

## بررسی اثرات ساختار دیوار روی پارامترهای کانال بی‌سیم داخل ساختمان با استفاده از روش FDTD

عطاالله ابراهیم‌زاده<sup>۱\*</sup>، محمدرضا عنایتی<sup>۲</sup>

۱- استاد، ۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۹۶/۰۱/۲۵، پذیرش: ۹۶/۱۰/۱۷)

**چکیده:** در این مقاله، اثرات ساختار دیوار روی پارامترهای یک کانال بی‌سیم، داخل ساختمان واقعی با استفاده از روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) دوبعدی بررسی شده است. دو نوع دیوار در نظر گرفته شده است. در حالت اول، دیوارها از نوع بلوک‌های بتنی با حفره‌های هوایی به عنوان دیوارهای ناهمگن و در حالت دوم دیوارها از نوع همگن با پارامترهای ساختمانی موثر هستند. نقشه‌های پوشش میدان، میانگین تلفات مسیر، پروفایل تاخیر توان و مقدار موثر گسترش تاخیر در هر دو حالت به دست آمده و مقایسه شده‌اند. پروفایل‌های تاخیر توان نشان می‌دهد، دیوارهای ناهمگن اثرات چندمسیره قویتری نسبت به دیوارهای همگن ایجاد می‌کنند و این اثرات در شرایط غیر دید مستقیم شدیدتر است. به طور میانگین، مقدار موثر گسترش تاخیر برای محیط با دیوارهای ناهمگن، در شرایط دید مستقیم ۵ نانوثانیه و در شرایط غیر دید مستقیم ۸ نانوثانیه بیشتر از محیط با دیوارهای همگن است.

**کلیدواژه‌ها:** محیط داخل ساختمان، روش تفاضل محدود حوزه زمان، پروفایل تاخیر توان، مقدار موثر گسترش تاخیر، دیوار ناهمگن، میانگین تلفات مسیر

### ۱- مقدمه

می‌شود [۵]. در مقابل روش تفاضل محدود حوزه زمان یکی از روش‌های عددی برای حل مسایل الکترومغناطیس است که از دقت بالایی برخوردار بوده و محدودیتی برای شبیه‌سازی پراکنده‌گرهای کوچک و ناهمگن ندارد. البته متناسب با ابعاد محیط و فرکانس مورد استفاده، حجم محاسباتی این روش افزایش می‌یابد که معمولاً شبیه‌سازی‌های با استفاده از این روش به حالت دوبعدی محدود می‌شود.

از دیدگاه الکترومغناطیس می‌توان دیوارها را به دو گروه همگن و ناهمگن تقسیم کرد [۶]. از جمله دیوارهای ناهمگن استفاده شده در ساختمان‌های امروزی می‌توان به بلوک‌های بتنی با حفره هوایی و بلوک‌های بتنی تقویت شده با میلگرد اشاره کرد. این دیوارها معمولاً به گونه‌ای کنار هم چیده می‌شوند که ساختاری متناوب در یک یا دو بعد ایجاد می‌کنند و باعث پراکندگی امواج در زوایای غیر از آینه‌ای می‌شوند. زمانی که دوره تناوب این ساختار کمتر از نصف طول موج باشد رفتاری مشابه دیوارهای همگن نشان می‌دهد و امواج تنها به صورت آینه‌ای از سطح این ساختار پراکنده می‌شوند. در حالی که اگر دوره تناوب بزرگتر از نصف طول موج تابشی باشد امواج در زوایای مختلف پراکنده می‌شوند [۷]. این امواج پراکنده شده به عنوان مدهای براگ شناخته می‌شوند که باعث افزایش مولفه‌های چندمسیره در محیط می‌گردند [۸]. معمولاً دیوارهای ناهمگن متناوب به صورت

با گسترش سریع سامانه‌های بی‌سیم، مدل‌سازی دقیق انتشار در کانال‌های مخابراتی مورد نیاز است. به منظور تخمین دقیق پارامترهای کانال، ضروری است که مدل دقیقی از محیط انتشار، مانند هندسه و مشخصات الکتریکی دیوارهای ساختمان در نظر گرفته شود.

یکی از روش‌های ساده برای تخمین تلفات مسیر استفاده از روش‌های آماری است [۱]. در این روش‌ها اندازه‌گیری‌های متعددی در محیط انجام گرفته و سپس با استفاده از نظریه آمار و احتمال به تحلیل داده‌ها می‌پردازند. بدیهی است که این مدل‌ها نمی‌توانند به طور کامل ویژگی‌های انتشار را در نظر بگیرند، بنابراین، از دقت کافی برخوردار نیستند. از طرف دیگر استفاده از روش‌های حل عددی در الکترومغناطیس مانند رهگیری پرتو [۲] و تفاضل محدود حوزه زمان [۳-۴] در سال‌های اخیر رشد چشم‌گیری داشته‌اند. در این میان روش رهگیری پرتو برای محیط‌های با ابعاد بزرگ و ساده نتایج مناسبی را ارائه می‌کند؛ در حالی که در برخورد با پراکنده‌گرهای کوچک و ناهمگن دچار خطا

\* نویسنده پاسخگو: e\_zadeh@nit.ac.ir

1- Ray-Tracing  
2- Finite-Difference Time-Domain (FDTD)

شبکه‌بندی شده و مجموعه‌ای از سلول‌ها را تشکیل می‌دهد که در هریک از این سلول‌ها میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به‌روز رسانی می‌شوند. ابعاد سلول‌ها در راستای  $x$  و  $y$  به‌صورت  $\Delta x$  و  $\Delta y$  نشان داده می‌شوند. هر گره با اندیس  $i$  و  $j$  نشان‌دهنده شماره گره در راستای  $x$  و  $y$  است. همچنین گام زمانی با اندیس  $n$  و فاصله زمانی هر گام با  $\Delta t$  نشان داده می‌شود. در این مقاله از روش FDTD دوبعدی در مد انتشاری TMz استفاده شده است که روابط به‌روز رسانی میدان‌ها برای این مد به صورت زیر است [۱۰]:

$$H_x \Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = H_x \Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \left( \frac{E_z \Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^n - E_z \Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} \right) \quad (1)$$

$$H_y \Big|_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = H_y \Big|_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{\mu_{i,j}} \left( \frac{E_z \Big|_{i+\frac{1}{2},j}^n - E_z \Big|_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta x} \right) \quad (2)$$

$$E_z \Big|_{i,j}^{n+1} = C_a \Big|_{i,j} E_z \Big|_{i,j}^{n-1} + C_b \Big|_{i,j} \times \left( \frac{H_y \Big|_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - H_y \Big|_{i-\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{H_x \Big|_{i,j-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - H_x \Big|_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} \right) \quad (3)$$

همچنین ضرایب به‌روز رسانی میدان الکتریکی در گره  $(i,j)$  به صورت زیر داده می‌شود:

$$C_a \Big|_{i,j} = \left( 1 - \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2\epsilon_{i,j}} \right) / \left( 1 + \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2\epsilon_{i,j}} \right) \quad (4)$$

$$C_b \Big|_{i,j} = \left( \frac{\Delta t}{\epsilon_{i,j}} \right) / \left( 1 + \frac{\sigma_{i,j} \Delta t}{2\epsilon_{i,j}} \right) \quad (5)$$

که در این روابط،  $H$  میدان مغناطیسی،  $E$  میدان الکتریکی،  $\mu$  گذردهی مغناطیسی،  $\epsilon$  گذردهی الکتریکی و  $\sigma$  هدایت الکتریکی است. اندازه هر سلول شبکه  $\Delta x = \Delta y = 1 \text{ cm}$  و گام زمانی  $\Delta t = 16 \text{ ps}$  ( $16 \times 10^{-12} \text{ s}$ ) می‌باشد. فرکانس شبیه‌سازی نیز  $1 \text{ GHz}$  انتخاب شده است. با توجه به اندازه سلول انتخابی دقت مش‌بندی برای فرکانس  $1 \text{ GHz}$ ، سی سلول بر طول موج فضای آزاد است و خطای عددی تا حد مطلوبی کاهش می‌یابد. همچنین به منظور کاهش بازگشتی‌های ناخواسته از خارج از محیط شبیه‌سازی در فاصله ای به اندازه بیست سلول ( $20 \text{ cm}$ ) از دیوارهای بیرونی در هر ۴ طرف ساختمان از لایه CPML استفاده شده است.

جهت شبیه‌سازی باند پهن و مقایسه اثرات نوع دیوار روی

دیوارهای همگن چندلایه در نظر گرفته می‌شوند. در این حالت لایه‌ی متناوب به صورت همگن با ثابت دی‌الکتریک موثر قرار داده می‌شود [۹]. برای مثال در مرجع [۳] به بررسی دیوارهای همگن و ناهمگن در محیط انتشار امواج در فضای داخل یک ساختمان با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان پرداخته و میزان محوشدگی و ظرفیت کانال را بررسی نموده است. همچنین به بررسی جایگزینی دیوارهای ناهمگن با دیوارهای همگن با ثابت دی‌الکتریک موثر و مقایسه آنها با یکدیگر پرداخته است. مراجع [۵] و [۸] به بررسی انتشار امواج در فضای داخل یک ساختمان با ترکیب روش‌های رهگیری پرتو و روش تفاضل محدود در حوزه زمان پرداخته است تا ظرفیت کانال و محوشدگی آن‌را به روشی دقیق‌تر بررسی نماید. مرجع [۹] نیز به معرفی یک سری روابط برای ثابت دی‌الکتریک موثر مواد پرداخته تا ضرایب بازتاب و انتقال و در نتیجه میزان توان دریافتی در یک فاصله کوتاه از فرستنده، در فضای داخل ساختمان را به دست آورد.

بنابراین، در این مقاله به منظور بررسی اثرات دیوارهای ناهمگن روی انتشار امواج در محیط‌های داخل ساختمان از روش FDTD به عنوان یک روش دقیق و تمام موج استفاده شده است. ابتدا با در نظر گرفتن دیوارهای ناهمگن در محیط، پارامترهایی از قبیل پوشش میدان، میانگین تلفات مسیر<sup>۱</sup>، پروفایل تاخیر توان<sup>۲</sup> و مقدار موثر گسترش تاخیر<sup>۳</sup> استخراج شده‌اند. سپس دیوارهای ناهمگن با دیوارهای همگن موثر جایگزین شده و تحلیل یکسانی انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد دیوارهای همگن با ثابت دی‌الکتریک موثر، از اثرات چندمسیره چشم پوشی می‌کنند حال آن‌که تنها میانگین تلفات مسیر مشابهی با دیوارهای همگن ارایه می‌کنند.

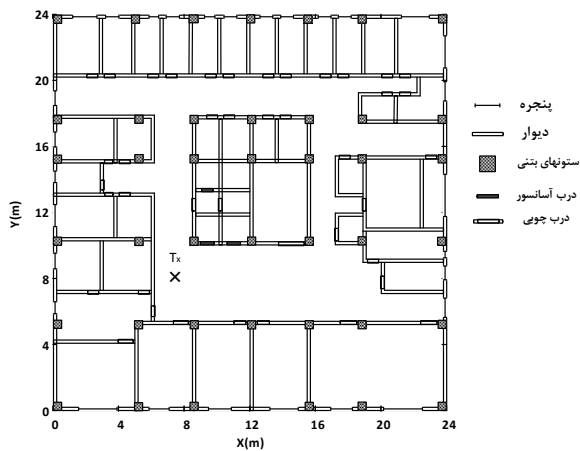
در ادامه بعد از توضیح مختصری راجع به روش FDTD در بخش ۲، محیط شبیه‌سازی و پارامترهای ساختمانی این محیط در بخش ۳، معرفی شده‌اند، در بخش ۴، پارامترهای کانال و روابط مربوط توصیف شده‌اند، در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی و پارامترهای استخراج شده در کانال برای هر دو دیوار مقایسه شده است و در انتها در بخش ۵ خلاصه‌ای از نتایج به‌دست‌آمده، بحث شده است.

## ۲- روش تفاضل محدود حوزه زمان

روش تفاضل محدود حوزه زمان یا FDTD براساس گسسته‌سازی معادلات تفاضلی ماکسول با استفاده از تقریب مشتق مرکزی، هم در فضا و هم در زمان است. در این روش کل محیط شبیه‌سازی

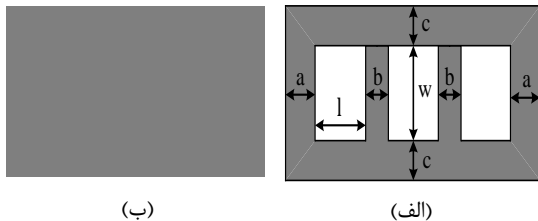
- 1- Path Loss
- 2- Power Delay Profile
- 3- Root Mean Square delay spread

ناچیز در شبیه سازی استفاده نشده اند.



شکل (۲): نمای دوبعدی از محیط شبیه سازی. محل فرستنده با علامت × مشخص شده است.

درب های آسانسورها از جنس فلز و با ضخامت ۱۰ سانتی متر قرار داده شده اند. دیوارهای محیط تماماً با ضخامت ۲۰ سانتی متر و از بلوک های بتنی شامل سه حفره توخالی ساخته شده اند. شکل (۳) نمونه ای از این بلوک های بتنی به عنوان دیوار ناهمگن و همچنین دیوار همگن استفاده شده در شبیه سازی را نشان می دهد. ابعاد قسمت های مختلف بلوک ناهمگن در شکل نامگذاری شده و به صورت  $a = c = 3\text{cm}$ ،  $b = 2\text{cm}$ ،  $w = 14\text{cm}$  و  $l = 10\text{cm}$  است. ثابت دی الکتریک حفره ها مانند فضای آزاد در نظر گرفته می شوند.



شکل (۳): (الف) دیوار ناهمگن، (ب) دیوار همگن

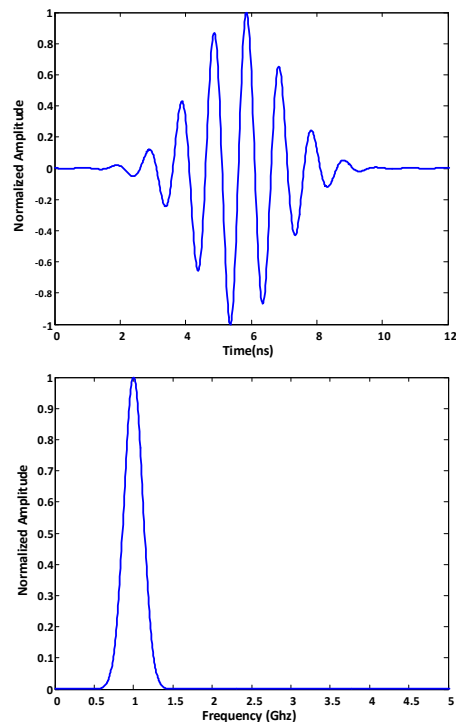
ضخامت دیوار همگن مانند دیوار ناهمگن است و دارای ثابت دی الکتریک موثر می باشد. در واقع ثابت دی الکتریک مختلط دیوار همگن با توجه به [۹] میانگینی از ثابت دی الکتریک دیوارهای ناهمگن است.

همان طوری که گفته شد عمده مواد استفاده شده در ساختمان عبارتند از: بتن، چوب، شیشه و فلز. به طور کلی هریک از این مواد مخلوطی از چندین ماده دیگر هستند (به عنوان مثال بتن ترکیبی از سیمان، سنگ ریزه، آب و هوا است [۶])، که میزان مواد ترکیب شده روی مشخصات الکتریکی آنها تأثیرگذار است. نتایج اندازه گیری های مختلف نشان می دهد که مقدار ثابت دی الکتریک نسبی با تغییر فرکانس تقریباً ثابت اما هدایت الکتریکی تابعی از

پروفایل تاخیر توان و مقدار موثر گسترش تاخیر از یک پالس گاوسین مدوله شده در فرکانس مرکزی ۱ GHz مطابق رابطه (۶) استفاده شده است.

$$E_z(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2} \times \sin(2\pi f_0(t-t_0)\Delta t) \quad (6)$$

مشخصات پالس به صورت  $t_0 = 3\tau$  و  $\tau = 1/87(\text{ns})$  می باشد که پالسی با پهنای باند ۳dB، ۲۰۰ MHz تولید می کند. شکل موج پالس مورد نظر و تبدیل فوریه آن در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): شکل موج پالس تحریک در حوزه زمان و فرکانس

### ۳- محیط شبیه سازی

محیط در نظر گرفته شده برای انجام شبیه سازی و استخراج پارامترهای کانال، طبقه چهارم ساختمان کلاس های دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل است. شکل (۲) یک برش افقی از محیط مورد نظر را نشان می دهد.

همان طور که در شکل نشان داده شده است ابعاد ساختمان ۲۴×۲۴ متر و از یک قسمت مرکزی شامل راه پله و آسانسورها و تعدادی اتاق با ابعاد مختلف در اطراف محیط تشکیل شده است. ستون های نشان داده شده در شکل همگی دارای ابعاد ۵۰×۵۰ cm و از جنس بتن فشرده هستند. پنجره های نصب شده روی دیوارهای بیرونی ساختمان نیز از جنس شیشه بوده و دارای ضخامت ۱ cm هستند. قاب های فلزی اطراف پنجره ها و درب ها به دلیل اثرات

می‌دهد که شدت سیگنال دریافتی در هر نقطه به صورت لگاریتمی از فاصله کاهش می‌یابد. در حالت کلی توان دریافتی  $P_r$  به صورت رابطه (۸) بیان می‌شود [۱۱].

$$P_r = P_t P_0 \left( \frac{d_0}{d} \right)^n \quad (8)$$

در این رابطه،  $P_0$  توان دریافتی متوسط در فاصله  $d_0$  از فرستنده (فاصله  $d_0$  باید در ناحیه میدان دور<sup>۱</sup> آنتن فرستنده و به اندازه کافی نزدیک باشد)،  $P_t$  توان دریافتی در فاصله  $d$  از فرستنده و  $n$  نمای تلفات مسیر<sup>۲</sup> نام دارد. بنابراین، تلفات مسیر در فاصله  $d$  از فرستنده از رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$PL(d)[dB] = PL(d_0)[dB] + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) \quad (9)$$

اگر در مسیر سیگنال مانعی وجود داشته باشد، بخشی از سیگنال ارسالی از طریق جذب، بازتاب، پراکندگی و شکست موج از دست می‌رود، که این اثر، اثر سایه<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد توان دریافتی در نقاطی که در فاصله یکسان هستند متفاوت از هم و دارای توزیع log-normal هستند. بنابراین، برای در نظر گرفتن اثرات سایه ضریب  $X_\sigma$  به رابطه (۹) اضافه می‌شود که یک متغیر تصادفی با توزیع نرمال و میانگین صفر و انحراف معیار  $\sigma$  است [۱۲] و رابطه کلی به صورت رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$PL(dB) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (10)$$

با توجه به رابطه بالا تلفات مسیر در کانال‌های داخل ساختمان توسط دو پارامتر  $n$  و  $\sigma$  توصیف می‌شوند که هر دو پارامتر شدیداً وابسته به نوع محیط انتشار هستند.

**۴-۲- پروفایل تاخیر توان و مقدار موثر گسترش تاخیر**  
به دلیل این‌که طول مسیر طی شده توسط هر کدام از مولفه‌های چندمسیره متفاوت است و از طرفی سرعت انتشار ثابت می‌باشد، هر یک از مولفه‌ها با تاخیر متفاوتی به گیرنده می‌رسند. در نتیجه یک پالس ارسال شده توسط فرستنده مسیره‌های متفاوتی را طی می‌کند، بنابراین، در گیرنده قطاری از پالس‌ها دریافت می‌شود که باعث گستردگی زمانی می‌گردد. میزان این گستردگی با استفاده از پروفایل تاخیر توان و پارامترهای قابل استخراج از آن

فرکانس است. مقادیر میانگین ثابت دی‌الکتریک نسبی مواد و هدایت الکتریکی با استفاده از رابطه‌ای تجربی در رنج فرکانسی ۱ GHz تا ۱۰۰ GHz بر اساس اندازه‌گیری‌های متعدد در [۱۱] گزارش شده است که در محیط شبیه‌سازی از این مقادیر استفاده کرده‌ایم و در جدول (۱) آورده شده است:

جدول (۱): پارامترهای ساختمانی مواد استفاده شده در

شبیه‌سازی

مواد	ثابت دی‌الکتریک نسبی	هدایت الکتریکی (S/m)
بتن	۵/۳۱	۰/۰۳۲۶
چوب	۱/۹۹	۰/۰۰۴۷
شیشه	۶/۳۷	۰/۰۰۴۳
فلز	۱	۱۰۷

حفره‌های درون بلوک ناهمگن دارای مشخصات الکتریکی مانند فضای آزاد ( $\epsilon_r = 1$ ) و  $\sigma = 0$  هستند و سایر قسمت‌های بلوک از جنس بتن در نظر گرفته شده است. مشخصات الکتریکی موثر بلوک همگن با استفاده از فرایند همگن‌سازی به صورت  $\epsilon_r = 3$  و  $\sigma = 0.014 \left( \frac{S}{m} \right)$  انتخاب شده است.

#### ۴- پارامترهای کانال

هر کانال مخابراتی توسط برخی از پارامترهای کمی مورد سنجش قرار می‌گیرد که به منظور مقایسه و بررسی عملکرد سامانه‌های بی‌سیم، اطلاعات کافی در مورد این پارامترها مورد نیاز است. تلفات مسیر به منظور بررسی تغییرات توان در مقیاس بزرگ و پروفایل تاخیر توان به منظور بررسی اثرات چندمسیره در محیط استفاده می‌شوند. در ادامه به توصیف هر یک از این پارامترها پرداخته شده است.

#### ۴-۱- تلفات مسیر

به طور کلی در انتشار امواج از سمت فرستنده به سمت گیرنده، حتی بدون برخورد امواج با موانع، سیگنال ارسالی به دلیل پخش کروی انرژی اطراف فرستنده دچار تضعیف می‌شود. تلفات مسیر (بر حسب دسیبل) به اختلاف توان ارسالی موثر و توان دریافتی اطلاق می‌شود.

$$PL[dB] = P_t[dB] - P_r[dB] \quad (7)$$

در این رابطه  $PL$  معرف تلفات مسیر،  $P_t$  توان ارسالی و  $P_r$  توان دریافتی است.

یکی از مدل‌های تجربی که به طور وسیع برای محاسبه تلفات مسیر توسط طراحان سامانه‌های بی‌سیم استفاده می‌شود، نشان

1-Far-Field

2- Path Loss Exponent (PLE)

3-Shadowing Effect

که برای شکل (۴- الف) اندازه میدان در فواصل نزدیک به دیوار مذکور برابر ۲۳- dB و با فاصله گرفتن از دیوار این مقدار به این مقدار کاهش و حتی به مقدار ۹۰- dB می‌رسد.

جدول (۲): پارامترهای مختلف شبیه‌سازی

عنوان پارامتر	مقدار پارامتر
اندازه هر سلول شبکه FDTD	$\Delta x = \Delta y = 1 \text{ cm}$
گام زمانی شبکه FDTD	$\Delta t = 16/7 \text{ (ps)}$
فرکانس شبیه‌سازی	۱ GHz
مشخصات پالس گوسی	$\tau = 1/87 \text{ (ns)}$ $t_0 = 3\tau$ پهنای باند ۲۰۰ MHz، ۳ dB
ابعاد ساختمان	۲۴×۲۴ متر
مشخصات پنجره	از جنس شیشه و با ضخامت ۱ cm
مشخصات درب‌های آسانسورها	جنس فلز و با ضخامت ۱۰ cm
مشخصات دیوار	از بلوک های بتنی و با ضخامت ۲۰ cm
مشخصات الکتریکی بلوک ناهمگن	حفره‌های بلوک ناهمگن از جنس (۱) $\epsilon_r = 1$ و $\sigma = 0$ (۲) $\epsilon_r = 3$ و $\sigma = 0.14 \frac{S}{m}$ سایر قسمت‌های بلوک از جنس بتن می‌باشند
مشخصات الکتریکی بلوک همگن	$\epsilon_r = 3$ و $\sigma = 0.14 \frac{S}{m}$
پارامترهای دیوارهای ناهمگن	$n = 2/86$ و $\sigma = 6/28 \text{ dB}$
پارامترهای دیوارهای همگن	$n = 3/0.5$ و $\sigma = 6/71 \text{ dB}$

### ۵-۱- تلفات مسیر

به منظور محاسبه تلفات مسیر، ابتدا توان متوسط روی مربعی به ابعاد  $3\lambda$  برای تمام سلول‌های شبکه به دست آمده است تا اثرات چندمسیره حذف شود. سپس با توجه به رابطه (۱۰) مقدار نمای تلفات مسیر و انحراف معیار تغییرات توان با رسم توان نرمالیزه  $10\log_{10}(\frac{P_0}{P})$  به عنوان تابعی از فاصله نرمالیزه  $10\log_{10}(\frac{d}{d_0})$  برای ۷۰۰ نمونه که به‌طور یکنواخت با فاصله  $3\lambda$  در محیط پخش شده‌اند به دست آمده است. فاصله  $d_0$  به عنوان فاصله مرجع از فرستنده ۱ m قرار داده شده که توان متوسط دریافتی در این فاصله  $P(d_0) = -34/2 \text{ dB}$  می‌باشد. بهترین خط منطبق بر این نمونه‌ها با استفاده از روش حداقل میانگین مربعات خطا<sup>۱</sup> به دست آمده است که شیب خط مورد نظر مقدار نمای تلفات مسیر را نشان می‌دهد. با توجه به مشخص شدن  $n$  مقدار انحراف معیار نمونه‌های واقعی از نمونه‌های تخمین زده شده نیز به دست آمده است.

شکل (۵) توان نرمالیزه نسبت به فاصله نرمالیزه و خط منطبق بر نمونه‌ها را برای محیط با دیوارهای ناهمگن و همگن نشان می‌دهد.

مانند میانگین تاخیر ( $\bar{\tau}$ ) و مقدار موثر گسترش تاخیر ( $\sigma_\tau$ ) مشخص می‌شود. اختلالات زمانی کانال‌های چندمسیره پهن باند معمولاً توسط این دو پارامتر قابل اندازه‌گیری هستند. میانگین تاخیر، اولین گشتاور پروفایل تاخیر توان است که به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود [۱]:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (11)$$

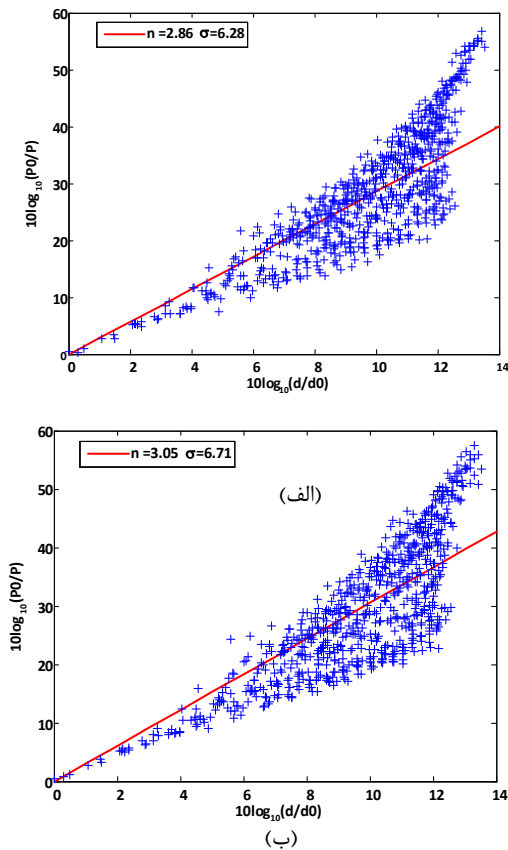
$P(\tau_k)$  پروفایل تاخیر توان مربوط به تاخیر  $\tau_k$  است. مقدار موثر گسترش تاخیر به صورت جذر دومین گشتاور مرکزی پروفایل تاخیر توان تعریف می‌شود [۱]:

$$\sigma_\tau = \sqrt{\frac{\sum_k P(\tau_k) (\tau_k - \bar{\tau})^2}{\sum_k P(\tau_k)}} \quad (12)$$

که این تاخیرها نسبت به اولین سیگنال مشاهده شده در گیرنده ( $\tau_0 = 0$ )، اندازه‌گیری می‌شوند.

### ۵- نتایج شبیه‌سازی

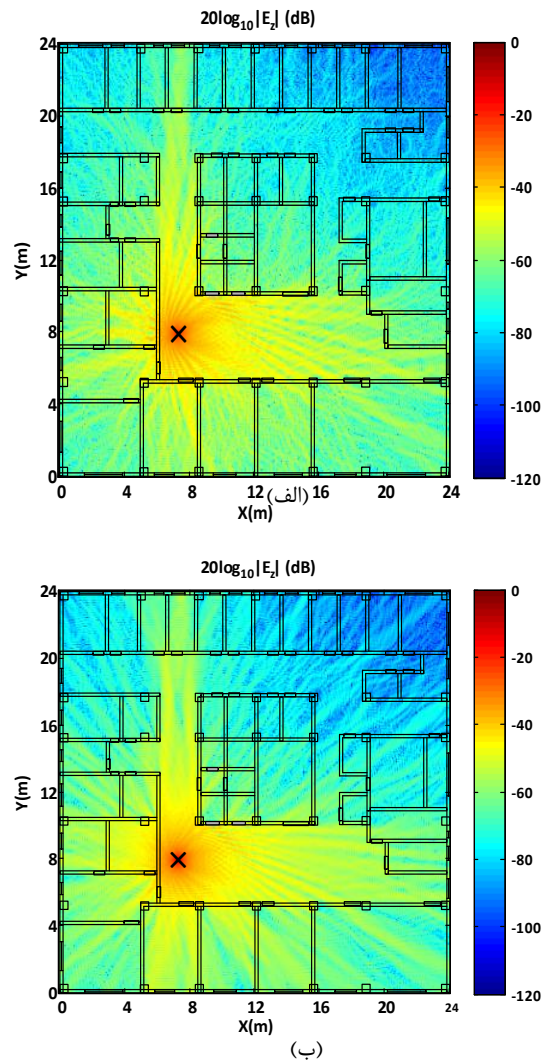
در این بخش اثرات دیوارهای ناهمگن روی انتشار امواج بی سیم در محیط بررسی شده و همچنین برای حالتی که دیوارهای ناهمگن با دیوارهای همگن دارای ثابت دی‌الکتریک موثر جایگزین شده اند، مقایسه شده است. کلیه پارامترهای شبیه‌سازی در جدول (۲) ارائه شده است. پس از پایان اجرای برنامه و رسیدن به حالت پایدار، دامنه و فاز میدان‌ها روی کل محیط با استفاده از تبدیل فوریه در فرکانس ۱ GHz به دست آمده است. شکل (۴) توزیع میدان الکتریکی نرمالیزه نسبت به منبع را روی کل محیط برای حالتی که از دیوارهای همگن و ناهمگن استفاده شده است؛ نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان مشاهده کرد که میزان تغییرات میدان روی محیط با دیوارهای همگن و ناهمگن به ویژه در قسمت‌های بالایی ساختمان متفاوت است، حال آن‌که میانگین تلفات مسیر تقریباً مشابه هم است. مقایسه این دو شکل نشان می‌دهد وضعیت میدان‌های الکتریکی در راهروها و همچنین اتاق های سمت راست منیع در هر دو ساختار شکل (۴) یکسان می‌باشد. بیشترین تفاوت‌ها مربوط به توزیع میدان الکتریکی در اتاق مجاور و سمت چپ منبع در دو شکل (۴- الف و ب) می‌باشد که باید گفت دیوارهای ناهمگن کمتر از دیوارهای همگن موثر، میدان را تضعیف کرده اما توزیع میدان در ساختار با دیوار همگن موثر در اتاق سمت چپ منبع یکنواخت‌تر می‌باشد به‌گونه‌ای که قدرت سیگنال تقریباً در تمامی فضای اتاق سمت چپ منبع در شکل (۴- ب) تقریباً یکنواخت و برابر ۵۰- dB می‌باشد. در صورتی



شکل (۵): توان نرمالیزه به عنوان تابعی از فاصله نرمالیزه برای ۷۰۰ نمونه در محیط با دیوارهای (الف) ناهمگن و (ب) همگن

## ۵-۲- پروفایل تاخیر توان و مقدار موثر گسترش تاخیر

در این قسمت جهت شبیه‌سازی باند پهن و مقایسه اثرات نوع دیوار روی پروفایل تاخیر توان و پارامترهای آن، مانند مقدار موثر گسترش تاخیر از رابطه (۶) به منظور تحریک محیط استفاده شده است. سپس به منظور دستیابی به پاسخ ضربه باند پایه<sup>۱</sup> در گیرنده، پس از اجرای برنامه، هر پروفایل در یک تابع سینوسی با فرکانس ۱ GHz ضرب و سپس با عبور از فیلتر پایین‌گذر آشکارسازی شده‌اند. سپس پروفایل تاخیر توان در هر نقطه از محیط، با میانگین گرفتن مجذور دامنه پاسخ ضربه باند پایه روی شبکه‌ای شامل ۵×۵ نقطه و به مرکز مکان مورد نظر به دست آمده‌اند [۱۳]. فاصله هر نقطه مجاور در این شبکه، معادل  $\frac{\lambda}{4} \approx 7.5 \text{ cm}$  در نظر گرفته شده است. بنابراین، عمل میانگین گرفتن روی محیطی با ابعاد تقریباً یک طول موج انجام شده است. مکان‌های A، B و C جهت استخراج پروفایل تاخیر توان در شکل (۶) نشان داده شده‌اند. به ترتیب مکان A به عنوان مسیر خط دید مستقیم<sup>۲</sup>

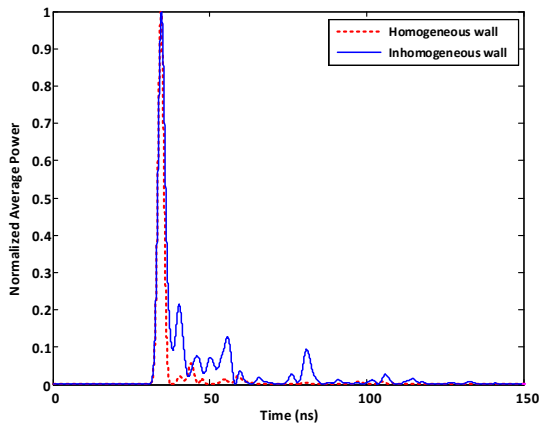


شکل (۴): پوشش میدان نرمالیزه برحسب دسی‌بل؛ (الف) ساختمان با دیوارهای ناهمگن، (ب) ساختمان با دیوارهای همگن موثر، مکان فرستنده در شکل با علامت X مشخص شده است.

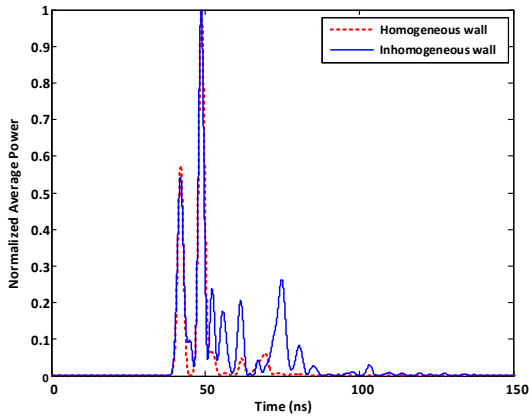
برای دیوارهای ناهمگن پارامترهای استخراج شده به صورت  $n = 2/86$  و  $\sigma = 6/28 \text{ dB}$  و برای دیوارهای همگن  $n = 3/05$  و  $\sigma = 6/71 \text{ dB}$  است. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف نمای تلفات مسیر بین دو دیوار ناچیز است و نشان می‌دهد که دیوار همگن با ثابت دی‌الکتریک موثر به خوبی میانگین تلفات مسیر را تخمین می‌زند. اما نتایج نشان می‌دهد که میزان انحراف معیار تغییرات میدان برای دو دیوار تفاوت بیشتری دارد، بنابراین، ممکن است دیوارهای همگن مشخصات محوشدگی چندمسیره متفاوتی را نشان دهند. در ادامه به بررسی دقیق‌تر اثرات چندمسیره هر دو دیوار روی پروفایل تاخیر توان و مقدار موثر گسترش تاخیر می‌پردازیم.

1- Base Band Impulse Response  
2- Line of Sight (LOS)

ناهمگن در شکل‌های (۸-۹) نشان می‌دهد، در نقطه C به نسبت نقطه B، اثر چندمسیرگی به دلیل مانع زیاد بیشتر می‌باشد.

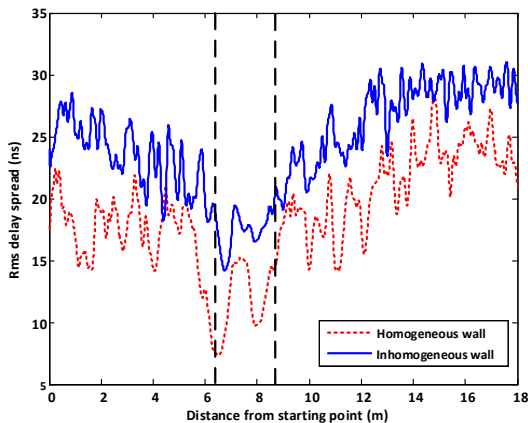


شکل (۸): پروفایل تاخیر توان در ناحیه B

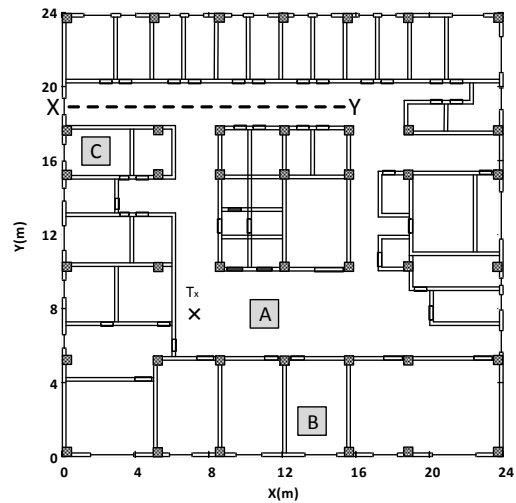


شکل (۹): پروفایل تاخیر توان در مکان‌های C

مقدار موثر گسترش تاخیر توسط رابطه (۱۲) روی خط XY (به شکل ۶) مراجعه شود)، برای هر دو دیوار به دست آمده و در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

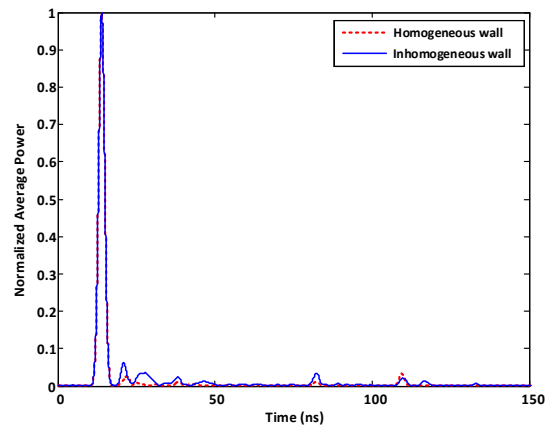


شکل (۱۰): مقدار موثر گسترش تاخیر روی خط XY. خط چین مشخص شده در شکل مربوط به مسیر LOS داخل راهرو است.



شکل (۶): نواحی A، B و C به منظور بررسی پروفایل تاخیر توان و خط XY به منظور بررسی تغییرات مقدار موثر گسترش تاخیر نیز در شکل مشخص شده است.

مکان B به عنوان مسیر غیر دید مستقیم<sup>۱</sup> با موانع کم و مکان C به عنوان مسیر غیر دید مستقیم با موانع زیاد شناخته می‌شوند. پروفایل‌های تاخیر توان مربوط به نواحی A، B و C در شکل (۹-۷) نشان داده شده‌اند.



شکل (۷): پروفایل تاخیر توان در ناحیه A

با توجه به شکل‌ها، در مکان A پروفایل تاخیر توان برای هر دو نوع دیوار تقریباً یکسان است، چرا که در مسیر دید مستقیم فرستنده قرار دارد و دیوارها تاثیر چندانی روی انتشار امواج نمی‌گذارند. در مکان‌های B و C اثرات دیوار ناهمگن به خوبی مشاهده می‌شود و همان‌طور که در شکل نشان داده شده دیوار همگن مولفه‌های چندمسیره کوچکتری نسبت به دیوار ناهمگن دارد. حال آن‌که در محیط با دیوارهای ناهمگن در شرایط غیر دید مستقیم بخش زیادی از انرژی توسط مولفه‌های چندمسیره به گیرنده می‌رسند. مقایسه پروفایل تاخیر توان برای دیوارهای

1- None Line of Sight (NLOS)

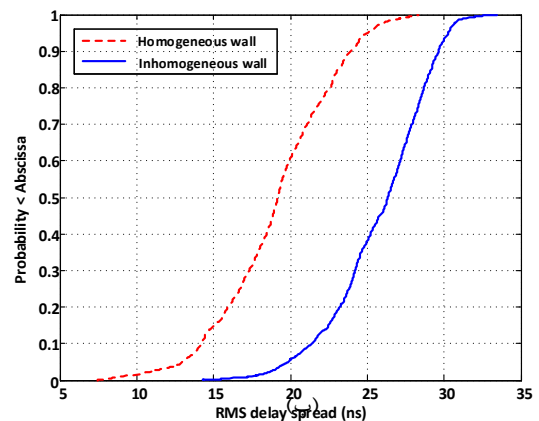
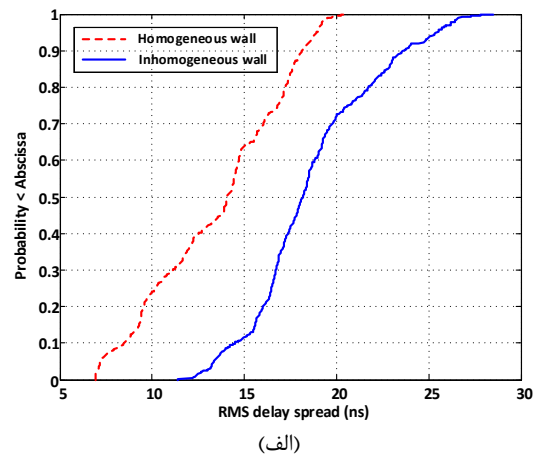
## ۶- نتیجه گیری

یکی از مهم‌ترین عوامل اختلال در کانال‌های مخابراتی داخل ساختمان، دیوارها هستند. معمولا در شبیه‌سازی‌های با استفاده از روش رهگیری پرتو، دیوارهای ناهمگن متناوب به صورت دیوارهای همگن با ثابت دی‌الکتریک موثر در نظر گرفته می‌شوند. در این پژوهش پارامترهای کانال برای محیط با دیوارهای ناهمگن متناوب استخراج شد و همچنین تحلیل مشابهی برای حالتی که دیوارهای ناهمگن با دیوارهای همگن موثر جایگزین شدند، انجام شد. نتایج نشان می‌داد دیوارهای همگن، متوسط سیگنال دریافتی را به خوبی تخمین می‌زنند اما مشخصات محوشدگی چندمسیره‌ی کانال، متفاوت از دیوارهای ناهمگن است. به طوری که انرژی قابل توجهی توسط مولفه‌های چندمسیره به گیرنده می‌رسد که دیوارهای همگن از این اثرات چشم پوشی می‌کنند. به طور متوسط مقدار موثر گسترش تاخیر برای محیط با دیوارهای ناهمگن در شرایط LOS و NLOS به ترتیب تقریبا ۵ و ۸ نانوثانیه بیشتر از محیط با دیوارهای همگن است. بنابراین تقریب دیوارهای ناهمگن متناوب با دیوارهای همگن موثر باعث ایجاد خطا در مشخصات چندمسیره کانال می‌شود و لازم است مدل دقیقی از دیوارها در شبیه‌سازی لحاظ شود.

## ۷- مراجع

- [1] T. S. Rappaport, "Wireless communications," principles and practice, vol. 2, prentice hall PTR, New Jersey, 1996.
- [2] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "Site-specific propagation prediction for wireless in-building personal communication system design," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 43, pp. 879-891, 1994.
- [3] Z. Yun, M. F. Iskander, and Z. Zhang, "Complex-wall effect on propagation characteristics and MIMO capacities for indoor wireless communication environment," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 52, pp. 914-922, 2004.
- [4] T. T. Zygiridis, E. P. Kosmidou, K. P. Prokopidis, N. V. Kantartzis, C. S. Antonopoulos, K. I. Petras, and T. D. Tsiboukis, "Numerical modeling of an indoor wireless environment for the performance evaluation of WLAN systems," Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 42, pp. 839-842, 2006.
- [5] Y. Wang, S. K. Chaudhuri, and S. Safavi-Naeini, "An FDTD/ray-tracing analysis method for wave penetration through in homogeneous walls," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 50, pp. 1598-1604, 2002.
- [6] M. Dehmollaian and K. Sarabandi, "Refocusing through building walls using synthetic aperture radar," Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, vol. 46, pp. 1589-1599, 2008.
- [7] W. Honcharenko and H. L. Bertoni, "Transmission and reflection characteristics at concrete block walls in the UHF bands proposed for future PCS," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 42, pp. 232-239, 1994.
- [8] M. Thiel and K. Sarabandi, "3D-wave Propagation Analysis of Indoor Wireless Channels Utilizing Hybrid Methods,"

با توجه به شکل بالا مقدار موثر گسترش تاخیر برای هر دو دیوار در نقاط LOS (ناحیه مشخص شده در شکل با خط چین) کمتر از نقاط NLOS است. به علاوه همان‌طور که انتظار می‌رفت مقدار موثر گسترش تاخیر دیوارهای ناهمگن بیشتر از دیوارهای همگن است، چرا که این دیوارها مولفه‌های چندمسیره بیشتری را ایجاد می‌کنند که باعث گستردگی زمانی سیگنال دریافتی می‌شود. مقدار موثر گسترش تاخیر در نقاط مختلفی شامل مسیرهای LOS و NLOS برای هر دو حالت استفاده از دیوارهای همگن و ناهمگن به دست آمده است که شکل (۱۱) تابع توزیع جمع‌ی مقدار موثر گسترش تاخیر مربوط به این نقاط را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۱)، می‌توان مشاهده نمود که دیوارهای ناهمگن در هر دو شرایط LOS و NLOS، مقدار موثر گسترش تاخیر بیشتری نسبت به دیوارهای همگن ایجاد می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد به طور متوسط مقدار موثر گسترش تاخیر برای محیط با دیوارهای ناهمگن در شرایط LOS و NLOS به ترتیب تقریبا ۵ و ۸ نانوثانیه بیشتر از محیط با دیوارهای همگن است.



شکل (۱۱): مقدار موثر گسترش تاخیر؛ (الف) نقاط LOS، (ب) نقاط NLOS



- Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 57, pp. 1539-1546, 2009.
- [9] C. L. Holloway, P. L. Perini, R. R. DeLyser, and K. Allen, "Analysis of composite walls and their effects on short-path propagation modeling," Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol. 46, pp. 730-738, 1997.
- [10] A. Taflov and S. C. Hagness, "Computational Electrodynamics," The Finite-difference Time-domain Method, Artech House, 2005.
- [11] R. TU-R, "P. 1238-7," Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 900MHz to 100 GHz, 2012.
- [12] S. Y. Seidel and T. S. Rappaport, "914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 40, pp. 207-217, 1992.
- [13] A. Alighanbari and C. D. Sarris, "Parallel time-domain full-wave analysis and system-level modeling of ultrawideband indoor communication systems," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 57, pp. 231-240, 2009.

## **Analysis of Wall Structure Effects on Indoor Wireless Channel Parameters Using the FDTD Method**

**A. Ebrahimzadeh<sup>\*</sup>, M. R. Enayati**

**Babol Noshirvani University of Technology**

(Received: 14/04/2017, Accepted: 07/01/2018)

### **Abstract**

*Abstract: In this paper, the effects of wall structures on the parameters of realistic indoor wireless channel using two dimensional finite difference time domains (FDTD) method are investigated. Two types of wall are considered for the environment. In the first case, the walls are a type of concrete block with air gaps as inhomogeneous walls and, in the second case, the walls are a type of homogeneous ones with effective constitutive parameters. For two cases, field coverage maps, average path loss, power delay profile and RMS delay spread are extracted and compared. Power delay profiles show that inhomogeneous walls create stronger multipath effects than homogeneous walls and that these effects are severe in none line of sight conditions. On average, the RMS delay spread for environment with inhomogeneous walls, in LOS conditions 5 ns and in NLOS conditions 8 ns is more than the environment with homogeneous walls.*

**Keywords:** Indoor Environment, Finite-Difference Time-Domain Method, Power Delay Profile, RMS Delay Spread, Inhomogeneous Wall, Average Path Loss

---

<sup>\*</sup> Corresponding author E-mail: e\_zadeh@nit.ac.ir