در حالتی که محیط انتشار فضای آزاد باشد (مانند مسأله تحلیل شده در این مقاله) در روابط به دست آمده ضریب شکست محیط برابر یک قرار داده می‌شود.

از آنجا که محیط انتشار در جهت z نامحدود است، باید ناحیه محاسبات را در این امتداد محدود نمود. روشهای مختلفی برای محدودسازی ناحیه انجام محاسبات به کار می‌رود. استفاده از لایه‌های جذب^۱ یا لایه‌های تطبیق کامل^۲ [۱۹] و [۲۰]، در مواقعی که تقریب معادله سهموی برای زوایای انتشار بزرگ نسبت به جهت پاراکسیال استخراج شده است کارایی مناسبی ندارد [۱۴]. در این تقریب‌ها از شرایط

1. Absorbing Layers
2. Perfectly Matched Layers



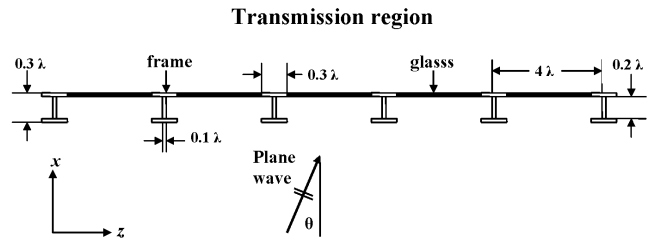
شکل ۵: مقایسه نتایج دو روش معادلات سهموی و FDTD در حالت تابش عمودی موج صفحه‌ای در فاصله ۱۰λ از پنجره‌ها، برای پرتو پراش حاصل از ساختاری با ۵ پنجره هر یک به طول ۰.۴λ .



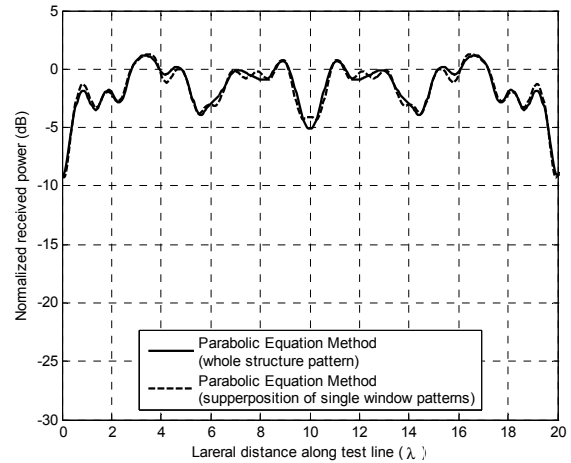
شکل ۶: مقایسه نتایج دو روش معادلات سهموی و FDTD در حالت تابش عمودی موج صفحه‌ای در فاصله ۱۵λ از پنجره‌ها، برای پرتو پراش حاصل از ساختاری با ۵ پنجره هر یک به طول ۰.۴λ .

است، در فاصله ۱۵λ از پنجره‌ها با دو روش فوق به دست آمده است. در شکل ۴ مقایسه‌ای بین پاسخ‌های حاصل از هر دو روش انجام شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود پاسخ‌ها کاملاً تطابق دارند. با توجه به عمومی‌تر بودن روش دوم، در مثال‌های بعدی از این روش استفاده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌گردد توان نرمالیزه‌شده دریافتی در برخی از نقاط بیشتر از یک است. علت این مسئله پدیده چندمسیری است که سبب می‌شود در هر نقطه گیرنده سیگنال‌های مختلفی از مسیرهای متفاوت دریافت شوند. میدان دریافتی کل در گیرنده مجموع میدان‌های دریافت‌شده از مسیرهای مختلف است. این مؤلفه‌های چندمسیری دارای فازهای متفاوتی هستند که ممکن است در بعضی از مناطق یکدیگر را تقویت نمایند و در برخی از نقاط اثر یکدیگر را خنثی کنند. به همین دلیل در برخی از نقاط توان نرمالیزه‌شده دریافتی در گیرنده بیشتر از یک و در برخی از نقاط کمتر از یک می‌باشد [۲۳].

برای تأیید روش معادلات سهموی، در شکل‌های ۵ و ۶ پرتو پراش حاصل از این روش در فواصل ۱۰λ و ۱۵λ با پرتو حاصل از اعمال روش FDTD در [۱۳] به عنوان مرجع مورد مقایسه قرار گرفته است.



شکل ۳: تابش موج صفحه‌ای به یک ساختار پنجره‌ای [۱۳].



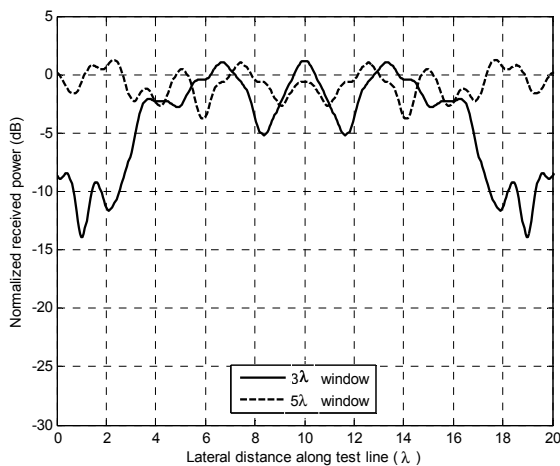
شکل ۴: مقایسه نتایج اعمال روش معادلات سهموی بر کل ساختار و یا مجموع پرتوهای تک‌تک پنجره‌ها در حالت تابش عمودی موج صفحه‌ای در فاصله ۱۵λ از پنجره‌ها، برای پرتو پراش حاصل از ساختاری با ۵ پنجره با چهارچوب فلزی، هر یک به طول ۰.۴λ .

گرفته است. پنجره‌ها دارای چهارچوب‌های فلزی با ابعاد مشخص شده در شکل هستند. با توجه به اینکه در مسئله تعریف‌شده در مرجع فوق‌الذکر پنجره‌ها فاقد شیشه می‌باشند، در شبیه‌سازی‌های این مقاله نیز پنجره‌ها فاقد شیشه در نظر گرفته شده‌اند. البته در صورت وجود شیشه نیز می‌توان مسئله را با معادله سهموی تحلیل کرد به شرطی که این معادله در حالت کلی برای یک محیط عایقی با ثابت عایقی مختلط استخراج گردد [۲۲].

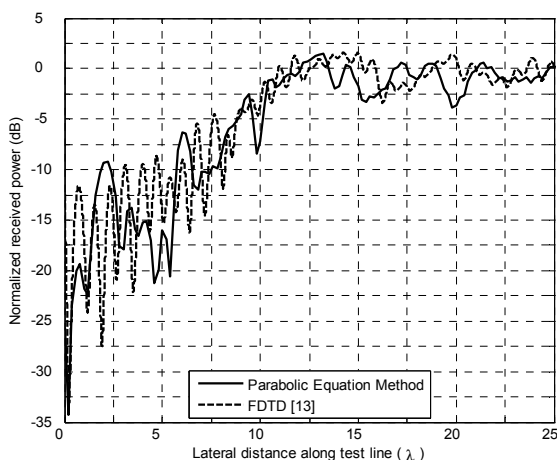
پرتو پراش حاصل در حالت‌های تابش عمودی و مایل امواج صفحه‌ای یکنواخت و نایکنواخت به ساختار بررسی می‌شود. در شبیه‌سازی‌ها جهت x به عنوان جهت پاراکسیال انتخاب می‌گردد. هدف استفاده از روش معادلات سهموی برای تعیین پرتو پراش حاصل از پنجره‌ها است. ناحیه محاسبات در جهت z از هر دو طرف توسط شرایط مرزی غیر محلی زاویه بزرگ محدود شده است. همان‌طور که (۸) نشان می‌دهد، اندازه میدان در هر گام، از مقدار آن در گام قبلی قابل محاسبه است. بنابراین با توجه به معلوم بودن میدان اولیه (میدان تابشی) می‌توان با استفاده از روش گام‌برداری میدان را در ناحیه مورد نظر تعیین کرد. با اعمال شرایط مرزی بر روی گوشه پنجره‌ها، اثرات پراش آنها نیز خودبه‌خود در محاسبات منظور می‌گردد.

برای حل مسئله در حالت تابش موج صفحه‌ای یکنواخت، در صورتی که چهارچوب پنجره‌ها فلزی باشد دو روش وجود دارد [۱۳]. در روش اول می‌توان پرتو پراش حاصل از یک پنجره را به دست آورد و سپس با جمع آثار پراش ناشی از کلیه پنجره‌ها، پرتو پراش کل را محاسبه نمود. در روش دیگر که روشی عمومی‌تر است می‌توان با اعمال روش معادلات سهموی به کل ساختار پنجره‌ها پرتو کل را به دست آورد.

پرتو پراش حاصل از تابش عمودی موج صفحه‌ای یکنواختی به ساختار شکل ۳ متشکل از پنج پنجره با چهارچوب فلزی که طول هر یک ۰.۴λ



شکل ۹: مقایسه پرتو پراش حاصل از دو ساختار با ۵ پنجره برای طول پنجره‌های ۳λ و ۵λ در فاصله ۲۰λ از پنجره‌ها در حالت تابش عمودی موج صفحه‌ای یکنواخت.

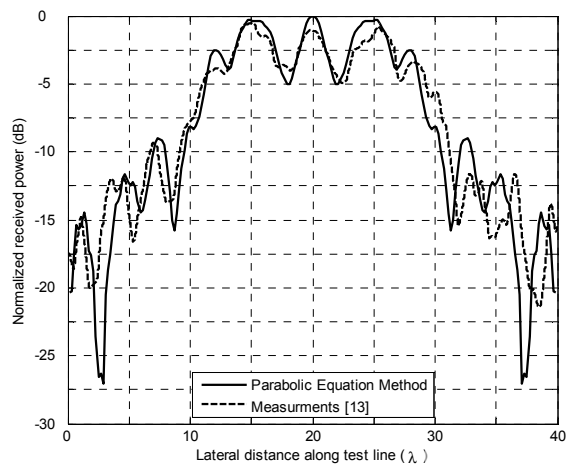


شکل ۱۰: مقایسه نتایج دو روش معادلات سهموی و FDTD در حالت تابش مایل موج صفحه‌ای یکنواخت با زاویه ۴۰° در فاصله ۱۵λ از پنجره‌ها، برای پرتو پراش حاصل از ساختاری با ۵ پنجره هر یک به طول ۰.۴λ.

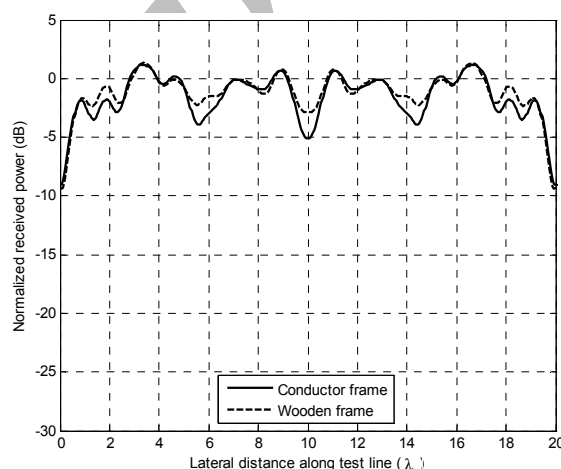
که مشاهده می‌شود، تأثیر جنس چهارچوب در پرتو پراش ناچیز است. در واقع اختلاف بین پرتو پراش حاصل از پنجره‌ها در دو حالت چهارچوب فلزی و چوبی در اثر شرایط مرزی اعمال شده بر روی سطح چهارچوب ایجاد می‌گردد. از آنجا که ناحیه اثرگذاری این شرایط مرزی فاصله‌ای برابر با 0.3λ در امتداد محور x است و این فاصله در مقایسه با ابعاد پنجره‌ها (0.4λ) کوچک می‌باشد، برای دو جنس چهارچوب مختلف شکل پرتو خروجی تغییر چندانی نمی‌کند.

جهت بررسی نحوه تأثیر طول پنجره‌ها در شکل پرتو پراش، دو ساختار مختلف پنجره‌ای را متشکل از پنج پنجره که در آنها طول پنجره‌ها به ترتیب ۳λ و ۵λ می‌باشد، در نظر می‌گیریم. شکل ۹ چگونگی تغییرات پرتو پراش در اثر تغییرات طول پنجره‌ها را در فاصله ۲۰λ از آنها نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود با افزایش طول پنجره‌ها پرتو پراش حاصل از آنها پهن‌تر می‌گردد.

روش معادلات سهموی را می‌توان برای حالت تابش مایل امواج بر ردیف پنجره‌ها نیز به کار برد. برای بررسی صحت این روش در حالت تابش مایل نیز مثالی را در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم که موج صفحه‌ای یکنواختی با زاویه تابش $\theta = 40^\circ$ نسبت به محور x ، مانند شکل ۳ به ساختار پنجره‌ای بتابد. پرتو پراش حاصل از شبیه‌سازی با روش معادلات سهموی در فاصله ۱۵λ در شکل ۱۰ رسم شده و با پرتو محاسبه شده توسط روش FDTD در [۱۳] مقایسه گردیده است.



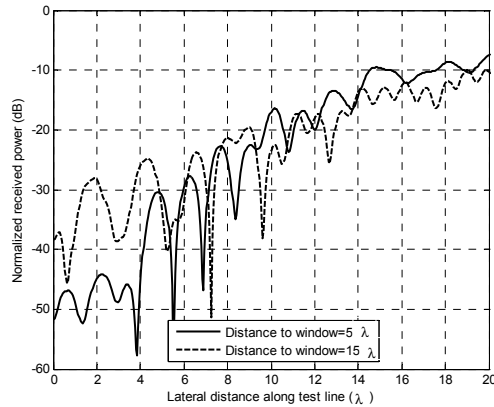
شکل ۷: مقایسه نتایج دو روش معادلات سهموی و اندازه‌گیری در حالت تابش عمودی موج صفحه‌ای در فاصله ۳۶λ از پنجره‌ها، برای پرتو پراش حاصل از ساختاری با ۵ پنجره هر یک به طول ۰.۴λ.



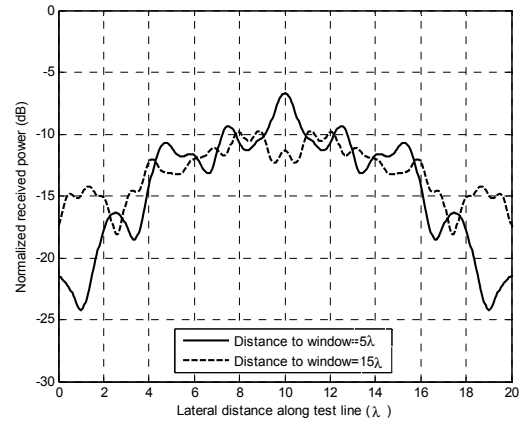
شکل ۸: مقایسه پرتو پراش حاصل از ساختاری با ۵ پنجره هر یک به طول ۰.۴λ در دو حالت چهارچوب فلزی و چوبی برای پنجره‌ها در فاصله ۱۵λ از پنجره‌ها.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، رفتار کلی پرتوهای به دست آمده از دو روش مشابه یکدیگر است. با توجه به ایجاد اشعه‌های پراش، موج در تمامی جهات منتشر می‌گردد، به این ترتیب علت اختلاف پرتوهای را می‌توان در تقریب‌های به کار رفته در دو روش FDTD و معادلات سهموی جستجو کرد. در واقع به دلیل تقریب محوری معادله موج سهموی، اختلاف بین نتایج به دست آمده از دو روش در کناره‌های ناحیه محاسبات بیشتر است. با افزایش فاصله از پنجره‌ها، این اختلاف رفته رفته کمتر می‌شود. برای تأیید این موضوع، پرتو پراش حاصل از ساختار شکل ۳ در فاصله ۳۶λ با استفاده از روش معادلات سهموی محاسبه و در شکل ۷ رسم شده و با توان اندازه‌گیری شده در [۱۳] مقایسه گردیده است. مقایسه این دو دسته نتایج تطابق خوب مقادیر شبیه‌سازی شده را با نتایج حاصل از اندازه‌گیری نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد اختلاف بین نتایج اندازه‌گیری و شبیه‌سازی به دلیل فاصله دورتر از پنجره‌ها در کناره‌های ناحیه محاسبات کمتر شده است. به این ترتیب در فواصل طولانی‌تر که استفاده از روش FDTD با توجه به امکانات کامپیوتری موجود عملی نیست، روش معادلات سهموی می‌تواند به عنوان شیوه‌ای مفید و مؤثر برای محاسبه میدان، به کار رود.

در شکل ۸ پرتو پراش برای حالتی که چهارچوب پنجره‌ها از جنس چوب می‌باشند ($\epsilon_r = 3$) در فاصله ۱۵λ رسم شده و با پرتو پراش حاصل از پنجره‌ها در حالت چهارچوب فلزی مقایسه شده است. همان‌طور



شکل ۱۲: پرتو حاصل از تابش مایل موج گوسی شکل با پهنای تابه 10° در فواصل 5λ و 15λ از پنجره‌ها، برای ساختاری با ۵ پنجره هر یک به طول 4λ .



شکل ۱۱: پرتو حاصل از تابش عمودی موج گوسی شکل با پهنای تابه 10° در فواصل 5λ و 15λ از پنجره‌ها، برای ساختاری با ۵ پنجره هر یک به طول 4λ .

- [3] C. Yang, B. Wu, and C. Ko, "A ray-tracing method for modeling indoor wave propagation and penetration," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 46, no. 6, pp. 907-919, Jun. 1998.
- [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 Propag. Magazine*, vol. 43, no. 2, pp. 41-49, Apr. 2001.
- [5] J. W. H. Lee and A. K. Y. Lai, "FDTD analysis of indoor radio propagation," in *Proc. IEEE Antennas and Propag. Soc. Int. Symp.*, vol. 3, pp. 1664-1667, Atlanta, US, 1998.
- [6] L. Talbi, "Simulation of indoor UHF propagation using numerical technique," in *Proc. Canadian Conf. on Electrical and Computer Eng.*, vol. 2, pp. 1357-1362, Boston, US, 2001.
- [7] M. A. Leontovich and V. A. Fock, "Solution of propagation of electromagnetic waves along the Earth's surface by the method of parabolic equations," *J. Phys. USSR*, vol. 10, pp. 13-23, 1946.
- [8] V. A. Fock, *Electromagnetic Diffraction and Propagation Problems*, Pergamon Press, 1965.
- [9] C. Mattiello, "Electromagnetic field studies in urban environment with a higher-order parabolic equation," in *Proc. IEEE Antennas and Propag. Conf.*, pp. 355-358, 1995.
- [10] C. A. Zelle and C. C. Constantinou, "A three-dimensional parabolic equation applied to VHF/UHF propagation over irregular terrain," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 47, no. 10, pp. 1586-1596, Oct. 1999.
- [11] A. A. Zaapozhzhets, "Application of vector parabolic equation method to urban radiowave propagation problems," *IEE Proc.-Microw. Antennas Propag.*, vol. 146, no. 4, pp. 253-256, Aug. 1999.
- [12] R. Janaswamy, "Path loss prediction in the presence of buildings on flat terrain: a 3-D vector parabolic equation approach," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 51, no. 8, pp. 1716-1728, Aug. 2003.
- [13] 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 Propag.*, vol. 50, no. 5, pp. 742-748, May 2002.
- [14] M. F. Levy, *Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation*, London, U. K.: IEEE Press, 2000.
- [15] A. Bambeger, B. Engquist, L. Halpern, and P. Joly, "Parabolic wave equation approximations in heterogeneous media," *SIAM J. Appl. Math.*, vol. 48, no. 1, pp. 99-128, 1988.
- [16] J. F. Claerbout, *Fundamentals of Geophysical Data Processing with Application to Petroleum Prospect*, McGraw-Hill, New York, 1976.
- [17] M. D. Collins, "A split-step Padé solution for the parabolic equation method," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 93, no. 4, pp. 1736-1742, 1993.
- [18] M. D. Collins, "A two-way parabolic equation for acoustic backscattering in the ocean," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 91, no. 3, pp. 1357-1358, Mar. 1992.
- [19] J. P. Berenger, "A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves," *J. Comp. Phys.*, vol. 114, no. 2, pp. 185-200, 1994.
- [20] J. F. Collino, "Perfectly matched absorbing layers for the paraxial equations," *J. Comp. Phys.*, vol. 131, no. 1, pp. 164-180, Feb. 1997.
- [21] A. Z. Hyaric, "Wide-angle nonlocal boundary conditions for the parabolic wave equation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, no. 6, pp. 916-922, Jun. 2001.
- [22] N. Noori and H. Oraizi, "Analysis of Electromagnetic Wave Propagation Into Reinforced Concrete Walls Using Parabolic Equation Method," in *Proc. ISAP05*, pp. 737-740, 2005.
- [23] M. Dolukhanov, *Propagation of Radio Waves*, Moscow, Mir Publishers, 1971.

دو پرتو نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در حالت تابش مایل نیز می‌تواند به عنوان روش مناسبی جهت مدل‌سازی پرتو پراش پنجره‌ها مطرح شود.

در حالت بعد فرض می‌کنیم موج صفحه‌ای نایکنواختی ناشی از آنتنی با تابه گوسی شکل به ساختار بتابد. آنتن دارای پهنای تابه نیم‌توان 10° بوده و در فاصله 20λ از پنجره‌ها بر روی خط تقارن ساختار ($z = 10\lambda$) قرار گرفته است. شکل ۱۱ پرتو پراش حاصل از تابش عمودی این موج را در فواصل 5λ و 15λ نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش فاصله میدان تضعیف می‌شود. از طرف دیگر با دور شدن از پنجره‌ها گستره مکانی پوشش میدان افزایش می‌یابد. بنابراین، اندازه میدان در کناره‌های ناحیه پاسخ در فاصله 15λ بیشتر از مقدار آن در این نواحی در فاصله 5λ است. در شکل ۱۲ نیز پرتو پراش حاصل از تابش مایل این موج با زاویه 20° نشان داده شده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش جدیدی مبتنی بر معادله سهموی برای محاسبه انتشار امواج از درون ساختارهای متشکل از چندین پنجره پیشنهاد و الگوریتم مربوطه تدوین شد. چندین مثال مختلف جهت نمایش کارایی روش پیشنهادی ارائه گردید. در ابتدا نتایج حاصل از روش ارائه شده با نتایج حاصل از روش FDTD و اندازه‌گیریها برای حالت تابش عمودی موج صفحه‌ای یکنواخت مقایسه گردید. سپس چگونگی تغییر پرتو پراش برای ابعاد و جنسهای مختلف چهارچوب پنجره‌ها و تابش مایل موج صفحه‌ای یکنواخت مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت پرتو پراش برای تابش موج صفحه‌ای نایکنواخت در حالت‌های تابش عمودی و مایل بدست آمد. نتایج حاصل از شبیه‌سازیها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی روشی معتبر و مفید برای محاسبه انتشار امواج از درون پنجره‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه روش پیشنهادی بر اساس معادله سهموی است، می‌تواند در مقایسه با روشهای معمول FDTD، روشی مؤثر با زمان و پیچیدگی محاسباتی کمتری باشد.

مراجع

- [1] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 40, no. 2, pp. 207-217, Feb. 1992.
- [2] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 879-891, Nov. 1994.

به عنوان استادیار به دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران منتقل شد. در سال ۱۳۷۳ به دانشیاری و در سال ۱۳۷۸ به استادی ارتقا یافت. فعالیت آموزشی ایشان شامل تدریس دروس مختلف مهندسی الکترومغناطیس در گرایش میدان‌ها و امواج گروه مخابرات می‌باشد. در یک دوره دو ساله به عنوان سرپرست گروه مخابرات انجام وظیفه کرد. سرپرستی پروژه‌های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری را بر عهده دارد. کتب مختلفی را تألیف و ترجمه کرده است مانند: آشنایی با اسلام، الکترومغناطیس جلد اول الکتریسیته ساکن، جلد دوم مغناطیس ساکن، میدان‌ها و امواج، تحلیل و طراحی آنتن (به عنوان کتاب سال جمهوری اسلامی ایران در سال ۱۳۷۵ انتخاب شد)، میدان‌های الکترومغناطیسی متناوب، و غیره.

فعالیت پژوهشی ایشان در زمینه روش‌های عددی برای تحلیل و طراحی آنتن‌ها، ابزارهای میکروویو، انتشار امواج رادیویی و غیره می‌باشد. یکی از پروژه‌های تحقیقاتی ایشان در سال ۱۳۸۰ به عنوان طرح برگزیده دانشگاه علم و صنعت ایران برگزیده شد. پروژه‌های متعددی را در صنعت و دانشگاه اجرا و تکمیل کرده است. بیش از ۱۱۰ مقاله علمی در مجلات و کنفرانس‌های بین‌المللی ارائه نموده است. عضو ارشد انجمن مهندسی برق و الکترونیک (IEEE) است. در تابستان ۱۳۸۲ مدت دو ماه را به عنوان استاد مدعو و مدت شش ماه را در سال ۱۳۸۳ برای فرصت مطالعاتی در دانشگاه Tsukoba ژاپن گذراند. در سال ۱۳۸۵ به عنوان استاد نمونه کشوری انتخاب شد.

نرگس نوری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق در سالهای ۱۳۷۷، ۱۳۷۹ و ۱۳۸۵ در دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانیده است. ایشان در دوره فرصت مطالعاتی دکتری خویش از سال ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۴ در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه واترلوی کانادا بوده است. هم‌اکنون در پژوهشکده فناوری ارتباطات مرکز تحقیقات مخابرات به عنوان پژوهشگر و مدیر پروژه مشغول به کار می‌باشد. مهمترین زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: روش‌های عددی در الکترومغناطیس، مدل‌سازی انتشار امواج رادیویی در محیط‌های مختلف و مدل‌سازی کانال‌های سیستم‌های مخابراتی با چندین آنتن ورودی و خروجی.

همایون عریضی دانشنامه کارشناسی مهندسی برق را در سال ۱۳۴۶ از دانشگاه آمریکایی بیروت، لبنان، دانشنامه‌های کارشناسی ارشد و دکتری را به ترتیب در سالهای ۱۳۴۸ و ۱۳۵۲ از دانشگاه سیراکیوز، ایالت نیویورک، آمریکا اخذ کرد. از سال ۱۳۵۲ تا ۱۳۵۳ به عنوان استادیار در دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تدریس کرد. از سال ۱۳۵۳ تا ۱۳۶۳ در یکان مخابرات صنایع الکترونیک ایران در شیراز به عنوان مهندس سیستم، سرپرست و رئیس بخش مهندسی سیستم و مشاور فنی یکان مخابرات HF/VHF/UHF فعالیت کرد. از سال ۱۳۶۳ تا ۱۳۶۴ به عنوان کارشناس فنی در قسمت مهندسی پشتیبانی مجتمع صنایع دفاع اصفهان کار کرد. در سال ۱۳۶۴

Archive of SID